

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

# 23

1937

ОБЪЕДИНЕН  
ТЕХНИЧЕСКОЕ



НОЕ НАУЧНО-  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

23

1937

ДЕКАБРЬ

ГОД ИЗДАНИЯ 58-й

Орган Главэнергопрома, Главэнерго НКТП и Энергетического института Академии наук СССР  
Адрес редакции: Москва, Бол. Калужская, дом 67. Энергетический ин-т, 1 этаж, комн. 144, телеф. В 5-32-79  
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

*За дальнейший расцвет культуры  
народов СССР, за новые успехи и завое-  
вания советской науки и техники!*

*(Из лозунгов ЦК ВКП(б) к XX годовщине Великой  
Октябрьской Социалистической революции)*

## Заседание Петроградского Совета Р. и С. Д. 7 ноября (25 октября) 1917 г.

I.

### ДОКЛАД В. И. ЛЕНИНА О ЗАДАЧАХ ВЛАСТИ СОВЕТОВ.

*Краткий газетный отчет*

Товарищи! Рабочая и крестьянская революция, о необходимости которой все время говорили большевики, совершилась.

Какое значение имеет эта рабочая и крестьянская революция? Прежде всего, значение этого переворота состоит в том, что у нас будет Советское правительство, наш собственный орган власти, без какого бы то ни было участия буржуазии. Угнетенные массы сами создадут власть. В корне будет разбит старый государственный аппарат, и будет создан новый аппарат управления в лице советских организаций.

Отныне наступает новая полоса в истории России, и данная третья русская революция должна в своем конечном итоге привести к победе социализма.

Одной из очередных задач наших является необходимость немедленно закончить войну. Но для того, чтобы кончить эту войну, тесно связанную с нынешним капиталистическим строем, — ясно всем, что для этого необходимо побороть самый капитал.

В этом деле нам поможет то всемирное рабочее движение, которое уже начинает развиваться в Италии, Англии и Германии.

Справедливый, немедленный мир, предложенный

нами международной демократии, повсюду найдет горячий отклик в международных пролетарских массах. Для того, чтобы укрепить это доверие пролетариата, необходимо немедленно опубликовать все тайные договоры.

Внутри России громадная часть крестьянства сказала: довольно игры с капиталистами, — мы пойдем с рабочими. Мы приобретем доверие со стороны крестьян одним декретом, который уничтожит помещичью собственность. Крестьяне поймут, что только в союзе с рабочими спасение крестьянства. Мы учредим подлинный рабочий контроль над производством.

Теперь мы научились работать дружно. Об этом свидетельствует только что происшедшая революция. У нас имеется та сила массовой организации, которая победит все и доведет пролетариат до мировой революции.

В России мы сейчас должны заняться постройкой пролетарского социалистического государства.

Да здравствует всемирная социалистическая революция!

*Напечатано 8 ноября (26 октября) 1917 г. в „Известиях Ц.И.К.“ № 207.*

*В. И. Ленин, Сочинения, т. XXII, стр. 4—5*

## Коммутационный метод в автоматике

М. И. Парецкий

Центральная лаборатория Мосэнерго (ЦЛЭМ)

Большинство схем автоматики, в частности, автоматического регулирования, содержит как один из основных элементов сравнение двух или более величин. Так, при регулировании какой-либо величины, например, нагрузки генератора, по заданному графику производится сравнение действительной нагрузки генератора с заданной. В зависимости от наличия отклонения действительной нагрузки от заданной в ту или другую сторону на регулятор мощности подается импульс регулирования нагрузки. Часто величина этого импульса обусловлена величиной отклонения — прогрессивное регулирование.

Сравнение двух величин сводится к автоматическому вычитанию одной величины из другой и к определению размера и знака разности, используемой для создания импульса регулирования.

Иногда сравнение производится не между двумя отдельными величинами, а между суммами нескольких величин. Тогда к задаче вычитания прибавляется задача сложения, и устройство в целом должно решать задачу сложения нескольких величин с учетом их знака — алгебраическое суммирование.

Задача алгебраического суммирования встречается также в ряде других областей, например, в телеизмерении для суммирования нагрузок генераторов станции и в измерительной технике в схемах компенсационного измерения, представляющего собой случай применения автоматического регулирования.

Задача алгебраического суммирования решается проще всего в тех случаях, когда отдельные слагаемые представляют собой электрические величины постоянного или переменного тока одинаковой для всех слагаемых частоты. Сложение электрических величин легко осуществляется включением их в общую цепь с гальванической или электромагнитной связью между ними. Так например, сложение э. д. с. производится путем их последовательного включения в общую цепь.

Достаточно просто решается также задача алгебраического суммирования величин, воспроизводимых вращающимися моментами измерительных приборов. Механическая связь между осями приборов позволяет получить алгебраическую сумму. Механическое сложение моментов менее удобно, чем сложение электрических величин, так как требует концентрации всех измерителей — слагаемых в одном аппарате в определенном взаимном расположении, что может находиться в противоречии с другими соображениями относительно компоновки аппаратуры.

Наибольшие трудности возникают при алгебраическом суммировании величин, выражаемых величиной угла или угловой скорости. Таковы очень часто величины, являющиеся факторами автоматического регулирования, например, угол поворота расходомера, скорость вращения циркуляционного

насоса и т. п. Преобразование этих величин в пропорциональный электрический ток довольно сложно. Проще преобразовать их в импульсы тока, однако дальнейшие операции с импульсами — сложение, вычитание — требуют сложных устройств. К тому же существующие в настоящее время устройства суммирования импульсов при значительной сложности не дают полностью удовлетворительных результатов.

Разработанный автором<sup>1</sup> в Центральной лаборатории Мосэнерго (ЦЛЭМ) коммутационный метод представляет собой промежуточный способ между преобразованием в пропорциональный ток и преобразованием в импульсы и сочетает простоту преобразования с удобством выполнения задачи алгебраического суммирования.

**Коммутационный дифференциал.** Для передачи вращения весьма распространен метод шагового переключения, принцип которого показан на рис. 1.

Передатчиком служит коммутатор *K* с пластинами 1, 2, 3, 4, присоединенными проводами 5, 6, 7 и 8 к соответственным обмоткам электромагнитов 9, 10, 11, 12. Один полюс источника питания 13 подключен к вращающейся щетке 14, второй — к обратному проводу от обмотки электромагнитного шагового механизма *M*. При плавном вращении щетки 14 последовательно возбуждаются электромагниты 9, 9—10, 10, 10—11 и т. д., что заставляет якорь 15 совершать шаговые перемещения, следуя за магнитным полем, т. е. занимать последовательно 8 устойчивых положений за один оборот. Ось щетки является управляющей, ось якоря 15 — управляемой.

Коммутационный дифференциал позволяет передать вращение не одной оси, а суммарное вра-

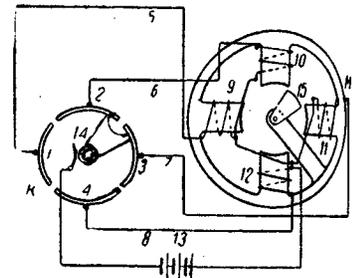


Рис. 1. Коммутационный метод передачи вращения

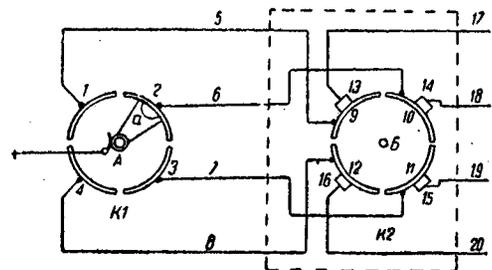


Рис. 2. Коммутационный дифференциал

<sup>1</sup> Авт. свид. № 48810, см. также „Электричество“ № 23, 1935.

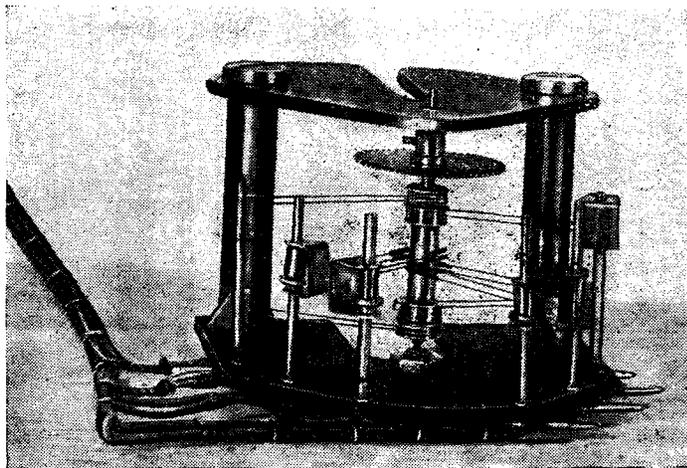
не двух осей. Ось *A* (рис. 2), вращаясь, приводит в движение щетку *a*. Предположим, что *B* неподвижна, а *A* вращается по часовой стрелке. Потенциал плюс щеткой *a* подается поочередно на пластины 1, 2, 3 и 4 при неподвижном коллекторе *K2* появляется на выходе поочередно на выводах 17, 18, 19 и 20. То же будет происходить, если ось *A* будет неподвижна, а *B* будет вращаться.

Если предположим, что щетка *a* за некоторый промежуток времени пройдет путь от пластины 1 к 2 (поворот на  $90^\circ$ ), за это же время ось *B* вернется по часовой стрелке на  $90^\circ$ , то потенциал плюс, подаваемый щеткой на пластину 2, через провод *b* подводится к пластине 10, которая после поворота оси *B* на  $90^\circ$  находится в контакте со щеткой 15 и выводом 19. Таким образом поворот осей *A* и *B* на  $90^\circ$  дает на выходе суммарное перемещение потенциала на 2 пластины, т. е. на  $180^\circ$ .

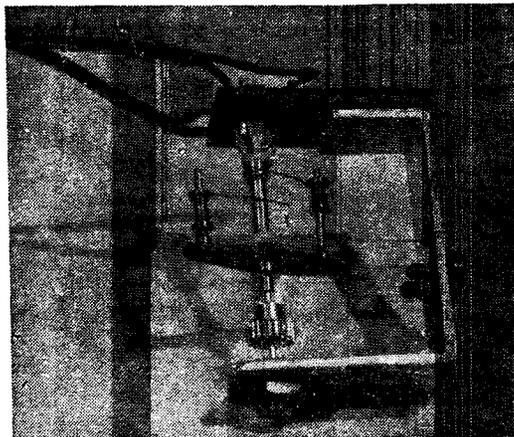
Предположим теперь, что ось *A* вращается по часовой стрелке, ось *B* — в противоположную сторону. В этом случае в результате поворота щетки на  $90^\circ$  потенциал опять-таки будет подан на пластину 10. Однако теперь вследствие одновременного поворота оси *B* в противоположную сторону эта пластина находится в контакте со щеткой 17. Таким образом при повороте оси *A* на  $+90^\circ$  и *B* на  $-90^\circ$  потенциал на выходе не сместился, иначе говоря, было осуществлено алгебраическое суммирование поворотов осей.

Принцип коммутационного дифференциала заключается в том, что угол перемещения потенциала по проводам, представляющим собой вход в коммутатор (например *K2*), на выходе из коммутатора увеличивается или уменьшается в зависимости от угла поворота оси коммутатора дифференциала.

Коммутационный дифференциал *K2* представляет собой полный коммутатор с четырьмя щетками, скользящими по пластинам и четырьмя контактными кольцами, по которым также скользят щетки, для постоянного соединения с отдельными пластинами. Схематическую конструкцию этого дифференциала показывает рис. 3, а; фотография его приведена на рис. 4, а. Значительно проще выполнен коммутатор *K1* (рис. 3, б; рис. 4, б),



а



б

Рис. 4. Фото полного *a*, простого *б* дифференциалов

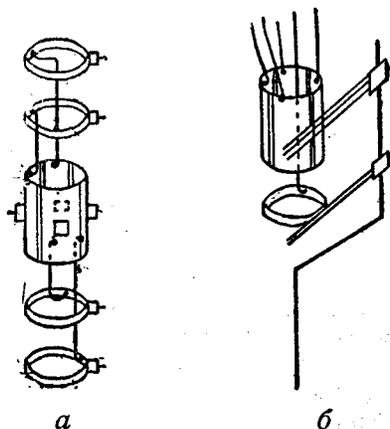


Рис. 3. Конструктивная схема полного *a*, простого *б* дифференциалов

снабженный одной лишь вращающейся щеткой и второй, подводящей к ней потенциал через контактное кольцо. Коллектор неподвижен, и поэтому присоединения к пластинам могут быть выполнены пайкой без контактных колец со щетками.

С помощью этих простейших конструктивных элементов можно разрешить ряд задач.

**Сложение показаний счетчиков.** Часто необходимо суммировать обороты нескольких осей. Сумма не должна быть получена обязательно в виде вращения физической оси, а лишь в виде показания счетного механизма, позволяющего произвести отсчет суммы оборотов. Эта задача встречается, например, при суммировании показаний счетчиков.

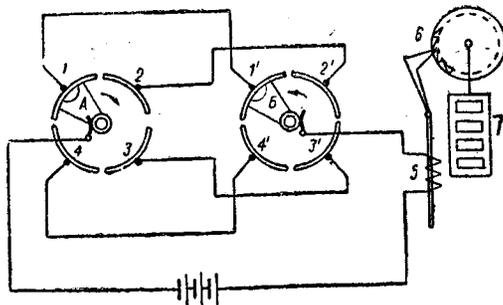


Рис. 5. Суммирование показаний двух счетчиков

Схема для сложения показаний двух счетчиков показана на рис. 5. На каждом из счетчиков укреплен 4-пластинчатый коммутатор. По пластинам 1, 2, 3, 4 и 1', 2', 3', 4' счетчиков вращаются соответственно щетки А и Б, приводимые в движение от осей счетчиков через зубчатые передачи. Пластины 1 и 1', и 2 и 2' и т. д. соответственно соединены между собой проводами. Плюс батареи подведен к щетке А. Привод к щеткам сделан таким образом, что при одинаковом знаке вращения самих счетчиков щетки А и Б вращаются в противоположных направлениях. Когда щетки находятся на пластинах, между собой не соединенных, цепь обмотки 5 разомкнута. Предположим, что один счетчик неподвижен, а второй вращается. Очевидно, что замыкание и размыкание цепи обмотки 5 будет происходить при каждом обороте вращающейся щетки. Если допустим, что обе щетки вращаются с одинаковой скоростью, то они, исходя из положения, указанного в рис. 5 (обмотка 5 возбуждена), через некоторое время окажутся: А — на пластине 2, Б — на пластине 4', т. е. на не соединенных между собой пластинах обмотка 5 обесточена. При дальнейшем вращении щетка А окажется на пластине 3, Б — на 3', и обмотка 5 вновь возбуждается. Таким образом цепь обмотки 5 будет разомкнута и вновь замкнута за поворотом каждой щетки или за один суммарный оборот. То же явление будет наблюдаться и при разных скоростях щеток А и Б.

В случае, если направление энергии в цепи одного из счетчиков изменится, обе щетки будут вращаться в одинаковом направлении, и число их встреч на соединенных между собой пластинах будет соответственно меньше: скорости вычитаются. При равенстве скоростей, противоположных направлениях счетчиков и одинаковых направлениях щеток щетки будут всегда в одинаковом взаимном положении, т. е. либо всегда соединены между собой либо всегда разомкнуты; частота импульсов в обмотке 5 будет равна нулю.

Импульсы тока в обмотке 5 приводят в действие храповой механизм 6, который вращает счетный механизм 7, регистрирующий суммарные обороты щеток А и Б, т. е. суммирующий показания обоих счетчиков.

На рис. 6 показана схема для сложения вращений трех осей. Действие ее ясно из описания коммутационного принципа (рис. 2) и схемы рис. 5. Стрелками указаны однозначные для самих счетчиков направления вращения коммутаторов. Стрелка на среднем коммутаторе показывает вращение коллектора относительно щеток.

Рассмотрим для простоты условия правильности

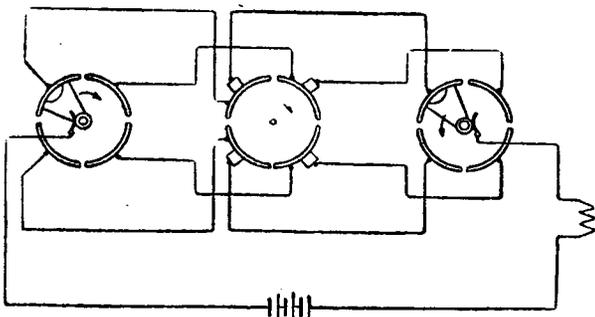


Рис. 6. Суммирование показаний трех счетчиков

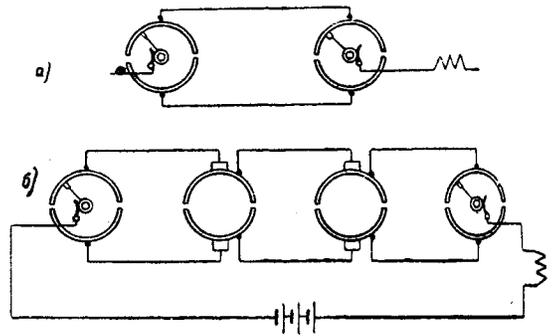


Рис. 7. Суммирование на двухпластинчатых коммутаторах (фирма Сангамо)

суммирования вращений двух осей. Примем сперва, что коллектор имеет минимально возможное число пластин — 2. Такая схема изображена на рис. 7, а. Поворот каждой из щеток на  $180^\circ$  меняет состояние цепи, замыкает ее, если она была разомкнутой, и наоборот; таким образом включенное в цепь этих коммутаторов реле будет получать импульсы соответственно суммарному числу оборотов коммутаторных щеток. Схема эта может быть собрана на большее число слагаемых (рис. 7, б). Поворот любого из коммутаторов на  $180^\circ$  вызывает изменение состояния тока в цепи возбуждения реле. По существу эта схема идентична со схемой переключения лестничного освещения, позволяющей зажигать и гасить освещение на лестнице с любого этажа. Устройство по принципу схемы б рис. 7 действительно применяется для суммирования показаний счетчиков американской фирмы Сангамо. Устройство работает правильно при условии, если переключения коммутаторов происходят одновременно. В случае, если два коммутатора повернутся одновременно, состояние тока в реле останется без изменения, импульс будет потерян: получается погрешность суммирования. Эту погрешность можно избежать лишь в том случае, если при помощи особых мероприятий исключить возможность одновременного переключения двух или большего числа коммутаторов. По этому принципу — принципу блокировки устройства с запасанием и поочередным действием переключений — работает суммирующее устройство фирмы Вестингауз.

Рассмотрим, как можно в более общем виде определить причину погрешности суммирования и какие из этого можно вывести правила для создания схемы без погрешностей.

Ток в обмотке реле при вращении двух коммутаторов меняется по импульсной кривой (рис. 8). Импульсы могут следовать один за другим неравномерно, особенно в случае разных скоростей коммутаторов. Каждый период — импульс тока плюс пауза — можно рассматривать как один суммарный поворот коммутаторов или изменение фазы тока в обмотке реле на  $360^\circ$ . Очевидно, что срабатывание реле может произойти лишь при изменении тока в обмотке возбуждения. Если за время, меньшее собственного времени срабатывания реле, произойдут два изменения состояния тока, друг друга нейтрализующие, например, переход из точки 3 в точку 4 (рис. 8), то реле не успеет сработать, и импульс будет потерян. Возможность такой погрешности имеется налицо,

суммарный угол поворота двух коммутаторов превышает  $180^\circ$ , так как в случае одновременных поворотов возможен переход с 3 в точку 4, т. е. два изменения тока в реле, взаимно нейтрализующихся, произойдут за меньшее собственное время срабатывания реле.

В устройстве рис. 7 поворот каждого коммутатора означает поворот электрически на  $180^\circ$ . Поэтому при одновременном повороте двух коммутаторов суммарный поворот фазы тока в реле вернется на  $360^\circ$ . Следовательно, возможна погрешность.

Чтобы возможное одновременное суммарное перемещение двух коммутаторов не превышало  $90^\circ$ , необходимо осуществить поворот каждым коммутатором фазы тока на угол не больше  $90^\circ$ . В устройстве, работающем с промежуточными положениями контактной щетки (рис. 1), число коммутационных положений равно удвоенному числу пластин. Так, в устройстве по рис. 1 плавающее вращение щетки 14 дает 8 положений якоря при наличии на коммутаторе  $K$  четырех пластин. Каждый коммутационный шаг дает  $1/8$  оборота, т. е.  $45^\circ$ . Соответственно этому и суммирующее устройство рис. 5 будет работать без погрешностей.

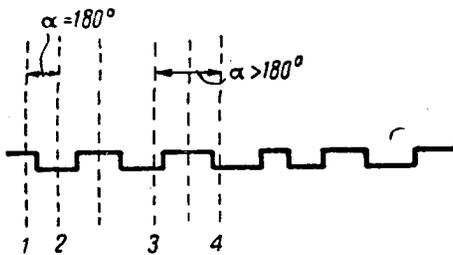


Рис. 8. Диаграмма импульсов в суммарной цепи

Нетрудно убедиться, что сложение вращений двух осей может быть осуществлено трехпластинчатым коллектором.

При суммировании вращений трех осей (рис. 6) надо принять во внимание, что средний коммутатор является «полным», т. е. имеет столько же щеток, сколько имеется пластин коллектора. Такой коммутатор не допускает длительных промежуточных положений щеток между пластинами, так как при этом получилось бы круговое к. з. на коллекторе. Средний коммутатор во избежание длительного кругового к. з. устраивается не с плавным вращением, а с шаговыми поворотами на угол, соответствующий дуге пластины коллектора. Крайние же коммутаторы ввиду наличия лишь одной щетки могут длительно занимать промежуточные положения. Если устройство для суммирования вращений трех осей (рис. 6) выполнено на трехпластинчатых коллекторах, то поворот каждого из крайних коммутаторов означал бы поворот на  $60^\circ$ , поворот среднего — на  $120^\circ$ , и существовала бы возможность в случае одновременного переключения всех трех коммутаторов одновременного поворота на  $240^\circ$ , т. е. возможны погрешности. Применение же четырехпластинчатых коллекторов дает максимально возможный одновременный суммарный поворот в  $180^\circ$ .

Описанная выше схема суммирования (рис. 5 и 6) применима для ограниченного числа слагаемых. При четырехпластинчатых коллекторах число слагаемых одного знака вращении не должно превышать 3. При увеличении числа слагаемых необходимо соответственно увеличить число пластин и щеток каждого коммутатора, что частично сводит на-нет одно из основных достоинств коммутационного метода: его исключительную конструктивную простоту. Это обстоятельство заставляет ограничиться числом слагаемых в одной коммутационной цепи, равным 2, в крайнем случае 3.

Чтобы суммировать большее число слагаемых, необходимо прибегнуть к методу суммирования «пирамидой». Этот метод заключается в том, что сумма двух или трех слагаемых, получаемая в одной коммутационной цепи, служит слагаемым в новой цепи, в которую входят 2 или 3 суммы.

В коммутационной схеме рис. 6 каждое слагаемое представлено коммутатором. Чтобы в коммутационной схеме суммировать не отдельные величины, а полученные коммутационным методом частичные суммы, необходимо эти частичные суммы воспроизвести не в виде простых пульсаций суммарного реле, а в виде циклического переключения. Это может быть осуществлено двумя различными путями при помощи: а) электромагнита с вращающимся якорем или же б) релейной циклической схемы<sup>2</sup>.

Электромагнит с вращающимся якорем по ряду причин обладает весьма посредственными электрическими и динамическими качествами. Потребление тока относительно велико, обмотка обладает большой индуктивностью, предел устойчивой работы якоря 3—4 шага в секунду. Поэтому применение вместо него простых реле, например телефонного типа, представляет достижение, к тому же такое реле в большинстве схем суммирования неизбежно и поэтому не может рассматриваться как новый дополнительный конструктивный элемент.

Для осуществления пирамидальной схемы необходимо, чтобы релейная схема осуществляла ту же работу, которую выполняет коммутатор: циклическое переключение полюса по четырем проводам. Схема пирамидального суммирования, в которой применено такое циклическое переключение, показана на рис. 9. Действие этой схемы, предназначенной для суммирования четырех слагаемых,

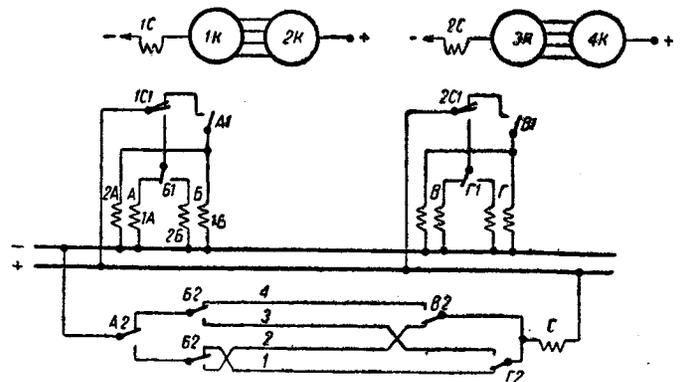


Рис. 9. Релейные циклические схемы для суммирующей пирамиды

<sup>2</sup> Авт. свид. по заявке № 179558.

происходит следующим образом. Слагаемые разбиваются на две группы по два. Каждая ось снабжена коммутатором *K*. Вращение осей 1 и 2 складывается включением их коммутаторов *1K* и *2K* в коммутационную цепь, и сумма оборотов этих осей воспроизводится в виде частоты пульсаций первого суммарного реле *1C*. Точно так же сумма осей 3 и 4 получается на втором суммарном реле *2C*. Для дальнейшего суммирования в коммутационной цепи каждое реле *1C*, *2C* должно производить циклическое переключение. Эта задача выполняется при помощи двух реле *A* и *B* (или для второй полусуммы *B* и *Г*). При периодическом возбуждении реле *1C* происходит замыкание контакта *1C1* в нижнее положение, при обесточении *1C* этот контакт отходит в верхнее положение. Реле *A* и *B* — двухобмоточные, с двумя катушками на одном сердечнике, действующими на один якорь. Контакт *1C1* — переходной, т. е. он при переключении, раньше чем разорвать первую цепь, сначала замыкает вторую цепь: работает без разрыва.

При переходе контакта *1C1* в нижнее положение замыкается цепь обмотки *1A*. Реле *A* притягивает свой якорь и замыкает контакт *A1*. По обесточению реле *1C* контакт *1C1* возвращается в верхнее положение; при этом обмотка *1A* обесточивается, но через замкнутый контакт *A1* и верхнее положение контакта *1C1* получает возбуждение обмотка *2A*, благодаря которой якорь реле *A* остается притянутым. Через те же контакты возбуждается обмотка *1B* реле *B*; при возбуждении реле *B* переключает свой контакт *B1* в правое положение. При следующем возбуждении реле *1C* и переходе контакта *1C1* в нижнее положение обмотки *1A* и *2A* оказываются обесточенными, и реле *A* отпадает. Реле *B* продолжает держаться через правое положение контакта *B1* и обмотку *2B*. При втором обесточении реле *1C* и возвращении контакта *1C1* в верхнее положение цепи возбуждения обоих реле оказываются прерванными.

В табл. 1 сопоставлены отдельные фазы работы всех трех реле. Возбужденное состояние реле обозначено знаком плюс, обесточенное — знаком минус.

Таблица 1

| № | Реле <i>1C</i> | Контакт <i>1C1</i> | Замкнутые цепи возбуждения   | Реле     |          |
|---|----------------|--------------------|--|----------|----------|
|   |                |                    |  | <i>A</i> | <i>B</i> |
| 1 | +              | Внизу              | плюс, <i>1C1</i> , <i>B1</i> , <i>1A</i> , минус                     | +        | -        |
| 2 | -              | Наверху            | плюс, <i>1C1</i> , <i>A1</i> , $\langle \frac{2A}{1B} \rangle$ минус | +        | +        |
| 3 | +              | Внизу              | плюс, <i>1C1</i> , <i>B1</i> , <i>2B</i> , минус                     | -        | +        |
| 4 | -              | Наверху            | -  | -        | -        |
| 5 | +              | Внизу              | плюс, <i>1C1</i> , <i>B1</i> , <i>1A</i> , минус                     | +        | -        |
| 6 | -              | Наверху            | плюс, <i>1C1</i> , <i>A1</i> , $\langle \frac{2A}{1B} \rangle$ минус | +        | +        |
| 7 | +              | Внизу              | плюс, <i>1C1</i> , <i>B1</i> , <i>2B</i> , минус                     | -        | +        |
| 8 | -              | Наверху            | -  | -        | -        |

Как видно из таблицы, при двух циклах работы реле *1C* происходит лишь один цикл работы реле *A* и *B*, причем циклы реле *A* и *B* сдвинуты один относительно другого на  $\frac{1}{4}$  цикла, т. е. создается всего 4 различных комбинации состояния реле *A* и *B*. Это обстоятельство используется для создания четырех различных коммутационных состоя-

ний. Для этого служат контакты *A2* реле *A* и контакт *B2* реле *B*. Если проследить положения этих контактов за 2 цикла реле *1C*, то получится порядок переключения положительного полюса по проводам 1, 2, 3 и 4 согласно табл. 2.

Таблица 2

| № | Реле <i>1C</i> | Реле <i>A</i> | Реле <i>B</i> | Контакт <i>A2</i> | Контакт <i>B2</i> | Плюс приключен к проводу № |
|---|----------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | +              | +             | -             | Внизу             | Наверху           | 1                          |
| 2 | -              | +             | +             | "                 | Внизу             | 2                          |
| 3 | +              | -             | +             | Наверху           | "                 | 3                          |
| 4 | -              | -             | -             | "                 | Наверху           | 4                          |
| 1 | +              | +             | -             | Внизу             | "                 | 1                          |
| 2 | -              | +             | +             | "                 | Внизу             | 2                          |
| 3 | +              | -             | +             | Наверху           | "                 | 3                          |
| 4 | -              | -             | -             | "                 | Наверху           | 4                          |

Как видим, периодическое возбуждение реле *1C* ведет в конечном итоге к циклическому переключению плюса по проводам 1, 2, 3 и 4 так, как если бы они были присоединены к четырем пластинам коллектора, по которым скользит присоединенная к плюсу щетка.

Для осуществления коммутационного суммирования со второй полусуммой (реле *2C*) служит аналогичная релейная циклическая схема *B* и *Г*. Контакты *B2* и *Г2* этих реле включены несколько отлично от контактов реле *A* и *B*. Если проследить состояние контактов в порядке работы реле *B* и *Г*, проходящей аналогично работе реле *A* и *B* по табл. 1, то получится переключение свободного конца обмотки суммарного реле *C* к проводам 1, 2, 3 и 4 в следующем порядке:

| Поз. № | Катушка реле <i>C</i> приключена к проводу |
|--------|--|
| 1      | 1-4  |
| 2      | 4-3  |
| 3      | 3-2  |
| 4      | 2-1  |

т. е. переключение здесь происходит навстречу переключению реле *A* и *B*, что полностью соответствует схеме коммутационного суммирования, выполненной на коллекторах со щетками.

Некоторое несущественное отличие в работе релейной схемы от схемы с коллекторами заключается в том, что в последней обе щетки обычно выполняются с охватом дуги порядка  $45^\circ$ . В релейной же схеме плюс подается всегда лишь на один провод, что соответствует точечной щетке, а второй полюс через обмотку реле *C* подается всегда на 2 провода, что соответствует щетке с охватом угла в  $90^\circ$ .

Благодаря тому, что на два цикла реле *1C* происходит лишь один полный цикл переключений контактов *A2* и *B2*, частота срабатываний реле *C* равна не сумме, а полусумме частот срабатывания реле *1C* и *2C*. Это свойство весьма ценно, так как при дальнейшем наращивании пирамиды частота суммарного реле не возрастает, а остается неизменной (при равных слагаемых), так как она

равна средней частоте всех слагаемых, т. е. пропорциональная их сумме<sup>3</sup>.

**Коммутационный преобразователь телеизмерения<sup>4</sup>.** Весьма часто в телемеханике встречается задача преобразования вращения в электрический ток, пропорциональный скорости вращения. Когда вращающийся орган находится в том же месте, в котором требуется преобразованный ток, задача ограничивается преобразованием вращения. Но часто вращающийся орган отдален от места использования, и тогда возможно решить задачу двумя путями: либо преобразованный ток передать на расстояние по существующей линии связи (токовое телеизмерение) либо передать на расстояние скорость вращения (при помощи посылки импульсов — импульсное телеизмерение) и уже на приемной стороне полученную скорость преобразовать в электрический ток. Чаще применяется второе решение, так как оно позволяет, при минимальных требованиях, предъявляемых к каналу связи, передать значение скорости с абсолютной точностью, а также ввиду того, что при наличии преобразователя на месте приема воз-

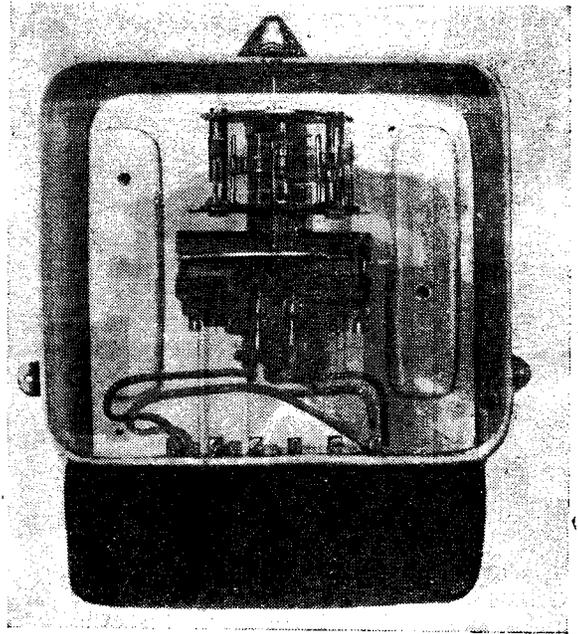


Рис. 11. Фото преобразователя

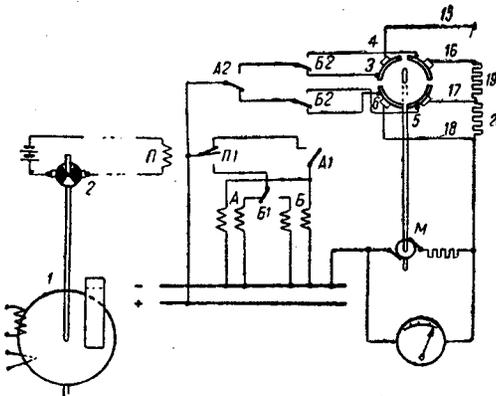


Рис. 10 Преобразователь импульсов (приемник телеизмерения)

можности использования преобразованного тока более многообразны. Однако второй путь ставит к разрешению новую задачу преобразования импульсов в пропорциональное их частоте вращение.

Мы ограничимся описанием схемы преобразователя импульсов, основанной на коммутационном методе.

Схема преобразователя импульсов показана на рис. 10. Счетчик-передатчик 1 снабжен не четырех-

<sup>3</sup> При суммировании нагрузок генераторов каждое слагаемое в схеме коммутационного суммирования означает не один генератор, а один коммутатор. Методом сложения токов или вращающих моментов или скоростей можно на одном коммутаторе получить сумму нескольких генераторов. ЦЛЭМ Мосэнерго суммирует методами сложения моментов или скоростей нагрузки до 4 машин на одном коммутаторе. Таким образом суммирование 8 машин требует лишь двух коммутаторов, и пирамидальная схема еще не нужна.

<sup>4</sup> Используемый в преобразователе моторно-компенсационный принцип применяется и фирмой АЕГ (см. „Изв. эл. пром. сл. тока“ № 10, 1936, стр. 60). Однако сложность конструкции, содержащей специальный импульсный моторчик, сильно ограничивающий частоту переключений, и многопластинчатый коллектор со вделанным в него вращающимся налету ступенчатым сопротивлением резко снижает показатели устройства, в значительной мере обесценивая эффективность компенсационного принципа. Все эти недостатки устраняются введением коммутационного принципа.

пластинчатым коммутатором, а простым прерывателем 2, что дает возможность передавать его скорость вращения в виде частоты импульсов по двухпроводной или равноценной ей искусственной линии. На приемной стороне импульсы поступают в приемное реле П, которое управляет релейной схемой А, Б, тождественной со схемой рис. 9. В результате на выходе из этой схемы получаем циклическое переключение потенциала плюс по проводам 3, 4, 5 и 6. Эти провода подают плюс на отдельные ступени 19, 20 сопротивления, включенного последовательно в цепь магнитоэлектрического моторчика М с торможением токами Фуко по принципу счетчика ампер-часов постоянного тока. Протекающий по обмотке этого мотора ток заставляет его вращаться. Мотор сцеплен с коммутационным дифференциалом. При вращении счетчика 1 потенциал плюс перемещается в направлении усиления тока в цепи мотора М. Вращение же мотора и сцепленного с ним коммутационного дифференциала заставляет потенциал плюс перемещаться в обратном порядке в направлении ослабления тока в якоре мотора. Таким образом в результате совместной работы счетчика 1 и мотора М устанавливается скорость коммутатора, равная скорости прерывателя 2. Ввиду того что по своему принципу действия моторчик М вращается со скоростью, пропорциональной приложенному к его зажимам напряжению, последнее измеренное присоединенным параллельно вольтметром может служить мерой скорости мотора или, что то же, счетчика-передатчика. На два поступающих из линии импульса получается один цикл перемещения потенциала по проводам 3, 4, 5 и 6.

Преобразователь импульсов применяется в качестве приемника телеизмерения по частотно-импульсному методу. Фото преобразователя приведено на рис. 11.

Для правильной работы преобразователя необходимо, чтобы циклическое переключение потен-

циала на входе в коммутатор преобразователя влекло за собой усиление тока в якоре мотора и его ускорение. Если допустим, что по какой-либо причине, например, недостаточного напряжения на источнике питания, мотор не в состоянии развить достаточной скорости, то может получиться, что при положении потенциала плюс на проводе 18 (рис. 10) соответственно максимальному току скорость моторчика все еще будет отставать от скорости циклического переключения, т. е. произойдет следующий шаг циклическости до того, как мотор при помощи коммутационного дифференциала вернет потенциал с позиции 18 на позицию 17. Но следующий по направлению циклическости шаг после позиции 18 — это позиция 15, т. е. разрыв цепи тока вместо его усиления. Очевидно, что если скорость мотора не была достаточной при максимальном токе, то теперь мотор будет отставать больше: мотор выпадает из синхронизма, который существует между вращением коммутационного дифференциала и скоростью циклического переключения при устойчивой работе преобразователя. Состояние устойчивой работы преобразователя согласно этому формулируется следующим образом: в момент наступления шага циклического переключения потенциал на ступенчатом сопротивлении должен быть отдален от ступени максимального тока по меньшей мере на одну ступень.

Выполнение этой предпосылки зависит от быстроты завершения переходного режима моторчиком преобразователя. Конструктивно это достигается введением сильного демпфирования алюминиевого диска якоря в поле постоянных магнитов при малом моменте инерции.

Не представляет практически труда вышеупомянутое условие устойчивой работы преобразователя значительно «перевыполнить», т. е. обеспечить такую быстроту регулирования тока моторчиком, при котором моторчик успевает вернуть потенциал плюс с максимальной ступени на целых две ступени к моменту наступления следующего шага переключения циклическости. Такое свойство преобразователя позволяет, с другой стороны, облегчить условия, предъявляемые к схеме циклическости. Если до сих пор мы предполагали, что циклическое переключение должно происходить размеренно, циклами в 4 шага и обеспечивали это условие применением релейной циклической схемы (рис. 10), то сейчас, имея преобразователь, переводящий потенциал по меньшей мере на 2 шага назад от ступени максимального тока, мы можем допустить удвоенный шаг циклического переключения, например, с провода 1 на провод 3, затем опять двойной шаг, т. е. с провода 3 на провод 1 и т. д. Как видно, четырехпозиционное переключение по проводам 1—2—3—4 заменяется двухпозиционным переключением 1—3—1—3. Отсюда следует, что такой преобразователь не требует и релейной циклической схемы (рис. 10), и может работать от обычного переключающего контакта (рис. 12, а).

Приемник с двухпозиционным переключением обладает крупным преимуществом по сравнению приемником с релейной циклической схемой. Последний собирается из обычных реле телефон-

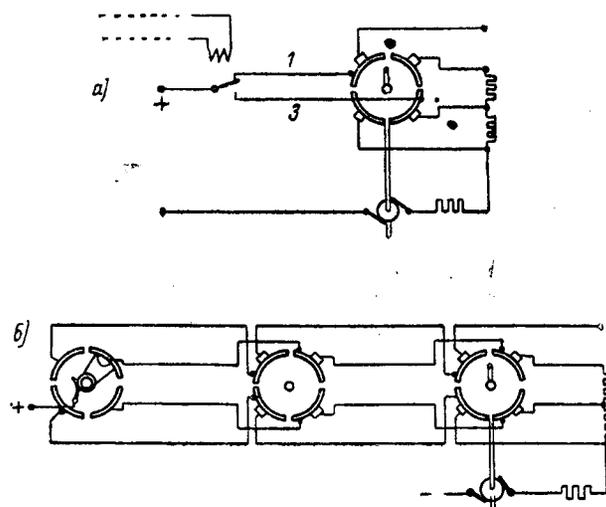


Рис. 12. а — приемник без циклической схемы; б — преобразователь суммы

ного типа. При непрерывном телеизмерении с максимальной частотой в 4—5 импульсов в секунду контакты реле производят в несколько дней миллион переключений. Заводом обычно такая нагрузка реле не гарантируется. Хотя практическая эксплуатация показала бесперебойную работу релейной циклической схемы в течение года и при профилактической регулировке реле через каждые 2—3 мес. нарушений работы телеизмерительной установки можно не опасаться, все же по сравнению с остальными конструктивными узлами устройства релейная циклическая схема представляет наиболее слабое звено. Отсутствие этого звена в схеме а рис. 12 означает весьма существенное повышение надежности работы приемника и сводит уход за ним практически к нулю. Это подтверждается также годовой эксплуатацией такого приемника на диспетчерском пункте Мосэнерго. В схеме телеизмерения остается одно только реле — приемное; минимум того, чего можно ожидать от приемника частотно-импульсного телеизмерения.

Преобразователь, допускающий двойной шаг переключения циклическости, может работать не от одного только передатчика, а от схемы суммирования вращений двух счетчиков-передатчиков, как это показано на схеме б рис. 12. При одновременном повороте каждого из коммутаторов на 90° суммарное переключение циклическости на входе в коммутатор преобразователя не превысит двух шагов.

Скорость вращения преобразователя равна, а напряжение на зажимах его мотора пропорционально сумме скоростей отдельных слагаемых.

**Характеристики преобразователя и его применение.** Основной интерес представляет у частотно-импульсного преобразователя его частотная характеристика, зависимость показаний прибора от частоты импульсов. В данном преобразователе эта характеристика сводится к соотношению между напряжением на зажимах магнито-электрического мотора с демпфированием токами Фуко и скоростью его вращения. Поэтому она представляет собой совершенно прямую линию (рис. 13). Как видно, эта наклонная прямая не проходит че-

начало координат, а отрезает от оси ординат лишнюю положительную часть. Этот отрезок — явление, необходимое для покрытия трения бара. Величина момента трения почти не зависит от скорости вращения, и поэтому соответствующую часть напряжения можно считать постоянной. Это дает возможность учесть ее в показаниях прибора просто смещением стрелки с ее нулевого положения. В остальной шкале прибора получается совершенно равномерной. Смещение елки составляет около 1% от пределов шкалы. Указательный прибор включается параллельно клеммам мотора, т. е. работает измерителем напряжения. Представляет интерес влияние на показания прибора включение дополнительных приборов или других потребляющих ток устройств (сигнальные реле, авторегулирующие устройства т. п.).

Для этого рассмотрим протекание неустановившегося режима при изменении в цепи потребления.

Допустим, что к моменту подключения нового прибора режим был вполне установившийся: скорость мотора соответствовала частоте импульсов, что было достигнуто введением автоматически определенной величины сопротивления в цепь якоря мотора. Ток, проходящий через это сопротивление, разветвляется в якорь мотора и параллельные ему приборы соответственно соотношению их сопротивлений. При подключении нового указательного прибора распределение токов изменится, ток в якорь мотора уменьшится. Это вызовет отставание мотора от частоты цикличности, вследствие чего потенциал на ступенчатом сопротивлении увеличится на величину потребления вновь подключенного прибора, а ток в якорь, равно как и напряжение на его зажимах, будет восстановлен в прежней величине, так как только при этом условии будет восстановлен синхронизм. Следовательно, показания ранее подключенных приборов также останутся без изменений.

Как явствует из самого компенсационного принципа, изменение напряжения питания не может повлиять на правильность показаний. Лишь среднее положение потенциала на ступенчатом сопротивлении сдвинется в ту или иную сторону, чтобы при измененном напряжении поддержать неизменность напряжения на якорь мотора, необходимое для синхронизма с данной скоростью цикличности.

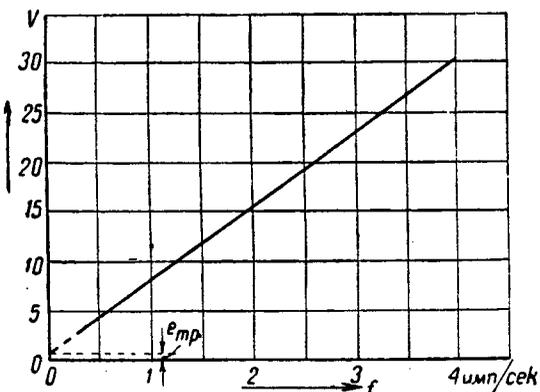


Рис. 13. Частотная характеристика преобразователя

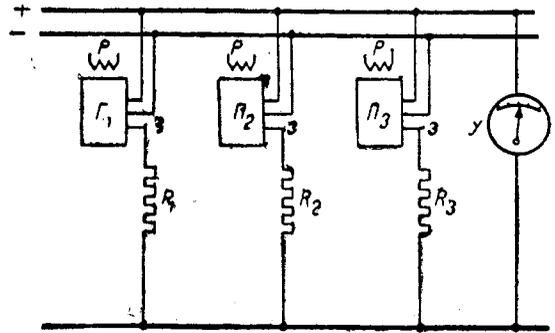


Рис. 14. Суммирование показаний

Изменение температуры аппарата сказывается на изменении поля постоянных магнитов и сопротивлении обмотки и диска якоря.

Изменение поля постоянных магнитов незначительно, около 0,03% на 1°. Практически этими колебаниями можно пренебречь. Изменение температуры диска даст изменение сопротивления, составляющее 4% на 10° (алюминий). Соответственно этому меняются токи Фуко и создаваемый ими тормозящий момент. Следовательно, для неизменной скорости вращения при повышенной температуре потребуется меньший ток в обмотке якоря для создания вращающего момента, равного тормозящему. Однако обмотка якоря (медная проволока) обладает таким же температурным коэффициентом. Температуру диска и обмотки можно считать одинаковой, следовательно, повышается и сопротивление обмотки. В результате уменьшенный ток в обмотке с увеличенным сопротивлением создает неизменное падение напряжения на зажимах, т. е. показания приборов от температуры не зависят.

Как вытекает из нагрузочной характеристики преобразователя, изменение тока, потребляемого подключенными к преобразователю указательными приборами, ни в какой мере не сказывается на величине напряжения на измерительных зажимах. Это свойство можно охарактеризовать определением преобразователя как источника напряжения без внутреннего сопротивления, т. е. без внутреннего падения напряжения, ибо таково его поведение в смысле постоянства напряжения на зажимах при изменении силы тока во внешней цепи. Это его свойство чрезвычайно ценно при суммировании показаний.

Схема суммирования показана на рис. 14. Преобразователи  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  работают под воздействием импульсов, поступающих из линии связи в приемные реле  $P$ .

Каждый из преобразователей создает на своих измерительных зажимах  $z$  напряжение, пропорциональное частоте импульсов. Все преобразователи подключены к указательному прибору  $Y$  параллельно через большие сопротивления  $R$ .

Ток, отдаваемый каждым преобразователем, зависит от напряжения на зажимах  $z$  и от величины сопротивления  $R$ . При номинальном значении измеряемой величины напряжение на зажимах для всех преобразователей одинаково (однотипная аппаратура). Различные номинальные значения, например, генераторы различной номинальной мощности, учитываются различием сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , так что составляющие тока, поступаю-

щие от отдельных ветвей в указанный прибор, имеют одинаковую ценность  $\frac{MA}{MW}$  и могут быть сложены.

Некоторое нарушение правильности суммирования вызывается тем, что сопротивление прибора  $Y$  не бесконечно-мало, и поэтому токи зависят не только от величины  $R$ , но и от величины сопротивления прибора  $r$ .

Это влечет за собой погрешность

$$\Delta = 1 - \frac{1 + \frac{r}{R}}{1 + n \frac{r}{R}}$$

где  $n$  — число слагаемых (номинальные значения слагаемых приняты одинаковыми, следовательно,  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ). Как видно, погрешность в основном определяется чувствительностью указательного прибора — его внутренним сопротивлением  $r$  и потребляемым током, обуславливающим внешние сопротивления  $R$ . Надо отметить, что практически вызываемая этим погрешность не превышает доли процента, так как внешние сопротивления  $R$  заменяет обычно очень большое для вольтметров дополнительное сопротивление, а сопротивление  $r$  — это сопротивление одной только рамки прибора.

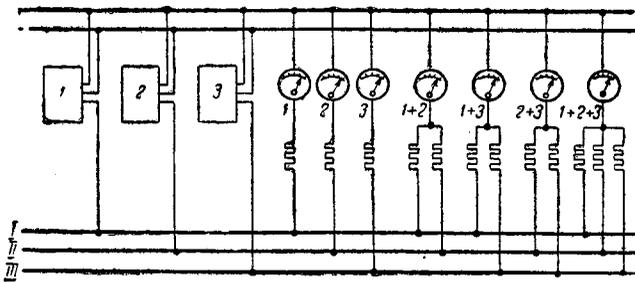


Рис. 15. Получение различных частичных сумм (По Штеблеину)

Описанная схема суммирования путем параллельного соединения преобразователей через большие последовательные сопротивления позволяет получить различные групповые суммы, как показано на рис. 15. Зажимы преобразователей 1, 2, 3 присоединены к нулю и соответственно к шинам I, II, III, на которых они создают соответственное напряжение. Присоединяя к этим шинам приборы через сопротивления, ответвляющие от тех или иных шин ток определенной силы, можно получить все возможные комбинации показаний от индивидуальных до общей суммы. Эта возможность приобретает большое значение на электростанциях, где, например, с электрической точки зрения желательно знать суммарные нагрузки групп генераторов, а руководящим работникам станции и диспетчеру необходима общая суммарная нагрузка.

Все такие комбинации могут быть получены без усложнения устройства при описанном методе суммирования.

**Стабилизация скорости вращения мотора.** Показанная на рис. 12, а схема преобразователя может быть использована для стабилизации скорости вра-

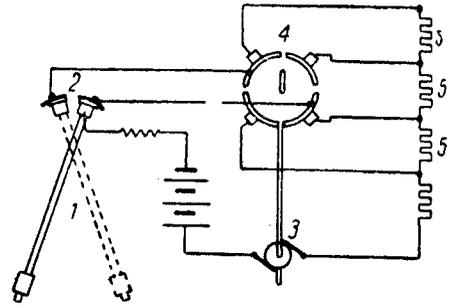


Рис. 16. Стабилизация скорости вращения мотора

щения мотора согласно схеме рис. 16. Вместо приемного реле и его контакта для переключений коммутационной цепи преобразователя применяется маятник 1, приводимый в действие часовым механизмом, снабженный переключающим контактом 2, работающим на якорь преобразователя 3 через коммутационный дифференциал последнего 4 и ступени сопротивления 5. Так как в этом случае частота переключений строго постоянна, то схема рис. 16 обнаруживает следующие отклонения от схемы а рис. 12: 1) схема выполнена без разрыва цепи тока мотора на 1-й ступени, обычно служащей для частоты переключений, близкой к нулю; 2) ступенчатые сопротивления 5 дают при переходе потенциала со ступени на ступень изменение тока в якоре 3 в таком отношении  $k$ , что при прохождении всех трех ступеней влияние на скорость якоря изменения тока в  $k^3$  компенсирует с некоторым запасом эффект возможных колебаний напряжения питания. Так как этими колебаниями исчерпывается весь необходимый диапазон регулирования, то ступени могут быть очень малыми.

Само собой разумеется, что коммутационная цепь может служить для регулирования не обязательно тока якоря, а также, например, тока возбуждения или другой регулирующей цепи, что дает возможность ограничиться слабыми токами в коммутационной цепи.

Контакт 2 переключает очень малые мощности ввиду малого значения  $k$ . В примере рис. 16 он коммутирует цепь с преобладающим омическим сопротивлением, причем действует всегда на увеличение тока (на включение), в то время как уменьшение тока производится коммутатором 4. Контакт 2 постоянно работает, что обеспечивает самоочистку контактной поверхности от загрязнений. Ввиду всех этих условий работы контакт 2 может быть выполнен с весьма малым ходом и малым контактным давлением без ущерба для надежности работы. Благодаря этому механическая нагрузка маятника 1 настолько мала, что нет необходимости прибегать к другим менее или вовсе не нагружающим маятник приспособлениям вроде фотореле и т. п.

Таким образом удастся простыми средствами держать скорость вращения мотора постоянной с очень большой точностью, так как маятник является одним из самых совершенных эталонов времени.

Приведенные примеры показывают, что применением коммутационного метода достигаются бо-

лее простые по сравнению с существующими решения относительно сложных задач.

Особенно ярко выступают преимущества коммутационного метода в приложении к моторно-компенсационному устройству телеизмерения. Аналогичный прибор фирмы АЕГ, выполненный без применения коммутационного метода, обладает значительно худшими эксплуатационными показателями при очень сложной и дорогой конструкции.

Наконец, весьма показательным также исключительно простое разрешение часто встречающейся задачи стабилизации скорости вращения мотора.

Не подлежит сомнению, что и в других областях автоматизации, главным образом в автоматическом регулировании и в измерении по компенсационному принципу, применение этого метода в состоянии дать надлежащий эффект как в смысле принципиальных решений, так и в упрощении конструкций и схем.

Работа над коммутационным методом за последнее время показала, что в нем самом также кроются еще резервы конструктивного и схемного развития, совершенствования и упрощения, что в свою очередь сделает возможным более широкое его внедрение.

## НОВЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

### Метод фиктивной нагрузочной диаграммы<sup>1</sup>

И. В. Стецула

Уральский индустриальный институт им. Кирова

Анализ влияния различных факторов на работу агрегата, состоящего из асинхронного двигателя, маховика и реверсивного прокатного стана, до сих пор производился путем построения ряда кривых, представляющих изменение момента двигателя в функции времени. При изменении любого параметра в этой системе необходимо вновь строить ряд вышеуказанных кривых. Поэтому метод построения кривых моментов двигателя для различных исследуемых вариантов является очень кропотливым, трудоемким. Второй путь — вывод общего аналитического выражения для таких, например, величин, как эквивалентный момент двигателя, также является очень трудоемким, так как общие аналитические выражения в этих случаях являются весьма громоздкими.

Наконец, возможен еще третий путь изучения влияния интересующих нас вопросов на весьма упрощенной диаграмме, состоящей из ряда совершенно одинаковых пропусков и совершенно одинаковых пауз. Понятно, что в этом случае возможно задачу свести к анализу простейшей нагрузочной диаграммы, состоящей из одного пропуска и одной паузы.

Фактически автор прибег к этому методу (в скрытой форме) в прежних своих статьях<sup>2</sup>.

Удобство рассмотрения и простота вычислений при пользовании нагрузочными диаграммами, состоящими из одного пропуска и одной паузы, приводят к мысли замены любой нагрузочной диаграммы стана некоей фиктивной нагрузочной диаграммой, состоящей из ряда одинаковых пропусков и пауз.

**Определения.** Пусть имеется действительная нагрузочная диаграмма стана (рис. 1, а), требуется подобрать такую фиктивную нагрузочную диаграмму рис. 1, б, чтобы эквивалентные моменты стана и двигателя для обеих диаграмм соответственно были бы равны.

Фиктивная нагрузочная диаграмма характеризуется четырьмя величинами: моментом пропуска  $M_f$ , продолжительностью его  $t_f$ , моментом холостого хода  $M_{of}$ , продолжительностью паузы  $t_{of}$ . Приравняем эквивалентные моменты стана для действительной и фиктивной диаграммы:

$$\sqrt{\frac{M_f^2 t_f + M_{of}^2 t_{of}}{t_f + t_{of}}} = \sqrt{\frac{\sum M_n^2 t_n + M_o \sum t_{on}}{\sum t_n + \sum t_{on}}} \quad (1)$$

В уравнении содержатся четыре неизвестных. С математической точки зрения было бы правильным составить еще три уравнения, исходя, например, из равенства эквивалентных моментов двигателя, максимальных моментов двигателя и т. п., и затем совместно их решить. Однако практически этот путь негоден, так как он приводит к громоздким выражениям.

Мы пойдем по другому пути, а именно: зада-

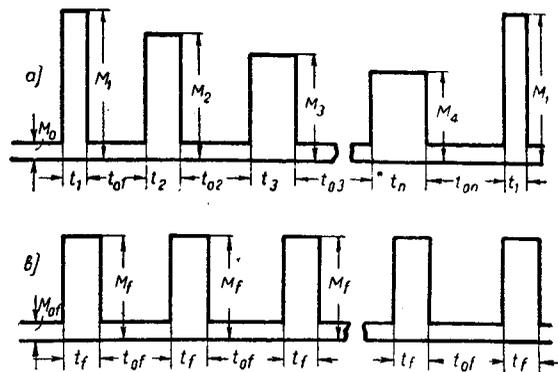


Рис. 1

<sup>1</sup> Краткое извлечение из статьи «Метод фиктивной нагрузочной диаграммы», помещаемой в «Трудах Уральского индустриального института», вып. VI.

<sup>2</sup> «Электричество» № 15–16, 1936 «К теории электропривода многоклетевых станов»; «Вестник электропромышленности» № 19, 1936 «Удельный расход энергии на прокатку при стахановских методах работы».

димся тремя величинами в фиктивной диаграмме и найдем из уравнения четвертую.

Прежде всего трудно ожидать, чтобы момент холостого хода фиктивной диаграммы отличался от того же момента действительной диаграммы; наиболее естественно и просто предположить равенство этих моментов:

$$M_{of} = M_0. \quad (2)$$

Далее нет никаких оснований полагать, что полные циклы фиктивной и действительной диаграммы должны различаться друг от друга.

Наконец, также вполне естественно предположить, что отношение суммы продолжительности пропусков к сумме продолжительностей пауз должно быть одинаковым для обеих нагрузочных диаграмм.

Руководствуясь этими соображениями, можно записать:

$$(t_f + t_{of})n = \Sigma t_n + \Sigma t_{on} \quad (3)$$

и

$$\frac{t_f}{t_{of}} = \frac{\Sigma t_n}{\Sigma t_{on}}, \quad (4)$$

что дает

$$t_f = \frac{\Sigma t_n}{n}; \quad (5)$$

$$t_{of} = \frac{\Sigma t_{on}}{n}. \quad (6)$$

При составлении этих выражений, мы предположим, что число пропусков фиктивной диаграммы равняется числу пропусков действительной диаграммы.

Подставляя (2), (5) и (6) в (1) и решая его относительно  $M_f$ , находим:

$$M_f = \sqrt{\frac{\Sigma M_n^2 t_n}{\Sigma t_n}}. \quad (7)$$

Иначе говоря, момент пропуска фиктивной диаграммы равняется среднему квадратичному из моментов пропусков действительной диаграммы.

Имея фиктивную нагрузочную диаграмму, трудно найти аналитическое выражение для эквивалентного момента двигателя при любой постоянной времени инерции  $T$ .

Известным образом находят моменты двигателя в начале пропуска  $M_1$ , и в конце его  $M_2$ , а именно они равняются:

$$M_1 = \frac{M_0 \left(1 - e^{-\frac{t_{of}}{T}}\right) + M_f e^{-\frac{t_{of}}{T}} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_f + t_{of}}{T}}}; \quad (8)$$

$$M_2 = \frac{M_0 e^{-\frac{t_f}{T}} \left(1 - e^{-\frac{t_{of}}{T}}\right) + M_f \left(1 - e^{-\frac{t_f}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_f + t_{of}}{T}}}. \quad (9)$$

Подставляя эти граничные значения для моментов двигателя в известное выражение для эквивалентного момента двигателя, получаем окончательно:

$$M_{эвк. дв}^2 = \frac{M_f^2 t_f + M_0^2 t_{of}}{t_f + t_{of}} - (M_f - M_0) \frac{T \left(1 - e^{-\frac{t_f}{T}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_{of}}{T}}\right)}{(t_f + t_{of}) \left(1 - e^{-\frac{t_f + t_{of}}{T}}\right)}. \quad (10)$$

Как видим, эквивалентный момент двигателя находится исключительно по данным фиктивной диаграммы, граничные значения моментов  $M_1$  и  $M_2$  в выражение не входят, что, конечно, является большим удобством, так как отпадает необходимость в построении кривых (по точкам или по шаблонам).

Выражение (10) дает эквивалентный момент двигателя, работающего на стан с фиктивной нагрузочной диаграммой. Следует убедиться, что эквивалентный момент двигателя при фиктивной нагрузочной диаграмме будет мало отличаться от такого же при действительной диаграмме.

Расхождение между эквивалентными моментами двигателя при действительной и фиктивной диаграмме. Из выражения (10) видно, что эквивалентный момент двигателя равняется разности между эквивалентным моментом стана и некоторой функцией постоянной времени  $T$ .

При  $T$ , стремящемся к нулю, вычитаемое в формуле (10) также стремится к нулю, и, следовательно, в этом случае эквивалентный момент двигателя становится равным эквивалентному моменту стана.

Но при равенстве эквивалентных моментов станом, работающих по действительной и по фиктивной диаграмме, равны и эквивалентные моменты двигателей. Значит, при очень малых  $T$  эквивалентные моменты двигателя в обоих случаях будут очень близки друг к другу.

При  $T$  очень больших эквивалентные моменты двигателей будут приближаться к средним (не квадратичным) моментам станом. Итак, эквивалентные моменты двигателей будут располагаться где-то между средними моментами стана и эквивалентными моментами стана. Наглядно это может быть записано так:

$$M_{эвк. ст} \xleftarrow{0 \leftarrow T \rightarrow \infty} M_{эвк. дв} \xrightarrow{\quad} M_{ср. ст}.$$

Верхние, на схеме левые границы одинаковы для действительной и фиктивной диаграммы. Остается изучить, насколько и в каких случаях расходятся нижние, на схеме правые границы.

Так как расхождения между средними значениями моментов действительной и фиктивной диаграммы будут зависеть от действительного графика, аналитический метод исследования здесь не может дать результатов.

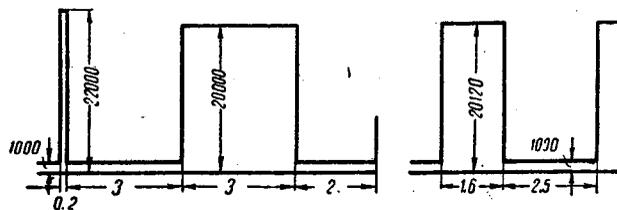


Рис. 2

Приходится прибегнуть к индуктивному методу, т. е. изучить расхождения средних величин моментов для различных заданных диаграмм такого типа, как изображено на рис. 2.

Определение средних моментов для целого ряда таких диаграмм и для соответствующих им фиктивных диаграмм позволяет сделать следующие выводы:

1. Средний момент фиктивной диаграммы всегда больше среднего момента соответствующей действительной.

2. Относительное увеличение продолжительности пауз уменьшает расхождение между соответствующими значениями средних моментов.

3. При моментах пропусков, мало отличающихся по величине, средние моменты действительной и фиктивной диаграммы мало разнятся между собой даже при весьма различных продолжительностях пропусков.

В табл. 1 даны процентные превышения средних значений моментов для различных диаграмм, при наличии пауз продолжительностью по 2 sec с моментом холостого хода, равным 1000 kgm.

Таблица 1

| $M_1$<br>kgm | $M_2$<br>kgm | $t_1 = 2$<br>$t_2 = 0,2$<br>% | $t_1 = 2$<br>$t_2 = 2$<br>% | $t_1 = 0,2$<br>$t_2 = 2$<br>% | $t_1 = 0,2$<br>$t_2 = 3$<br>% |
|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 40 000       | 10 000       | 2,4                           | 12                          | 7,6                           | —                             |
| 30 000       | 10 000       | 1,6                           | 7,8                         | 9,3                           | 8                             |
| 25 000       | 10 000       | 1,5                           | 7,5                         | 6,1                           | —                             |
| 20 000       | 10 000       | 0,8                           | 3,1                         | 2,9                           | —                             |
| 15 000       | 10 000       | 0,52                          | 0,98                        | 0,55                          | —                             |

Для практически встречающихся соотношений моментов, не превосходящих 2,5, превышение среднего значения момента не будет больше чем 7,5%, но средний момент является нижним пределом — границей для эквивалентного момента двигателя. Поэтому при конечных значениях превышение эквивалентного момента двигателя при фиктивной диаграмме не превзойдет больше чем на 3,5—4% такой же момент при действительной диаграмме, что, конечно, вполне допустимо для технических расчетов.

Рамки журнальной статьи не позволяют дать более подробного исследования этого вопроса, и поэтому закончим этот раздел просчетом примера, заимствованного из литературы.

Рассмотрим стан для прокатки цветных металлов<sup>3</sup>, данные нагрузочной диаграммы которого сведены в табл. 2.

Таблица 2

| № пропусков | $M_n$<br>kgm   | $t_n$<br>sec | $M_{on}$<br>kgm   | $t_{on}$<br>sec |
|-------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|
| 1           | 1800           | 0,6          | 50                | 8,4             |
| 2           | 1560           | 0,9          | 50                | 9,0             |
| 3           | 1560           | 1,2          | 50                | 8,7             |
| 4           | 1420           | 2,1          | 50                | 8,4             |
| 5           | 1310           | 3,0          | 50                | 8,1             |
| 6           | 1150           | 4,2          | 50                | 7,8             |
| 7           | 930            | 6,0          | 50                | 21,6            |
|             | $\Sigma t_n =$ | 18,0         | $\Sigma t_{on} =$ | 72,0            |

Согласно выражениям (5), (6) и (7) находим:

$$t_f = \frac{18}{7} = 2,57 \text{ sec};$$

<sup>3</sup> См. „Электричество“ № 20, 1935, Л. Б. Гейлер.

$$t_{of} = \frac{72}{7} = 10,27 \text{ sec}$$

и

$$M_f = 1230 \text{ kgm.}$$

Согласно формуле (10)

$$M_{эв. дв}^2 = 304\,500 - 168\,000 = 136\,500$$

или

$$M_{эв. дв} = 369 \text{ kgm.}$$

В упомянутой статье инж. Гейлер этот же момент определен равным 375 kgm. Таким образом расхождение в  $M_{эв. дв}$ , найденным двумя методами, оказывается всего лишь в 1,6%. Однако это расхождение никоим образом не может быть целиком приписано только неточности метода фиктивной диаграммы; так, в обоих методах результатом получается как разность двух сравнительно близких друг к другу чисел, что, как известно, всегда увеличивает погрешность вычисления.

Применение разложения в ряд Фурье к фиктивной диаграмме. Фиктивная нагрузочная диаграмма является графической интерпретацией какой-то периодической функции. Поэтому целесообразно представить эту функцию в виде ряда Фурье.

Продолжительность одного цикла, равная  $t_f + t_{of}$ , соответствует  $2\pi$ . Отсюда следует:

$$\frac{t_f}{t_f + t_{of}} 2\pi = a; \tag{11}$$

$$\frac{2\pi}{t_f + t_{of}} = \Omega. \tag{12}$$

Периодическая функция, представленная фиктивной диаграммой, не симметрична ни относительно оси абсцисс ни относительно начала координат. Так как к тому же вся кривая лежит выше оси абсцисс, в разложении будут участвовать все члены с косинусами и синусами, а также будет иметься постоянный член разложения:

$$B_0 = M_{cp} = \frac{M_f a + M_{of}(2\pi - a)}{2\pi}. \tag{13}$$

Общее выражение коэффициента при косинусах найдется из:

$$B_k = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^a M_f \cos kx \, dx + \int_a^{2\pi} M_0 \cos kx \, dx \right] = \frac{M_f - M_0}{k\pi} \sin kx. \tag{14}$$

Аналогично для коэффициентов при синусах:

$$A_k = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^a M_f \sin kx \, dx + \int_a^{2\pi} M_0 \sin kx \, dx \right] = \frac{M_f - M_0}{k\pi} (1 - \cos ka). \tag{15}$$

Отсюда определяются коэффициенты типа  $C_k$ :

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} = \frac{M_f - M_0}{k\pi} \sqrt{2(1 - \cos ka)}. \tag{16}$$

Как известно из теории электропривода, синусоидальной нагрузочной диаграмме рабочей ма-

шины соответствует синусоидальная же диаграмма изменений момента на валу электродвигателя (при шунтовой характеристике двигателя), несколько сдвинутая назад и с меньшей амплитудой.

Коэффициент, на который должна быть поделена амплитуда нагрузочной диаграммы рабочей машины, равен:

$$\sqrt{1 + (k\Omega T)^2},$$

поэтому амплитуды синусоид, составляющих нагрузочную диаграмму электродвигателя

$$C_k' = (M_f - M_0) \frac{\sqrt{2}}{k\pi} \sqrt{\frac{1 - \cos k\alpha}{1 + (k\Omega T)^2}}. \quad (17)$$

Аналогично нахождению эффективного значения для несинусоидальных токов найдем эквивалентное, т. е. тоже среднее квадратичное, значение для момента двигателя.

Эффективное значение несинусоидального тока, как известно, равно:

$$I_{эф} = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_1^2}{2} + \frac{I_2^2}{2} + \frac{I_3^2}{2} + \dots},$$

где  $I_0$  — постоянная слагающая;  
 $I_1; I_2; I_3 \dots$  — амплитуды синусоид.

Воспользовавшись этим выражением, применим его для нахождения эквивалентного значения момента двигателя:

$$M_{экс. дв} = \sqrt{B_0 + \frac{C_1^2}{2} + \frac{C_2^2}{2} + \frac{C_3^2}{2} + \dots},$$

что после подстановки дает:

$$M_{экс. дв} = \sqrt{M_{ср}^2 + \left(\frac{M_f - M_0}{k\pi}\right)^2 \left\{ \frac{1 - \cos \alpha}{1 + (\Omega T)^2} + \frac{1 - \cos 2\alpha}{4 + 16(\Omega T)^2} + \frac{1 - \cos 3\alpha}{9 + 81(\Omega T)^2} + \dots + \frac{1 - \cos k\alpha}{k^4 + k^4(\Omega T)^2} \right\}}. \quad (18)$$

Опуская за недостатком места доказательство сходимости ряда под знаком радикала, покажем его применение на примерах.

*Пример 1.*  $M_f = 10\,000$  kgm;  $M_0 = 1\,000$  kgm;  $t_f = 1$  sec;  
 $t_{of} = 4$  sec и  $T = 5$  sec.

В этом случае:

$$\alpha = 72^\circ; \quad \Omega = 1,257; \quad M_{ср} = 2\,800 \text{ kgm}$$

$$7\Omega = 6,28.$$

По выражению (18):

$$M_{экс. дв} = \sqrt{7\,840\,000 + 8\,210\,000 \{0,0171 + 0,0031 + 0,0007 + \dots\}}$$

Как видим, в этом частном случае ряд сходится очень быстро, и эквивалентный момент, вычисленный

|                                  |      |     |
|----------------------------------|------|-----|
| с одним членом разложения, равен | 2825 | kgm |
| » двумя членами                  | 2829 | »   |
| » тремя                          | 2830 | »   |

В данном случае вполне можно удовлетвориться одним членом разложения.

*Пример 2.* Фиктивная диаграмма, полученная для действительной диаграммы, приведенной в цитированной статье инж. Гейлер (табл. 2).

В этом случае:

$$M_{ср} = 286 \text{ kgm}; \quad \alpha = 72^\circ; \quad \Omega = 0,488; \quad \Omega T = 1,142,$$

по выражению (18):

$$M_{экс. дв} = \sqrt{81\,796 + 141\,300 \{0,299 + 0,079 + 0,017 + 0,002 + \dots\}}$$

Удовлетворяясь первыми тремя членами разложения, получаем:

$$M_{экс. дв} = 371 \text{ kgm}.$$

Метод фиктивной диаграммы, как видно было из предыдущего, может применяться не только для анализа влияния различных параметров, но также для очень быстрого и достаточно точного подсчета эквивалентного мо-

мента двигателя. Соединение его с разложением по методу Фурье избавляет подсчеты от иногда очень крупных ошибок (особенно при больших и кратковременных пиках).

В заключение еще раз подчеркиваем, что пользование методом фиктивной диаграммы избавляет от необходимости не только строить экспоненциальные кривые, но даже от определения граничных их значений. Поэтому уменьшается и время, затрачиваемое на подсчет, и сокращаются источники ошибок.

# Как рассчитать кенотронную установку

М. Ф. Пашин  
Москва

В качестве примера рассмотрим схему импульсного генератора. Пусть от выпрямительной установки требуется зарядить его до напряжения

$$U = \sum_{k=0}^{n-1} u_k,$$

т. е. зарядить конденсаторы 0, 1, 2, ... n-1 (рис. 1) соответственно до напряжения  $u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-1}$ . Через заряженный таким образом импульсный генератор с проводимостью  $G_0$  потечет ток

$$i_0 = u_0 G_0.$$

Чтобы кенотронная установка могла компенсировать этот ток утечки, она должна удовлетворять некоторым требованиям. О них будет речь ниже, а пока найдем  $i_0$ .

В предположении  $u_0 = \text{const}$

$$\left. \begin{aligned} u_{k+1} - u_k + r_1 i_k &= 0; \\ i_{k+1} - i_k + G_1 u_k &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $r_1$  — удвоенная величина зарядного сопротивления;  
 $G_1$  — проводимость отдельных конденсаторов;  
 $k$  — порядковый их номер;  
 $u$  — напряжение конденсаторов;  
 $i$  — ток через зарядные сопротивления.

Решение разностных уравнений (1) будет:

$$u_k = \frac{a_1^n a_2^k + a_1^k a_2^n}{a_1^n + a_2^n} u_0;$$

$$i_k = \frac{a_1^n a_2^k - a_1^k a_2^n}{a_1^n + a_2^n} \cdot \frac{u_0 G_1}{\xi},$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 + \xi, \\ a_2 &= 1 - \xi; \\ \xi &= \sqrt{r_1 G_1}, \end{aligned}$$

откуда суммарный ток утечки импульсного генератора

$$i_0 = \frac{a_1^n - a_2^n}{a_1^n + a_2^n} \frac{u_0 G_1}{\xi},$$

и по формуле Эйлера напряжение генератора

$$U = \sum_{k=a}^{b-1} u_k = \int_a^b u_k dk - \frac{1}{2} [u_k]_a^b + \sum_{m=1}^{p-1} A_{2m} [u_k^{(2m-1)}]_a^b + \Theta A_{2p} [u_k^{(2p-1)}]_a^b = \frac{u_0}{a_1^n + a_2^n} \left\{ a_1^n [a_2^k]_a^b \frac{2 - \ln a_2}{2 \ln a_2} + \right.$$

$$\left. + a_2^n [a_1^k]_a^b \frac{2 - \ln a_1}{2 \ln a_1} + \sum_{m=1}^{p-1} A_{2m} (a_1^n [a_2^k]_a^b \ln^{2m-1} a_2 + a_2^n [a_1^k]_a^b \ln^{2m-1} a_1) + \Theta A_{2p} (a_1^n [a_2^k]_a^b \ln^{2p-1} a_2 + a_2^n [a_1^k]_a^b \ln^{2p-1} a_1) \right\},$$

где  $\Theta$  — правильная дробь, а коэффициенты — функции чисел Бернулли вида:

$$A_{2m} = \frac{(-1)^{m-1} B_m}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (2m-1) 2m}.$$

Так,

$$A_2 = \frac{1}{12}; \quad A_4 = -\frac{1}{720}; \quad A_6 = \frac{1}{30 \cdot 240} \text{ и т. д.}$$

Для  $r_1 G_1 \ll 1$ , что обычно имеет место,

$$a_2 \approx \frac{1}{a_1},$$

и в этом случае

$$u_k = \frac{a_1^{n-k} + a_1^{-(n-k)}}{a_1^n + a_1^{-n}} u_0.$$

Но так как при этом

$$\ln a_1 \approx \xi,$$

окончательно получим:

$$u_k = \frac{\epsilon^{(n-k)\xi} + \epsilon^{-(n-k)\xi}}{\epsilon^{n\xi} + \epsilon^{-n\xi}} u_0 = \frac{\text{ch}(n-k)\xi}{\text{ch} n\xi} u_0. \quad (2)$$

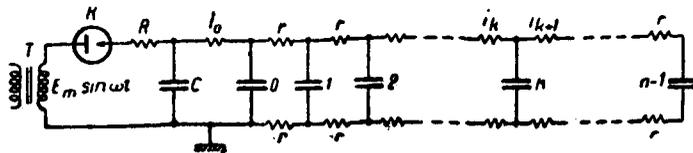


Рис. 1

Аналогичным путем

$$i_k = \frac{\text{sh}(n-k)\xi}{\text{ch} n\xi} \frac{u_0 G_1}{\xi}; \quad (3)$$

$$U = \frac{2 \text{sh} \frac{b-a}{2} \xi \text{ch} \left( n - \frac{b+a}{2} \right) \xi}{\xi \text{ch} n\xi} u_0 \left\{ 1 + \frac{\xi}{2} \text{th} \left( n - \frac{b+a}{2} \right) \xi + \right.$$

$$\left. + \sum_{m=1}^{p-1} A_{2m} \xi^{2m} + \Theta A_{2p} \xi^{2p} \right\}.$$

Так для  $a = 0$  и  $b = n$ :

$$U = \varphi n u_0 \left( 1 + \frac{\xi}{2} \text{th} n \frac{\xi}{2} + \sum_{m=1}^{p-1} A_{2m} \xi^{2m} + \Theta A_{2p} \xi^{2p} \right),$$

где

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{\text{th} n\xi}{n\xi}; \\ \xi &= \sqrt{r_1 G_1}. \end{aligned}$$

Ряд быстро сходится, и с достаточной в данном вопросе точностью можно считать

$$U = \varphi n u_0. \quad (4)$$

Отсюда в зависимости от значения  $n$

$$U \ll \frac{u_0}{\xi}$$

и только при  $\xi = 0$

$$U = n u_0,$$

т. е. как бы ни было велико число элементов импульсного генератора, напряжение его больше  $\frac{u_0}{\xi}$  получить нельзя.

Найденные значения  $u_k$  и  $i_k$ , будучи приближенным решением разностных уравнений (1), являются для граничных условий  $k=0$ ;  $u=u_0$  и  $k=n$ ;  $i=0$  точным решением дифференциальных уравнений

$$\frac{du}{dk} + r_1 i = 0; \quad \frac{di}{dk} + G_1 u = 0.$$

То же относится к напряжению (4) импульсного генератора  $U = \varphi n u_0$ , которое, будучи приближенным значением

$$\sum_{k=0}^{n-1} u_k = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{a_1^n a_2^k + a_1^k a_2^n}{a_1^n + a_2^n} u_0,$$

является точным решением

$$\int_0^n u_k dk = \int_0^n \frac{\operatorname{ch}(n-k)\xi}{\operatorname{ch} n\xi} u_0 dk.$$

Из уравнения (3) суммарный ток утечки

$$i_0 = U G_1 = u_0 G_0; \quad (5)$$

проводимость импульсного генератора

$$G_0 = \varphi n G_1, \quad (6)$$

где попрежнему

$$\varphi = \frac{\operatorname{th} n\xi}{n\xi}, \\ \xi = \sqrt{r_1 G_1}.$$

Кенотронная же установка способна компенсировать ток

$$I = \frac{\omega}{2\pi R} \int_{t_1}^{t_2} (E_m \sin \omega t - u) dt = \frac{u}{\pi R} (\operatorname{tg} \alpha - \alpha), \quad (7)$$

где защитное сопротивление

$$R = \frac{E_m - u}{I_s}; \quad \alpha = \arccos \frac{u}{E_m}; \quad t_1 = \frac{\pi - 2\alpha}{2\omega}; \quad t_2 = \frac{\pi + 2\alpha}{2\omega}$$

и, кроме того,

$u$  — напряжение конденсатора  $C$  (рис. 1);  
 $I_s$  — ток насыщения кенотронной установки;  
 $E_m$  — амплитудное значение напряжения трансформатора.

Падением напряжения на кенотроне при этом пренебрегаем, хотя периодически кенотрон является токонепроводящим, и максимальное напряжение на нем в этих случаях

$$U_k = u + E_m.$$

Для  $E_m \gg u$  предельное значение

$$I = \frac{I_s}{\pi},$$

и необходимое число параллельно включенных кенотронов

$$k \approx \frac{i_0 \pi}{I_s},$$

где  $i_0$  — ток утечки (5),  $I_s$  — ток насыщения кенотрона. Так что, если бы при некоторых заданных значениях  $u$ ,  $E_m$  и  $I_s$  ток  $I$  [формула (7)] оказался ниже тока  $i_0$  (5), необходимо было бы либо увеличить  $E_m$  либо увеличением числа кенотронов  $k$  увеличить  $I_s$ , и наоборот. Искомое  $k$  может быть выражено и в явной форме; так, из (7):

$$I_s = \frac{I \pi (E_m - u)}{u (\operatorname{tg} \alpha - \alpha)}, \quad (8)$$

откуда

$$k \approx \frac{i_0 \pi (E_m - u)}{u I_s (\operatorname{tg} \alpha - \alpha)} \approx \frac{\pi G_0 (E_m - u)}{I_s (\operatorname{tg} \alpha - \alpha)}, \quad (9)$$

где  $G_0$  — проводимость импульсного генератора (6). При этом предполагается, что защитное сопротивление

$$R = \frac{E_m - u}{k I_s}. \quad (10)$$

Если бы  $R$  отсутствовало, мощность, рассеиваемая на аноде кенотрона,

$$P = \frac{\omega I_{s1}}{2\pi} \int_{t_1}^{t_2} (E_m \sin \omega t - u) dt = \frac{u I_{s1}}{\pi} (\operatorname{tg} \beta - \beta), \quad (11)$$

где

$$E_m = \frac{u}{\cos \beta}; \quad \beta = \frac{\pi i}{k I_{s1}}; \quad t_1 = \frac{\pi - 2\beta}{2\omega}; \quad t_2 = \frac{\pi + 2\beta}{2\omega},$$

$u$  — напряжение конденсатора  $C$  (рис. 1);  
 $i$  — ток утечки через все конденсаторы, включая  $C$ ;  
 $I_{s1}$  — ток насыщения кенотрона;  
 $k$  — число кенотронов.

При  $i$ , близком к  $\frac{k I_{s1}}{2}$ , предельное значение

$$P = \frac{E_m I_{s1}}{\pi}.$$

Так что, если бы при некоторых значениях  $i$ ,  $u$ ,  $k$  и  $I_{s1}$  мощность  $P$  оказалась выше допустимой, необходимо было бы увеличить число параллельно включенных кенотронов  $k$ .

В качестве примера примем номинальное напряжение конденсаторов  $u = 70$  kV, амплитудное значение напряжения трансформатора  $E_m = 100$  kV, ток насыщения кенотронной установки  $I_s = 0,4$  А. Тогда защитное сопротивление

$$R = \frac{E_m - u}{I_s} = 75 \cdot 10^3 \Omega;$$

$$\alpha = \arccos \frac{u}{E_m} = 0,25\pi,$$

откуда ток утечки, который может быть скомпенсирован:

$$I = \frac{u}{\pi R} (\operatorname{tg} \alpha - \alpha) = 0,064 \text{ А.}$$

Для второго случая, когда  $R = 0$ , примем  $i = 0,064$  А;  $u = 70$  kV;  $I_{s1} = 0,2$  А и  $k = 2$ , тогда

$$\beta = \frac{\pi i}{k I_{s1}} = 0,16\pi;$$

$$P = \frac{u I_{s1}}{\pi} (\operatorname{tg} \beta - \beta) = 214 \text{ Вт};$$

$$E_m = \frac{u}{\cos \beta} = 80 \text{ kV},$$

т. е. без защитного сопротивления от трансформатора требуется меньшее напряжение.

Заметим, что напряжение импульсного генератора

$$U \approx \varphi n u = \varphi n E_m \cos \frac{u G \pi}{k I_{s1}},$$

иначе говоря, оно является не только функцией напряжения трансформатора, но и функцией накала кенотронов. Зависимость нелинейна в обоих случаях.

Кроме того, выше мы полагали  $u_0 = \text{const}$ . В действительности же при проводимости  $G_0$ , отличной от нуля, оно будет пульсирующим. Таким же будет и напряжение импульсного генератора  $U$ . Например, допустим, что ток утечки  $i_1$  через отдельные проводимости  $G_1$  конденсаторов  $C_1$  генератора сохраняется в течение периода  $T$  постоянным. Тогда напряжение на конденсаторах  $u_1$  за это время упадет на

$$\Delta u_1 = \frac{i_1 T}{C_1} = \frac{u_1 G_1 T}{C_1}$$

или на

$$\frac{\Delta u_1}{u_1} 100 = 2 \frac{G_1}{C_1} \%. \quad (12)$$

Таков же в этом случае процент колебания напряжения и самого генератора. Наличие в кенотронной установке емкости  $C$  с проводимостью  $G$  может понизить эти пульсации лишь при условии, что

$$\frac{G}{C} \ll \frac{G_1}{C_1}.$$

Однако этому неравенству удовлетворить нельзя, если  $C$  составлено из того же типа конденсаторов, что и  $C_1$ .  
 В заключение рассмотрим рис. 2.  
 Пусть требуется иметь через проводимость  $G$  ток  $i$ , или иначе на конденсаторе  $C$  напряжение

$$u = i \cdot G;$$

при этом пульсации их не должны превышать  $a\%$ .  
 Тогда из (12)

$$C = \frac{2G}{a}.$$

Напряжение и мощность трансформатора определяются величинами  $u, i$ . То же касается кенотрона. Требующийся и него ток определяется формулой (8):

$$I_s = \frac{E_m - u}{\text{tg } \alpha - \alpha} \pi G.$$

Если этому требованию удовлетворить нельзя, число кенотронов должно быть принято вместо одного равным согласно (9):

$$k = \frac{\pi G (E_m - u)}{I_{s1} (\text{tg } \alpha - \alpha)}$$

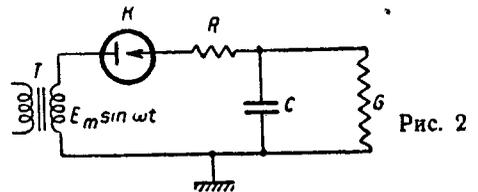


Рис. 2

при условии, что защитное сопротивление

$$R = \frac{E_m - u}{k I_{s1}}.$$

Таков путь расчета кенотронной установки, когда любые две из величин  $i, u$  и  $G$  являются заданными. В тех же случаях, когда при заданном трансформаторе желательно иметь ток  $i$  через проводимость  $G$  возможно бóльший, защитное сопротивление  $R$  должно быть положено равным нулю при условии, что фактическая мощность (11), рассеиваемая на аноде кенотрона

$$P = \frac{u I_{s1}}{\pi} (\text{tg } \beta - \beta),$$

не превзойдет допускаемой, иначе число кенотронов  $k$  соответственно должно возрасти.

## Комплексная погрешность измерительных трансформаторов

М. И. Левин

Московский государственный институт мер и весов

Оценка погрешностей, вносимых в измерения трансформаторами тока и напряжения, количественный анализ схем, в которых имеются подобные трансформаторы, в частности, анализ погрешностей схем, служащих для поверки трансформаторов, значительно упрощаются, если вместо обычно применяемых для характеристики точности трансформаторов понятий погрешности тока, погрешности напряжения, угловой погрешности, ввести понятие комплексной погрешности измерительного трансформатора.

Назовем комплексной погрешностью трансформатора тока выражение

$$\lambda = \frac{k_i \dot{I}_2 - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = f_{ik} + j \delta_{ik}, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  — комплексы первичного и вторичного тока трансформатора;  $k_i$  — его номинальный коэффициент трансформации.

Обозначим  $f_i$  — погрешность тока трансформатора;  $\delta_i$  — его угловую погрешность, выраженную в радианах.

Согласно ОСТ 7656 погрешность тока

$$f_i = \frac{k_i \dot{I}_2 - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} \cdot 100, \quad (2)$$

а под угловой погрешностью понимают угол, на который приведенный вторичный ток опережает первичный. Отсюда следует, что

$$k_i \dot{I}_2 = \dot{I}_1 (1 + f_i) e^{j \delta_i} \quad \left( f_i = \frac{f_i}{100} \right).$$

Подставляя это значение в (1), получим:

$$\lambda = (1 + f_i) e^{j \delta_i} - 1 = f_{ik} + j \delta_{ik}.$$

Разложим  $e^{j \delta_i}$  в ряд и отбросим все члены, кроме первых трех. Нетрудно убедиться, что если даже угловая погрешность трансформатора равна  $1^\circ$ , т. е.  $\delta_i = 60 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} \approx 1,8 \cdot 10^{-2}$ , то отбрасывание членов, содержащих третью и высшие степени,  $\delta_i$  вносит ошибку, не превышающую  $0,001\%$  и  $0,03'$ , что допустимо при самых точных измерениях.

Тогда

$$\lambda = f_{ik} + j \delta_{ik} = f_i - \frac{\delta_i^2}{2} + j (\delta_i + f_i \delta_i),$$

откуда

$$f_{ik} = f_i - \frac{\delta_i^2}{2} \quad \text{и} \quad \delta_{ik} = \delta_i + f_i \delta_i. \quad (3)$$

Пренебрегая третьей степенью погрешностей, легко получить:

$$f_i = f_{ik} + \frac{\delta_{ik}^2}{2} \quad \text{и} \quad \delta_i = \delta_{ik} - f_i \delta_{ik}. \quad (4)$$

В огромном большинстве случаев можно пренебречь и второй степенью погрешностей:

$$f_i = \frac{f_i}{100} = f_{ik} \quad \text{и} \quad \delta_i = \delta_{ik}.$$

Тогда погрешность тока равна действительной части комплексной погрешности, а угловая погрешность — мнимой ее части. Ошибки, вносимые отбрасыванием высших степеней, в каждом отдельном случае легко учесть.

Подобным же образом определяется комплексная погрешность трансформатора напряжения

$$\mu = \frac{k_u \dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = f_{uk} + j \delta_{uk}. \quad (5)$$

Как и выше,

$$f_u = f_{uk} + \frac{\delta_{uk}^2}{2}; \quad \delta_u = \delta_{uk} - f_{uk} \delta_{uk}. \quad (6)$$

Здесь  $f_u \cdot 100 = f'_u$  — погрешность напряжения;  
 $\delta_u$  — угловая погрешность трансформатора напряжения.

**Погрешности, вносимые измерительными трансформаторами.** В качестве примера применения комплексной погрешности подсчитаем погрешности, вносимые измерительными трансформаторами при измерении мощности.

Если однофазные активный и реактивный счетчики включены через измерительные трансформаторы с комплексными погрешностями  $\lambda$  и  $\mu$ , то мощность, учитываемая приборами, может быть выражена комплексом

$$\dot{P}_{2z} = P_{2a} + jP_{2r} = \dot{U}_2 \dot{I}_2 k_i k_u. \quad (7)$$

$P_{2a}$ ,  $P_{2r}$  — показания активного и реактивного ваттметров;

$\dot{U}_2$  — комплекс вторичного напряжения трансформатора напряжения;

$\dot{I}_2$  — комплекс, сопряженный комплексу вторичного тока трансформатора тока;

$k_i$  и  $k_u$  — коэффициенты трансформации.

Мощность, подлежащая измерению:

$$\dot{P}_{1z} = P_{1a} + jP_{1r} = \dot{U}_1 \dot{I}_1.$$

Согласно (1) и (5)

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{k_i} \dot{I}_1 (1 + \lambda); \quad \dot{U}_2 = \frac{1}{k_u} \dot{U}_1 (1 + \mu),$$

и, следовательно,

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{k_i} \dot{I}_1 (1 + \lambda).$$

Подставляя эти значения в (7), получим:

$$\dot{P}_{2z} = \dot{U}_1 \dot{I}_1 (1 + \mu + \lambda + \mu \lambda);$$

откуда

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P} &= P_{2z} - P_{1z} = P_{1z} (\lambda + \mu + \mu \lambda) = \\ &= P_{1a} (f_i + f_u + f_i f_u + \delta_i \delta_u) - P_{1r} (\delta_u - \delta_i + \\ &+ f_i \delta_u - f_u \delta_i) + j [P_{1a} (\delta_u - \delta_i + f_i \delta_u - f_u \delta_i) + \\ &+ P_{1r} (f_i + f_u + f_i f_u + \delta_i \delta_u)] = \Delta P_a + j \Delta P_r. \end{aligned}$$

Нетрудно получить относительные погрешности в процентах, вносимые измерительными трансформаторами в измерение активной и реактивной мощности:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_a}{P_{1a}} \cdot 100 &= \left[ f_i + f_u + f_i f_u + \delta_i \delta_u - \right. \\ &\left. - \frac{P_{1r}}{P_{1a}} (\delta_u - \delta_i + f_i \delta_u - f_u \delta_i) \right] \cdot 100; \\ 100 \cdot \frac{\Delta P_r}{P_{1z}} &= \left[ f_i + f_u + f_i f_u + \delta_i \delta_u + \frac{P_{1a}}{P_{1r}} (\delta_u - \delta_i + \right. \\ &\left. + f_i \delta_u - f_u \delta_i) \right] \cdot 100 \end{aligned}$$

Практически почти всегда можно пренебречь квадратами погрешностей, тогда получаются

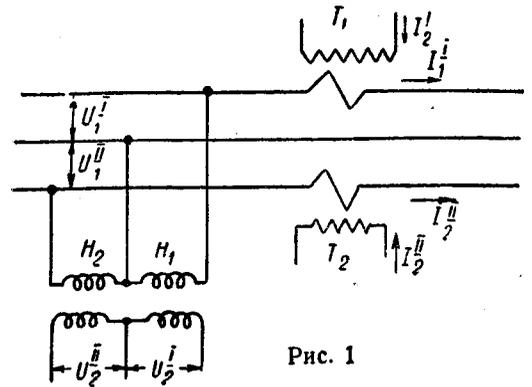


Рис. 1

известные формулы:

$$100 \frac{\Delta P_a}{P_{1a}} = \left[ f_i + f_u - \frac{P_{1r}}{P_{1a}} (\delta_u - \delta_i) \right] 100;$$

$$100 \frac{\Delta P_r}{P_{1r}} = \left[ f_i + f_u + \frac{P_{1a}}{P_{1r}} (\delta_u - \delta_i) \right] 100;$$

При измерении мощности трехфазной системы по схеме Арона (рис. 1) общая мощность может быть выражена комплексом

$$\dot{P}_{1z} = \dot{P}_{1z}^I + \dot{P}_{1z}^{II},$$

где

$$\dot{P}_{1r}^I = P_{1a}^I + j P_{1r}^I = \dot{U}_1^I \dot{I}_1^I;$$

$$\dot{P}_{1z}^{II} = P_{1a}^{II} + j P_{1r}^{II} = \dot{U}_1^{II} \dot{I}_1^{II},$$

а мощность, показываемая приборами,

$$P_{2z} = P_{2z}^I + P_{2z}^{II},$$

где

$$\dot{P}_{2z}^I = P_{2a}^I + j P_{2r}^I = \frac{1}{k_{i1} k_{u1}} \dot{U}_2^I \dot{I}_2^I;$$

$$\dot{P}_{2z}^{II} = P_{2a}^{II} + j P_{2r}^{II} = \frac{1}{k_{i2} k_{u2}} \dot{U}_2^{II} \dot{I}_2^{II};$$

( $k_{i1}$ ,  $k_{i2}$ ,  $k_{u1}$ ,  $k_{u2}$  — коэффициенты трансформации трансформаторов  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ).

Выражая вторичные токи и напряжения через первичные, согласно (1) и (5), легко получить, что

$$\begin{aligned} \Delta P_z &= P_{2z} - P_{1z} = P_{1a}^I (f_{i1} + f_{u1}) + P_{1a}^{II} (f_{i2} + f_{u2}) - \\ &- P_{1r}^I (\delta_{u1} - \delta_{i1}) - P_{1r}^{II} (\delta_{u2} - \delta_{i2}) + j [P_{1a}^I (\delta_{u1} - \delta_{i1}) + \\ &+ P_{1a}^{II} (\delta_{u2} - \delta_{i2}) + P_{1r}^I (f_{u1} + f_{i1}) + P_{1r}^{II} (f_{u2} + f_{i2})] = \\ &= \Delta P_a + j \Delta P_r. \end{aligned}$$

Погрешности при измерении активной и реактивной мощности будут:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_a}{P_{1a}^I + P_{1a}^{II}} \cdot 100 &= \left[ \frac{P_{1a}^I}{P_{1a}^I + P_{1a}^{II}} (f_{i1} + f_{u1}) + \frac{P_{1a}^{II}}{P_{1a}^I + P_{1a}^{II}} (f_{i2} + f_{u2}) - \right. \\ &\left. - \frac{P_{1r}^I}{P_{1a}^I + P_{1a}^{II}} (\delta_{u1} - \delta_{i1}) - \frac{P_{1r}^{II}}{P_{1a}^I + P_{1a}^{II}} (\delta_{u2} - \delta_{i2}) \right] \cdot 100; \\ \frac{\Delta P_r}{P_{1r}^I + P_{1r}^{II}} \cdot 100 &= \left[ \frac{P_{1a}^I}{P_{1r}^I + P_{1r}^{II}} (\delta_{u1} - \delta_{i1}) + \right. \\ &+ \frac{P_{1a}^{II}}{P_{1r}^I + P_{1r}^{II}} (\delta_{u2} - \delta_{i2}) + \frac{P_{1r}^I}{P_{1r}^I + P_{1r}^{II}} (f_{u1} + f_{i1}) + \\ &\left. + \frac{P_{1r}^{II}}{P_{1r}^I + P_{1r}^{II}} (f_{u2} + f_{i2}) \right] \cdot 100. \end{aligned}$$

Если система симметрична или погрешности всех трансформаторов напряжения или тока одинаковы, формулы упрощаются.

**Погрешности при последовательном соединении трансформаторов напряжения.** Рассмотрим, как будут погрешности измерения напряжения, если первичные и вторичные цепи измерительных трансформаторов соединены последовательно. Этот случай имеет место, например, когда трансформаторы напряжения, предназначенные для питания защиты от заземления трехфазной сети с незаземленной нейтралью, используются также для питания параллельных цепей счетчиков. В этом случае первичные обмотки измерительных трансформаторов соединены в звезду, нейтраль которой заземляется.

Вторичные обмотки также соединены в звезду. Измерительный прибор присоединяется к вторичному линейному напряжению (рис. 2). В зависимости от состояния изоляции напряжение отдельных трансформаторов может при неизмен-

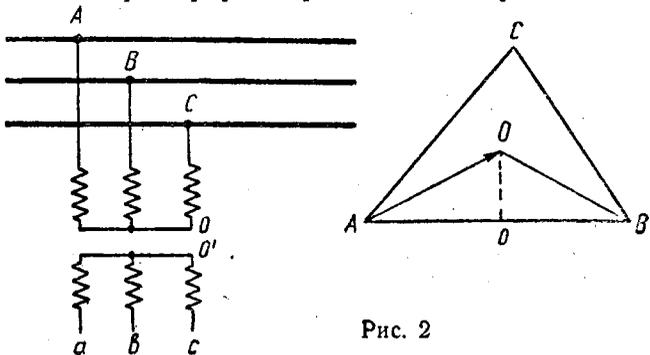


Рис. 2

ном линейном напряжении меняться в широких пределах — от нуля до линейного. Понимая под комплексной погрешностью измерения величину

$$\mu = \frac{k \dot{U}_{ab} - \dot{U}_{AB}}{\dot{U}_{AB}}$$

где  $k$  — номинальный коэффициент трансформации, можно ее представить в виде:

$$\mu = \frac{k(\dot{U}_{aO'} + \dot{U}_{O'b}) - (\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB})}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}}$$

Если комплексные погрешности обозначим  $\mu_A$  и  $\mu_B$ , где

$$\mu_A = f_A + j\delta_C \text{ и } \mu_B = f_B + j\delta_B,$$

то по (5)

$$k \dot{U}_{aO'} = \dot{U}_{AO} (1 + \mu_A) \text{ и } k \dot{U}_{O'b} = \dot{U}_{OB} (1 + \mu_B),$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{(1 + \mu_A) \dot{U}_{AO} + (1 + \mu_B) \dot{U}_{OB} - (\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB})}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{AO}}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}} \mu_A + \frac{\dot{U}_{OB}}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}} \mu_B. \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим отношение проекции вектора  $\dot{U}_{AO}$  на направление вектора  $\dot{U}_{AB}$  к длине  $U_{AB} - \alpha$ ; отношение проекции вектора  $\dot{U}_{OB}$  на направление

вектора  $\dot{U}_{AB}$  к длине  $U_{AB} - \beta$ ; отношение проекций векторов  $\dot{U}_{AO}$  и  $\dot{U}_{OB}$  на направление, опережающее вектор  $\dot{U}_{AB}$  на  $90^\circ$ , к длине  $\dot{U}_{AB} - \gamma$

$$\alpha = \frac{\overline{AD}}{AB}; \beta = \frac{\overline{DB}}{AB}; \gamma = \frac{\overline{D\overline{D}}}{AB}.$$

Нетрудно видеть, что

$$\frac{\dot{U}_{AO}}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}} = \alpha + j\gamma; \frac{\dot{U}_{OB}}{\dot{U}_{AO} + \dot{U}_{OB}} = \beta - j\gamma.$$

Подставляем эти значения в (8):

$$\mu = f + j\delta = (\alpha + j\gamma)(f_A + j\delta_A) + (\beta - j\gamma)(f_B + j\delta_B),$$

откуда, пренебрегая второй степенью погрешностей, получим:

$$\begin{aligned} f &= \alpha f_A + \beta f_B + j(\delta_B - \delta_A); \\ \delta &= \alpha \delta_A + \beta \delta_B - j(f_B - f_A). \end{aligned}$$

**Проверка трансформаторов тока.** В качестве примера применения комплексных погрешностей для оценки точности схемы рассмотрим схему, предложенную Арнольдом<sup>1</sup> и применяемую МГИМВ для проверки точных трансформаторов тока.

Схема Арнольда изображена на рис. 3. Переключатели в схеме позволяют приключать  $r$  и  $C$  параллельно  $R_A$  и  $R_B$ . Образцовые шунты должны быть чисто активными. Отношение номинальных значений их сопротивлений  $\left(\frac{R_{NB}}{R_{NA}}\right)$  должно равняться  $k$  — коэффициенту трансформации испытуемого трансформатора.

При проверке, установив нужное значение первичного тока  $I_1$ , подбором значений  $r$  и  $C$  при надлежащем положении переключателей добиваются отсутствия тока в гальванометре переменного тока  $G$ .

Предположим для общности, что при компенсации параллельно шунту  $R_A$  приключены активное сопротивление  $r_1$  и емкость  $C_1$ , а параллельно шунту  $R_B$  — соответственно  $r_2$  и  $C_2$ .

Обозначив  $Y_A$  и  $Y_B$  — комплексы проводимости образцовых шунтов,  $Y_1$  и  $Y_2$  — комплексы проводимостей цепей, включенных параллельно шунтам  $R_A$  и  $R_B$ , можем написать:

$$\frac{i_2}{Y_B + Y_2} - \frac{i_1}{Y_A + Y_1} = 0,$$

откуда

$$\lambda = \frac{kI_2}{I_1} - 1 = k \frac{Y_B + Y_2}{Y_A + Y_1} - 1. \quad (9)$$

<sup>1</sup> J. I. E. E. № 403, 1930.

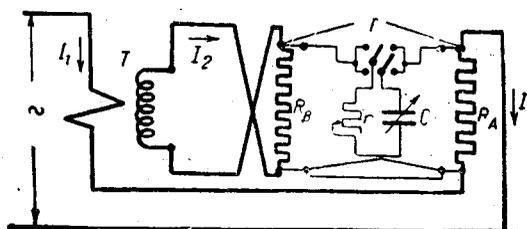


Рис. 3.  $T$  — проверяемый трансформатор;  $R_A$  и  $R_B$  — образцовые шунты;  $r$  — магазин сопротивлений;  $C$  — магазин емкостей

Обозначим  $v_1$  и  $v_2$  — комплексные погрешности образцовых шунтов. Положим

$$v_1 = \frac{\frac{1}{Y_A} - R_{NA}}{R_{NA}} = f_A + j\delta_A$$

$$\text{и } v_2 = \frac{\frac{1}{Y_B} - R_{NB}}{R_{NB}} = f_B + j\delta_B.$$

тогда

$$Y_A = \frac{1}{R_{NA}(1+v_1)} \text{ и } Y_B = \frac{1}{R_{NB}(1+v_2)}.$$

Подставляя эти значения в (9), получим:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{kI_2 - I_1}{I_1} = \frac{kY_B}{Y_A} \frac{1 + \frac{Y_2}{Y_B}}{1 + \frac{Y_1}{Y_A}} - 1 = \\ &= \frac{kR_{NA}}{R_{NB}} \frac{1 + Y_2 R_{NB}(1+v_2)}{1 + Y_1 R_{NA}(1+v_1)} - 1. \end{aligned}$$

Так как  $\frac{kR_{NA}}{R_{NB}} = 1$ , то, пренебрегая вторыми степенями погрешностей, после несложного преобразования получим:

$$\lambda = (v_1 - v_2) + Y_2 R_{NB} - Y_1 R_{NA}. \quad (10)$$

$Y_1$  и  $Y_2$  представляют собой проводимости ветвей, состоящих из параллельно соединенных  $r$  и  $C$ ; полагая, что  $r$  обладает остаточной реактивностью, характеризуемой углом  $\alpha$ , а  $C$  — остаточной активной проводимостью, характеризуемой углами потерь  $\beta$ , можем написать:

$$Y_1 = \frac{1}{r_1} e^{-j\alpha_1} + j\omega C_1 e^{-j\beta_1};$$

$$Y_2 = \frac{1}{r_2} e^{-j\alpha_2} + j\omega C_2 e^{-j\beta_2}.$$

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, и выражения  $Y_1$  и  $Y_2$  можно упростить:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{r} (1 - j\alpha) + j\omega C (1 - j\beta) = \\ &= \left( \frac{1}{r} + \beta\omega C \right) + j \left( \omega C - \frac{\alpha}{r} \right). \end{aligned}$$

Подставляем эти значения в (10):

$$\begin{aligned} \lambda &= (f_A + j\delta_A) - (f_B + j\delta_B) + \frac{R_{NB}}{r_2} (1 - j\alpha_2) + \\ &+ jR_{NB}\omega C_2 (1 - j\beta_2) - \frac{R_{NA}}{r_1} (1 - j\alpha_1) + \\ &+ jR_{NA}\omega C_1 (1 - j\beta_1), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \lambda &= f_A - f_B + \frac{R_{NB}}{r_2} - \frac{R_{NA}}{r_1} + R_{NB}\omega C_2\beta_2 - R_{NA}\omega C_1\beta_1 + \\ &+ j(\delta_A - \delta_B) + \omega C_2 R_{NB} - \omega C_1 R_{NA} - \frac{R_{NB}}{r_2} \alpha_2 + \frac{R_{NA}}{r_1} \alpha_1. \end{aligned}$$

Разделяя действительные и мнимые части, получим выражения для подсчета погрешности тока и угловой погрешности измеряемого трансформатора с учетом погрешностей шунтов и «нечистоты»

$$\begin{aligned} f &= f_A - f_B + \frac{R_{NB}}{r_2} - \frac{R_{NA}}{r_1} + R_{NB}\omega C_2\beta_2 - R_{NA}\omega C_1\beta_1; \\ \delta &= \delta_A - \delta_B + \omega C_2 R_{NB} - \omega C_1 R_{NA} - \frac{R_{NB}}{r_2} \alpha_2 + \frac{R_{NA}}{r_1} \alpha_1. \end{aligned}$$

При наличии точных образцовых шунтов с известными погрешностями и достаточно чувствительного нулевого прибора переменного тока проверка трансформаторов методом Арнольда может быть произведена с точностью до 0,01% и 0,1'—0,2'.

При проверке испытуемый трансформатор нагружен сопротивлением  $R_B$  (в установке МГИМВ  $R_B = 0,4 \Omega$ ). Поэтому для проверки точных трансформаторов при нагрузке, меньшей  $R_B$ , а также для проверки трансформаторов с неразделенными цепями (автотрансформаторов) методом Арнольда в МГИМВ в 1936 г. были разработаны специальные схемы.

В конце 1935 г. в МГИМВ схема Арнольда применялась также для проверки двухступенчатых трансформаторов Брукса, причем уже тогда применение понятий комплексных погрешностей трансформатора и шунта оказалось весьма полезным при выводе необходимых соотношений.

Надо отметить, что понятие комплексной погрешности имеет смысл только при синусоидальных токах и напряжениях. При несинусоидальных токах теряет смысл не только понятие комплексной погрешности, но и понятие угловой погрешности.

Чтобы проверка трансформаторов с точностью 0,01%; 0,3' и выше имела смысл, необходимо быть уверенным в строгой синусоидальности кривых токов или надо определить, что следует понимать под погрешностями измерительных трансформаторов при несинусоидальных токах и проанализировать с точки зрения этих определений методы поверки.

В частности, при наличии в кривой тока высших гармоник, эффективное значение которых достигает 5% эффективного значения основной гармоники, разница в результатах поверки трансформатора одним и тем же методом, но с различными нулевыми приборами — гальванометром переменного тока с настройкой, обладающим большой чувствительностью только к основной частоте, и гальванометром без настройки, чувствительность которого не зависит от частоты (например электродинамический гальванометр, магнитоэлектрический гальванометр с выпрямителем), — может заметно превышать точность измерения.

Понятие комплексной погрешности используется в расчетах высоковольтной лаборатории Московского государственного института мер и весов с конца 1935 г.

В сущности оно ничем не отличается от понятия «погрешности трансформатора в комплексном виде», которое предлагает А. Д. Нестеренко в своей статье, помещенной в «Электричество» № 6, 1937 г. Автор счел все же полезным опубликовать настоящую статью, так как в упомянутой выше статье А. Д. Нестеренко не дает указаний на возможность применения этого понятия.

# Экспериментальное исследование колебаний шин и изоляторов

Б.-С. Д. Солтамов

Ленинград, Лаборатория им. проф. Смурова

В статье изложены некоторые результаты экспериментального исследования колебаний шин и изоляторов, проведенного в лаборатории им. проф. Смурова под руководством проф. Третьяк Г. Т. и проф. Романовского В. Б. 1.

Поведение шинной конструкции под влиянием электродинамических усилий при к. з. в основном определяется двумя факторами — частотой свободных колебаний шин и коэффициентом затуханий механических колебаний шин и изоляторов.

Знание этих двух факторов позволяет рационально использовать цветные металлы при проектировании шинных конструкций распределительного устройства.

Некоторые проектные организации Союза, стремясь избежать резонансных явлений в шинах, считают резонансными частотами свободных колебаний все частоты, кратные 50 Hz, причем учитывают и высшие гармонические колебаний. В противоположность им, другие организации вообще не принимают в расчет частоты свободных колебаний, а рассчитывают шины и изоляторы на ударное значение тока к. з., как при статическом режиме, и полученную таким образом силу умножают на 2.

И тот и другой методы не дают удовлетворительного решения задачи, так как в первом случае подходят излишне осторожно, а во втором — чрезмерно упрощают задачу, беря просто 2-кратный запас сечения шины. Этот запас часто оказывается излишним, а иногда не обеспечивает достаточной прочности шинных конструкций.

Рассматривая промежуточный пролет однополосной многопролетной шины, как балку, заделанную по концам, что близко к действительности, мы можем для определения какой-либо гармоники ее свободных колебаний применить следующую формулу:

$$f_l = \frac{[k_l l]^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJg}{s\gamma}} \text{ [Hz]}, \quad (1)$$

где  $f_l$  — частота колебания  $l$ -й гармоники;

$l$  — длина пролета шин в см;

$E$  — модуль упругости в  $\text{kg/cm}^2$ ;

$J$  — момент инерции сечения шины в  $\text{cm}^4$ ;

$s$  — сечение шины в  $\text{cm}^2$ ;

$g = 981 \text{ cm/sec}^2$ ;

$\gamma$  — удельный вес материала шины в  $\text{kg/cm}^3$ .

$k_l l$  — нечетные корни<sup>2</sup> трансцендентного уравнения частот свободных колебаний

$$\cos kl \cdot \text{ch } kl - 1 = 0, \quad (2)$$

приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Нечетные корни уравнения  $\cos kl \cdot \text{ch } kl - 1 = 0$

| $k_1 l$ | $k_3 l$ | $k_5 l$ | $k_7 l$ |
|---------|---------|---------|---------|
| 4,73    | 10,996  | 17,279  | 23,6    |

Для облегчения подсчетов частот свободных колебаний в табл. 2 дана сводка формул для частот первой гармоники круглых и прямоугольных шин из различных материалов. Частоту колебаний пакета шин, как показывает теория и эксперименты, проведенные нами, можно подсчитывать по формуле:

$$f_n = f_1 C_k, \quad (3)$$

<sup>1</sup> Автор считает необходимым отметить работу инж. Смирнова В. П., давшего решения конструкций приборов и оформление экспериментов.

<sup>2</sup> Как показывает теория, шине свойственны колебания нечетных гармоник, см. инж. Романовский, Высоковольтное аппаратостроение, ОНТИ, 1935.

где  $f_1$  — частота колебания одиночной полосы;

$C_k$  — коэффициент сечения, который берется из рис. 1.

Как будет видно из последующего, частотой, определяемой формулой (3), обладают только те сечения пакета, которые расположены у прокладок, сухарей,  $A, A_1, \dots, A_n$  (рис. 2). Участки же полос между прокладками колеблются как самостоятельные балки, заделанные по концам, длины которых равны расстоянию между прокладками.

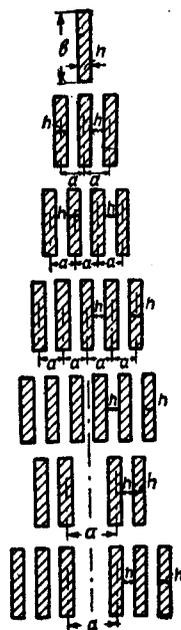


Рис. 1. Частоты колебаний шин из  $n$  полос.

$$f_n = C_n k f_1; \quad f_1 = \frac{101h}{\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\gamma}};$$

$$(C_I = 1; \quad C_{III} = \sqrt{1 + 8 \frac{a^2}{h^2}};$$

$$C_{IV} = \sqrt{1 + 15 \frac{a^2}{h^2}}; \quad C_V = \sqrt{1 + 24 \frac{a^2}{h^2}};$$

$$C_{VI} = \sqrt{1 + 35 \frac{a^2}{h^2}};$$

$$C_{IV(2)} = \sqrt{25 + 3 \frac{a^2}{h^2} + 12 \frac{a}{h}};$$

$$C_{VI} = \sqrt{(80h^2 + 24ah + 3a^2) + 1})$$

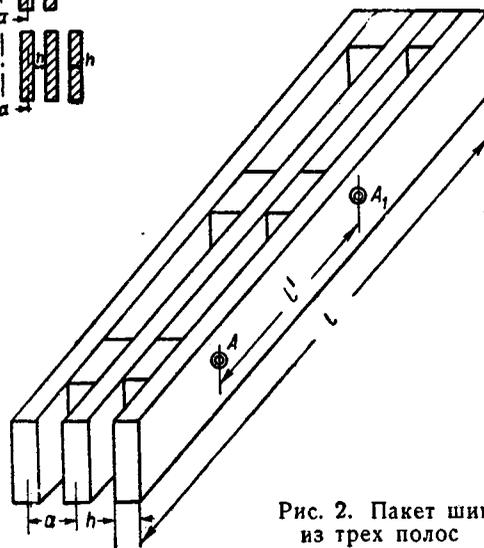


Рис. 2. Пакет шин из трех полос

Таблица 2

Формулы для подсчета частоты 1-й гармоники свободных колебаний круглых и прямоугольных шин  $f_1$  Hz

| Материал шины      | $E$ $\text{kg/cm}^2$ | $\gamma$ $\text{kg/cm}^3$ | Круглое сечение                 | Прямоугольное сечение           |
|--------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Медь . . . . .     | $1 \cdot 10^6$       | $0,9 \cdot 10^{-3}$       | $29,7 \cdot 10^4 \frac{D}{l^2}$ | $34,2 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2}$ |
| Железо . . . . .   | $2 \cdot 10^6$       | $7,8 \cdot 10^{-3}$       | $45 \cdot 10^4 \frac{D}{l^2}$   | $51,7 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2}$ |
| Алюминий . . . . . | $7 \cdot 10^4$       | $2,7 \cdot 10^{-3}$       | $45 \cdot 10^4 \frac{D}{l^2}$   | $51,7 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2}$ |

Экспериментальные данные. На рис. 3 приведены осциллограммы свободных колебаний шин, состоящих из одиночных полос и жестко заделанных по концам. На каждой из осциллограмм имеются две кривые, одна из которых — переменный ток, порождающий вынужденные колебания, а другая дает колебания шины, записанные осциллографом при помощи микрофона.

Последняя кривая, как видно из осциллограммы, резко делится на две части; пока по шине проходит переменный ток, она находится в состоянии вынужденных колебаний с частотой  $f = 100$  Hz. После прекращения тока шина совершает свободные затухающие колебания. Для трех различных шин частоты этих колебаний на рис. 3 равны 25,4 Hz, 37 и 87 Hz.

Сопоставление приведенных осциллограмм с формулами табл. 2 обнаруживает хорошее совпадение теоретических подсчетов с результатами опыта.

Для примера возьмем первую осциллограмму рис. 3.

Данные шины:  $l = 1150$  mm,  $b = 40$  mm,  $h = 10$  mm; материал шины — медь.

По таблице частота

$$f_1 = 34,2 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2} = 34,2 \cdot 10^4 \frac{1}{115^2} = 25,8 \text{ Hz};$$

на осциллограмме

$$f = 25,4 \text{ Hz}.$$

На рис. 4 приведены осциллограммы колебаний пакета шин. Там же указано сечение и схематически изображен пакет. Пакет жестко заделывался по концам, а по длине схватывался закрепами. Микрофоны  $m, m$  устанавливались как на закрепах, так и в пролетах между ними.

На каждой осциллограмме имеются три кривые, одна из которых — синусоида тока промышленной частоты — масштаб времени, а другие две представляют свободные колебания пакета, записанные с помощью микрофонов.

Сделаем небольшие подсчеты к приведенным осциллограммам.

<sup>3</sup> Описание и принципы действия приборов, с помощью которых производилась запись колебаний, см. в статье автора, „Электричество“ № 11, 1935.

Частота одной полосы

$$f_1 = 34,2 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2} = 34,2 \cdot 10^4 \frac{1}{145^2} = 16,3 \text{ Hz}.$$

Коэффициент сечения для трех полос (рис. 1):

$$C_{III} = \sqrt{1 + 8 \frac{a^2}{h^2}} = \sqrt{1 + 8 \frac{3^2}{1}} = 8,54.$$

Частота пакета [формула (3)]

$$f_n = 16,3 \cdot 8,54 = 139 \text{ Hz}.$$

На осциллограммах 1, 2, 3 имеем соответственно частоты — 136, 140, 140 Hz. Микрофоны  $m, m$  прикреплены к закрепам. Таким образом пакет шин в местах закрепок обладает частотой, равной расчетной, вне зависимости от числа закрепок по длине шины.

На рис. 5 а приведены осциллограммы колебания стальной шины сечением  $5 \times 32$  и длиной  $l = 1000$  mm, жестко заделанной по концам.

При пропускании по шине переменного тока шина колебалась. Карандаш, укрепленный в середине шины, воспроизводил запись этих колебаний на бумажной ленте осциллографа.

Приведем вкратце приближенный тематический анализ этого случая, а затем перейдем к физическому его толкованию.

Рассматривая балку (шину), жестко заделанную по концам, как упругую систему с одной степенью свободы, что весьма часто практически допустимо, мы можем вопрос ее колебаний сформулировать в виде следующей задачи.

По двум параллельным полосам шин проходит переменный ток  $i = I_m \sin \omega t$  (рис. 6, а), требуется найти уравнение движения центра тяжести шин.

Эта задача аналогична такому случаю: к концу горизонтальной пружины (рис. 6, б) прикреплен груз массы  $m$  (приведенная масса шины), могущий скользить по гладкой плоскости под влиянием приложенной к нему силы  $r = A \sin^2 \omega t$ , где  $A = a I_m^2$  и  $a$  зависят от длины и расстояния между шинами. Приняв во внимание сопротивление воздуха, требуется найти движение груза. Массой пружины пренебрегаем.

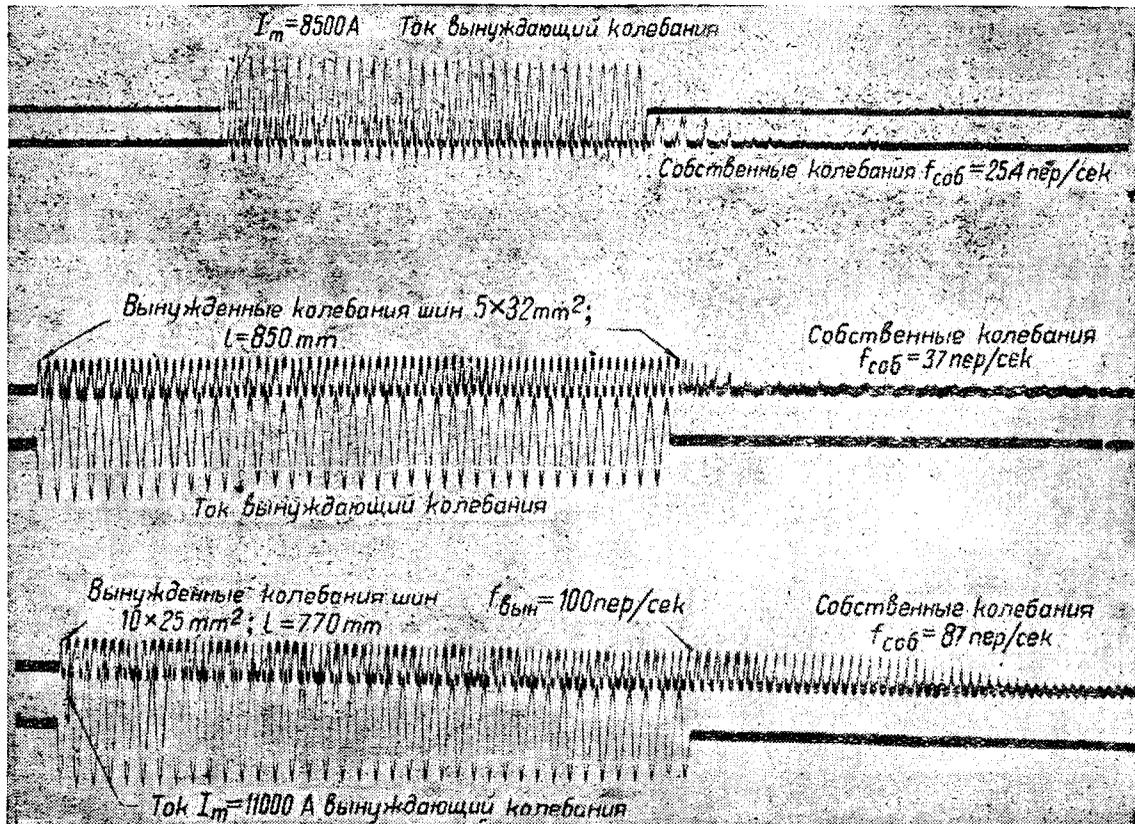


Рис. 3. Осциллограммы колебаний шин

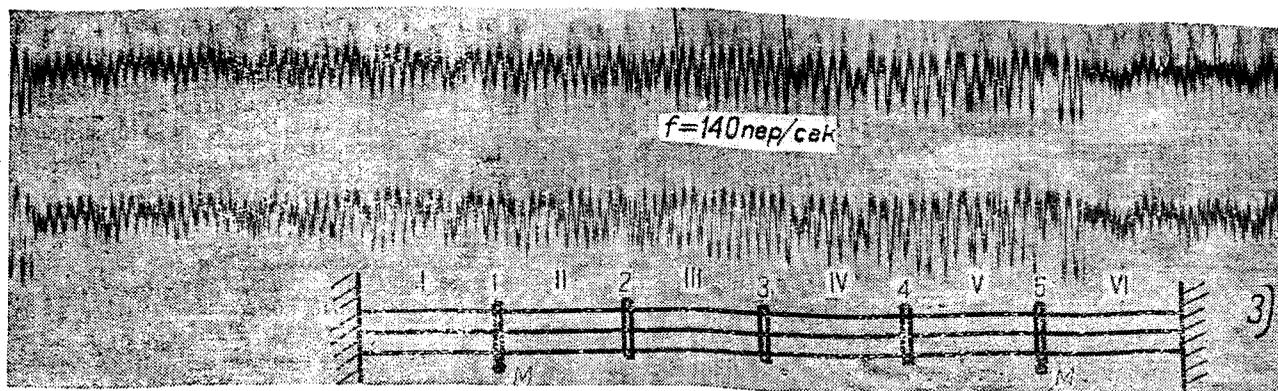
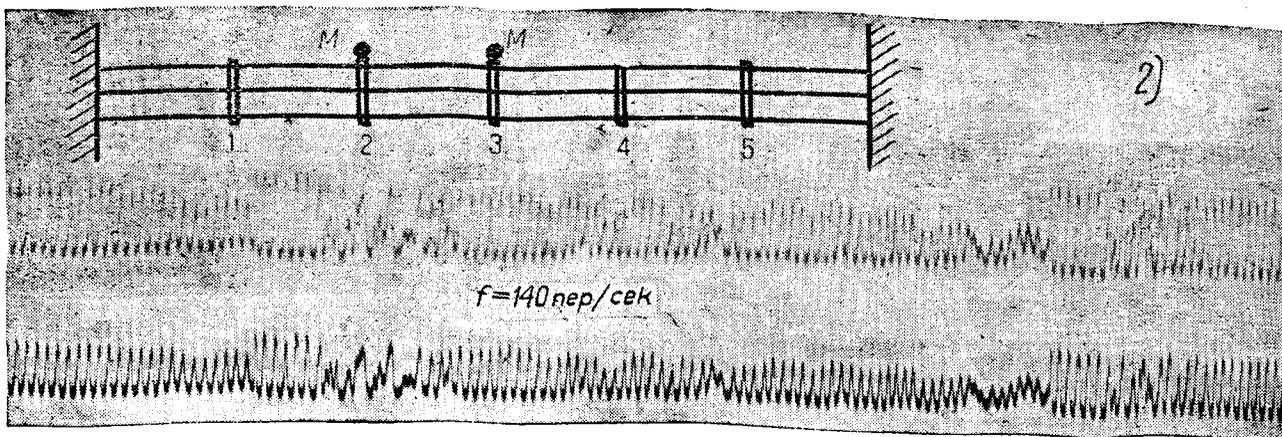
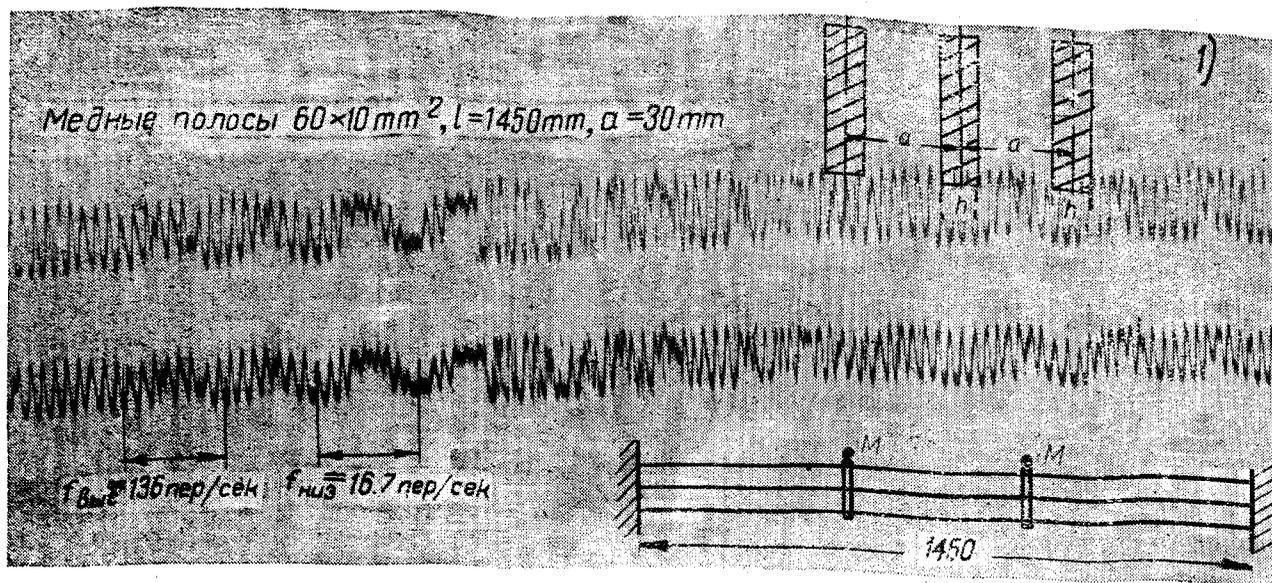


Рис. 4

Будем пользоваться следующими обозначениями:

- $k$  — жесткость пружины (жесткость шины);
- $c = \frac{1}{k}$  — упругость (эластичность) пружины или шины;
- $R$  — коэффициент сопротивления движения груза, зависящий от среды, в которой происходит движение; для шины  $R$  определяется внутримолекулярным трением и сопротивлением воздуха;

$$\gamma = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1}{cm}} \frac{1}{\text{сек}} \text{ — частота свободных колебаний груза (шины) при отсутствии затухания;}$$

$$\beta = \sqrt{\gamma^2 - \alpha^2} \frac{1}{\text{сек}} \text{ — то же при наличии затухания;}$$

$$\alpha = \frac{R}{2m} \frac{1}{\text{сек}} \text{ — коэффициент затухания механических колебаний;}$$

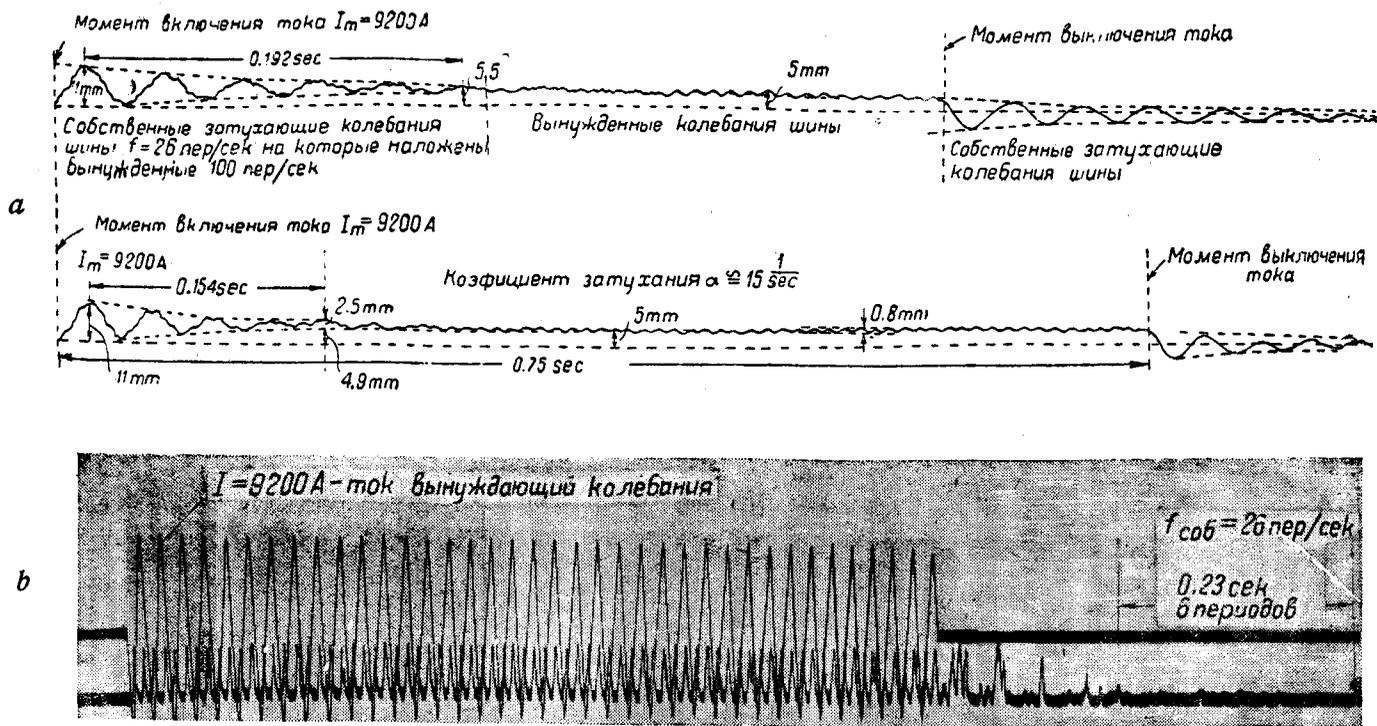


Рис. 5. Стальные прямоугольные шины (сечением  $5 \times 32 \text{ мм}^2$ , длиной  $l = 1000 \text{ мм}$ ; жесткая заделка по концам) а — ондограмма колебаний шин при  $f_{cb} < f_{вын}$ ; б — осциллограммы тока и колебаний шины

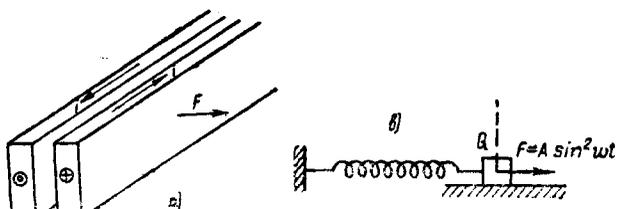


Рис. 6

$$\Theta = \arctg \left[ \frac{\alpha}{\beta} - \frac{2\omega}{\beta} \cdot \frac{N \sin \varphi}{N \cos \varphi - \lambda_{ст}} \right];$$

$$\varphi = \arctg \frac{4\omega\alpha}{4\omega^2 - \gamma^2}.$$

Очевидно, второй член уравнения (5) дает свободные затухающие колебания, а третий — вынужденные. Эти колебания, накладываясь друг на друга, в общем случае, дают синусоиду искаженной формы. Ось симметрии кривой колебания должна располагаться на расстоянии  $\lambda_{ст}$  от недеформированного положения рассматриваемой упругой системы.

Вернемся теперь к ондограмме на рис. 6, а. Колебания ондограммы состоят из свободных колебаний частоты  $f_{cb} = 26 \text{ Hz}$ , большие волны в начале кривой, и вынужденной частоты  $f_{вын} = 100 \text{ Hz}$  — мелкие зазубрины, налагающихся друг на друга. Через некоторое время свободные колебания затухают ( $T_{затух} = 0,192 \text{ сек}$ ).

Колебание происходит около некоторого деформированного положения шины.

$\lambda_{ст} = 5 \text{ мм}$ . После выключения тока деформация шины должна исчезнуть, что на самом деле и происходит. Однако недеформированного состояния шина достигает только после того, как ее свободные колебания, вызванные только что исчезнувшей силой, затухнут. Наглядной иллюстрацией к сказанному служит конец ондограммы.

На основании приведенной ондограммы легко подсчитать величину коэффициента затухания механических колебаний.

Как видно из ондограммы, свободные колебания шины в первом случае затухают в течение 0,192 сек и во втором — за 0,154 сек. Более быстрое затухание во втором случае можно объяснить тем, что шина уже была подогрета током, прошедшим по шине при первом опыте.

Если полагать, что затухание свободных колебаний происходит по экспоненциальному закону

$$y = e^{-at},$$

то, как известно, без большой погрешности время затухания можно принять равным  $3\tau$ .

Тогда для первой ондограммы

$$0,192 = 3\tau_1 = \frac{3}{a_1} \text{ и } a_1 = 15,6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

$\tau = \frac{1}{\alpha}$  — постоянная времени затухания;

$\lambda_{ст}$  — статическая деформация;

$B$  и  $N$  — соответственно, амплитуды свободных и вынужденных колебаний;

$\Theta$  и  $\varphi$  — соответственно, начальные фазы свободных и вынужденных колебаний.

Дифференциальное уравнение движения груза может быть представлено в виде:

$$my'' + Ry' + \frac{1}{c}y = A \sin^2 \omega t = \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \cos 2\omega t. \quad (4)$$

Решение этого уравнения для начальных условий

$$t = 0, y = 0 \text{ и } y' = 0,$$

будет;

$$y = \lambda_{ст} + e^{-at} B \cos(\beta t + \Theta) - N \cos(2\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где:  $\lambda_{ст} = \frac{A}{2} c$  — статическая деформация, обусловленная нагрузкой  $\frac{A}{2}$ ;

$N = \lambda_{ст} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{4\omega^2}{\gamma^2} - 1\right]^2 + 4 \frac{\alpha^2}{\gamma^2} \cdot \frac{4\omega^2}{\gamma^2}}}$  — амплитуда вынужденных колебаний;

$B = [N \cos \varphi - \lambda_{ст}] \sqrt{1 + \left[\frac{\alpha}{\beta} - \frac{2\omega}{\beta} \frac{N \sin \varphi}{N \cos \varphi - \lambda_{ст}}\right]^2}$  — амплитуда свободных колебаний;

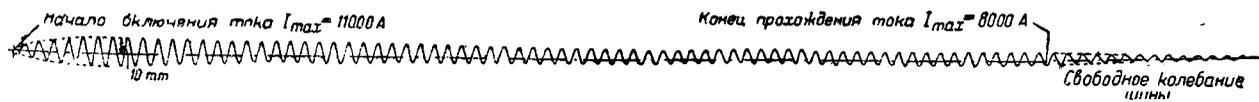


Рис. 7. Ондограмма резонанса основной частоты шины. Шины стальные:  $10 \times 25 \text{ мм}^2$ , длиной  $l = 700 \text{ мм}$  (жесткая заделка по концам, расстояние в свету между шинами  $d = 2,5 \text{ мм}$ ). Частота собственных колебаний равна частоте вынужденных колебаний  $f = 100 \text{ Hz}$

а для второй

$$0,154 = \frac{3}{a_2} \text{ и } a_2 = 19,4 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Вполне понятно, что во втором случае коэффициент затухания получается по величине больше, нежели в первом. Как мы уже говорили, шина была до начала опыта подогрета током предыдущего опыта и она несколько потеряла в своих упругих свойствах.

Можно, таким образом, принять для данной шины в холодном состоянии

$$a \approx 15 \text{ сек.}$$

Найдем амплитуду вынужденных колебаний.

Частота свободных колебаний

$$\gamma = 2\pi f_{св} = 2\pi \cdot 26 \approx 16,3 \frac{1}{\text{сек}},$$

а вынужденных

$$2\omega = 2 \cdot 314 = 628 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Подставляя значения  $\gamma$ ,  $2\omega$  и  $a$  в приведенное выше выражение для амплитуды, найдем:

$$N \approx 0,07 \lambda_{ст}.$$

Вспомним, что вынуждающая сила  $A \sin^2 \omega t$  представляет собой сумму двух членов, из которых  $\frac{A}{2}$  — постоянная, со-

ставляющая второй  $\frac{A}{2} \cos 2\omega t$  — переменная. Величиной  $\lambda_{ст}$

мы называем ту деформацию, которую получила бы шина, если бы она находилась под влиянием только лишь нагрузки  $\frac{A}{2}$ .

Иными словами,  $\lambda_{ст}$  есть та деформация, которую получила бы шина, если бы по ней протекал постоянный ток, эквивалентный эффективному значению переменного тока. В рассматриваемых ондограммах амплитуда вынужденных колебаний  $N = 0,4 \text{ мм}$  (мелкие зазубрины) составляет около 8% от  $\lambda_{ст} = 5 \text{ мм}$ .

Амплитуда свободных колебаний по подсчету получается равной:

$$B \approx 0,935 \lambda_{ст},$$

т. е. она почти равна величине статической деформации.

Несколько слов о физической стороне этого вопроса.

Хорошо известно, что если к упругой системе приложить силу, медленно нарастающую во времени, то свободные колебания не возбуждаются. Величина деформации равна

$$\lambda_{ст} = Qc,$$

где  $c$  — эластичность.

Если же к рассматриваемой системе сила прикладывается мгновенно, то, во-первых, имеет место деформация, равная двойной статической и, во-вторых, возникают свободные затухающие колебания.

Практически сила никогда не бывает приложена мгновенно, но все же деформация часто достигает двойной статической. Больше того, в то время как в одной системе сила вызывает двойную статическую деформацию, в другой системе она может вызвать деформацию, равную почти статической деформации. Возникает вопрос, какую же силу считать практически мгновенно приложенной. Ответ следует искать в соотношении между временем нарастания силы до максимума и периодом свободных колебаний системы.

Если время нарастания силы до своего максимума  $\Delta t$  значительно меньше периода свободных колебаний системы  $T_{св}$ , т. е. если  $\Delta t \ll T_{св}$ , то силу практически можно считать как бы мгновенно приложенной, так как она вызывает деформацию, равную по величине двойной статической. В этом случае мы говорим, что сила обладает динамичностью. Для промежуточных значений  $\Delta t$  деформация будет больше статической, но меньше двойной статической деформации:

$$\lambda_{ст} < \lambda < 2 \lambda_{ст}.$$

Так например, когда  $\lambda = 1,7 \lambda_{ст}$  говорят, что коэффициент динамичности данной силы равен 1,7.

Для непериодической силы коэффициент динамичности

$$1 < k_{дин} \leq 2.$$

На рис. 7 приведена ондограмма колебаний для стальной шины сечением  $10 \times 25 \text{ мм}$  и длиной  $l = 700 \text{ мм}$ . Расстояние между геометрическими осями шин  $d = 2,5 \text{ мм}$ . Амплитуда тока, вынуждающего колебания, —  $I_m = 11000 \text{ А}$ .

Частота свободных колебаний такой стальной шины на основании табл. 2 определяется формулой:

$$f = 51,7 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2} = 51,7 \cdot 10^4 \frac{1}{70^2} = 105 \text{ Hz.}$$

Из ондограммы видно, что частота шины как при прохождении тока по шине, так и при его отсутствии имеет одно и то же значение, следовательно, частота свободных колебаний шины совпадает с частотой вынуждающей силы  $f_{св} = 100 \text{ Hz}$ , т. е. мы имеем случай резонанса.

Далее, амплитуда колебаний устанавливается не мгновенно, а в течение примерно 0,06 сек. Если, как это мы делали при рассмотрении ондограммы 6, принять  $3\tau \approx 0,06 \text{ сек.}$  то постоянная времени  $\tau = 0,02 \text{ сек.}$  что соответствует коэффициенту затухания  $\alpha = \frac{1}{\tau} = 50 \frac{1}{\text{сек}}.$

Интересно заметить, что в предыдущем случае при том же материале  $\alpha = 15 \frac{1}{\text{сек}}.$  С первого взгляда такое расхо-

жение в величине коэффициента затухания для одного и того же материала кажется маловероятным. Однако оно несколько не противоречит истинному положению вещей. В самом деле, коэффициент затухания зависит от  $R$  и  $m$ . Изменение величины коэффициента  $R$  не пропорционально изменению величины массы, и поэтому шины из одинакового материала, но различных длин и сечений, имеют разные коэффициенты затухания.

Отметим, что, несмотря на имевший место резонанс, шина не разрушилась. Это объясняется тем, что степень опасности резонанса резко зависит от коэффициента затухания шин. При значительном затухании амплитуда вынужденных колебаний может иметь весьма незначительную величину.

Как было указано выше, колебание шины складывается из нечетных гармоник.

Резонанс третьей гармоники свободных колебаний был осуществлен нами для медных шин сечением  $10 \times 40 \text{ мм}$ . Шины, будучи жестко заделаны по концам, имели длину  $l = 1360 \text{ мм}$ .

Частота их основной гармоники

$$f_1 = 34,2 \cdot 10^4 \frac{h}{l^2} = 34,2 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{136^2} = 18,6 \text{ Hz,}$$

а третьей — путем пересчета при помощи табл. 1,

$$f_3 = \left( \frac{10,996}{4,73} \right)^2 \cdot 18,6 = 100 \text{ Hz.}$$

Иначе говоря, частота третьей гармоники равна частоте электродинамических усилий.

На рис. 8 приведена ондограмма для рассматриваемого случая.

Частота третьей гармоники в начале процесса ясно вырисовывается на фоне основной частоты. После того как свободные колебания затухают, остаются вынужденные колебания третьей гармоники, которые совершаются около отклоненного положения шины на величину  $\lambda_{ст}$ .

Колебания после прекращения тока (конец ондограммы) подобны колебаниям в начале процесса.

Из сравнения рис. 7 и 8 видно, что в то время как резонанс первой гармоники является крайне нежелательным, резонанс третьей гармоники, повидимому, больших неприятностей за собой не влечет, в особенности, если третья гармоника резонирует при к. з. с высшими гармониками тока.

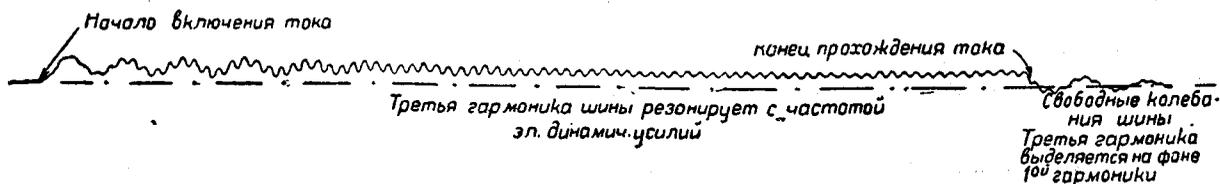


Рис. 8. Ондограмма резонанса третьей гармоники шины. Шины медные, жестко заделанные по концам. Размеры шин  $10 \times 40$  мм<sup>2</sup> длиной  $l = 1360$  мм, расстояние между ними  $d = 25$  мм



Рис. 9. Ондограммы колебаний шин, смонтированных на гибких изоляторах. Система: гибкий изолятор — стальная полоса  $6 \times 55$  мм;  $l = 280$  мм, шина —  $5 \times 32$  мм<sup>2</sup>,  $l = 700$  мм. Частота изолятора  $f_1 = 50$  Hz. Частота шины — 50, общая частота  $f = 23$  Hz

Окончательное слово в этом вопросе остается за дальнейшими экспериментами.

В целом ряде случаев приходится считаться с упругостью изоляторов, на которых смонтированы шины. Теория показывает, что частоты шин, жестко заделанных по концам и смонтированных на упругих изоляторах, различны. Упругость изоляторов, как правило, снижает частоту колебаний шины.

На рис. 9 приведена ондограмма колебаний стальной шины сечением  $5 \times 32$  мм и длиной  $l = 700$  мм. В качестве гиб-

кого изолятора взята стальная полоса сечением  $6 \times 55$  мм и длиной  $l = 280$  мм.

Как видно из ондограммы, при собственной частоте как шины, так и изолятора 50 Hz результирующая частота колебания получилась равной  $f_1 = 23$  Hz.

Практическая ценность проведенных нами опытов по колебаниям шин на гибких изоляторах заключается в выявлении качественной стороны вопроса. Количественные соотношения, имеющие место в применяемых в практике шинных конструкциях, определяются значительно сложнее.

## Вычисление токов короткого замыкания методом двух и трех точек

Б. И. Розенберг и М. В. Костенко  
Ленинград

В руководящих указаниях по вычислению токов к. з., разработанных комиссией, созданной Главэнерго, рекомендованы 3 метода вычисления токов короткого замыкания: 1) метод кривых затухания; 2) метод двух и трех точек; 3) метод спрямленных характеристик.

Первый и третий методы уже были освещены в печати [1, 2].

Метод двух и трех точек был выдвинут Ленинградской комиссией по разработке руководящих указаний для вычисления токов к. з. в результате рассмотрения различных методов, применяемых в мировой практике.

В основу выбора положены соображения о необходимости иметь такой метод, который, давая достаточно правильные результаты, не требовал бы вместе с тем большой затраты труда и был бы настолько универсален, что мог бы удовлетворить весьма разнообразным требованиям, предъявляемым практикой.

При этом учитывалось, что погоня за скрупулезной точностью при вычислении токов к. з. в большинстве случаев лишена смысла, так как ряд факторов, сильно влияющих на величину тока к. з., как-то: поведение нагрузки, качание векторов э. д. с. и т. п., учитывается все равно весьма приблизительно.

Рассматривая под этим углом зрения различные методы, применяемые в мировой практике, можно их разбить на 3 категории:

а) требующие определения прямым расчетом только одной величины (одной точки); к ним принадлежит метод кривых затухания (декрементных кривых);

б) требующие определения прямым расчетом двух или трех величин (двух или трех точек): [3] и [4];

в) методы, где кривая тока к. з. строится по точкам, так называемые многоточечные методы, например, метод переломных э. д. с. [5], спрямленных характеристик и др.

Произведенный анализ всех указанных методов привел к тому заключению, что уточнения, даваемые многоточечными методами по сравнению с методами двух и трех точек,

в свете целого ряда допущений, принимаемых также при пользовании многоточечными методами, в большинстве случаев не столь существенны, чтобы оправдать значительно увеличивающуюся трудоемкость их при необходимости получения всей кривой тока.

Метод кривых затухания, будучи применен без каких-либо добавочных уточнений, может в ряде случаев дать результаты, весьма сильно р-зняющиеся от действительных, введение же добавочных уточнений делает его эквивалентным по трудоемкости методу двух и трех точек при меньших все же точности и универсальности. Помещаемые ниже материалы подтверждают изложенное.

В результате проведенного анализа Ленинградская комиссия посчитала возможным рекомендовать метод кривых затухания только для ориентировочных расчетов.

Для всех остальных случаев комиссия посчитала правильным остановиться на методе, требующем вычисления двух или трех точек, несколько переработав методы, применяемые в мировой практике. При этом необходимо подчеркнуть, что указанный метод, будучи разработан наряду с прочими методами в предположении отсутствия автоматических регуляторов напряжения, в настоящее время р-звит и для тех случаев, когда таковые имеются. Указанное, однако, является предметом изложения отдельной статьи.

Метод двух и трех точек. В основу метода положено допущение о возможности вне зависимости от конфигурации сети, числа и параметров генераторов вразить кривую спадаения периодической составляющей тока к. з. уравнением типа

$$I_{At} = I_{\infty} + (I' - I_{\infty}) e^{-\frac{t}{T_1}} + (I'' - I') e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (1)$$

т. е. так же, как она выражается при наличии простейшей схемы генератор — сопр-тивление — точка к. з.

Однако в случае простейшей схемы значения постоянных времени переходной и сверхпереходной составляющей  $T'$

и  $T''$  определяются равенствами:

$$T' = T_0 \frac{X' + X_{вн}}{X_{\infty} + X_{вн}} \quad \text{и} \quad T'' = T_0'' \frac{X'' + X_{вн}}{X' + X_{вн}},$$

при распространении же приведенного уравнения (1) на сеть любой сложности основной вопрос заключается в подборе таких значений  $T'$  и  $T''$ , чтобы ошибки в результатах не превосходили допустимых пределов.

Помимо того, важно установить возможность дальнейшего упрощения уравнения (1) с тем, чтобы ограничиться определением прямым расчетом только двух экстремальных значений токов (например  $I''$  и  $I_{\infty}$ ), а не всех трех.

Таким образом задача сводится к тому, чтобы охарактеризовать кривую спада периодической составляющей тока к. з. в методе трех точек уравнением

$$I_{At} = I_{\infty} + (I' - I_{\infty}) \sigma'_t + (I'' - I') \sigma''_t \quad (2)$$

и в методе двух точек

$$I_{At} = I_{\infty} + (I'' - I_{\infty}) \sigma_t \quad (3)$$

и соответствующим образом подобрать коэффициенты затухания  $\sigma'_t$ ,  $\sigma''_t$  и  $\sigma_t$  в зависимости от соотношений экстремальных значений токов к. з. и времени.

Как как упрощенные выражения для тока к. з., вообще говоря, не соответствуют той сложной картине, которая имеет место в многократно питаемой сети, необходимо рассмотреть основные факторы, влияющие на характер затухания тока к. з., и установить погрешности, которые могут иметь место в результате упрощенного учета этих факторов.

**Факторы, влияющие на величину тока в месте к. з. Конфигурация сети и взаимного расположения генераторов и точки к. з.** При одних и тех же экстремальных значениях тока к. з. характер затухания тока  $I_{At}$  вообще говоря, зависит от расположения генерирующих источников по отношению к точке к. з. Есть возможность, однако, установить для точки к. з. две предельные схемы, дающие: одна — наиболее медленное затухание тока к. з., вторая — наиболее быстрое затухание его.

Предельными случаями являются, с одной стороны, полная симметрия расположения генераторов по отношению к точке к. з. (наиболее медленное затухание тока), с другой — максимальная асимметрия, получающаяся при параллельной работе генератора с сетью бесконечной мощности и к. з. на зажимах его. В этом случае ток из сети вообще не изменяется, затухание общего тока следует условиям к. з. на зажимах генератора (наиболее быстрое затухание). Какова бы ни была конфигурация сети и взаимное расположение генераторов и точки к. з., кривые затухания тока в месте аварии не могут выйти за пределы изображенных на рис. 1 кривых, построенных для указанных выше предельных случаев.

Определяя ток к. з.  $I_{At}$  из уравнения

$$I_{At} = I_{\infty} + (I'' - I_{\infty}) \alpha_t,$$

считают возможным [3] определять коэффициент  $\alpha_t$  из условия к. з. на зажимах генератора, т. е. по нижней кривой рис. 1. Поэтому во всех случаях, когда к. з. происходит не на зажимах генератора, значения тока получаются преуменьшенными.

Кривые W. Nahn [4], наоборот, исходят из полной симметрии схемы, т. е. дают коэффициенты затухания по верхней кривой. Для уточнения постоянной времени, Nahn, правда, предложил пользоваться эквивалентной постоянной времени, определенной по формуле Ку, однако последняя, как то было показано Н. Н. Щедриным [6], справедлива только для ненагруженных систем, да и то только в предположении, что генераторные ветви образуют лучевую систему, сходящуюся в точке к. з. Формула Ку требует нахождения токораспределения в сети как при переходном, так и при установившемся режимах, что связано с весьма громоздкими вычислениями, и введение такого уточнения практически вряд ли можно считать целесообразным.

Использование же кривых Nahn в упрощенной модификации без определения эквивалентной постоянной времени приводит при всех случаях асимметричного расположения генераторов к преувеличению значений тока к. з.

По предложению одного из авторов настоящей работы инж. Б. И. Розенберга было принято целесообразным для уменьшения возможных ошибок определять коэффициенты

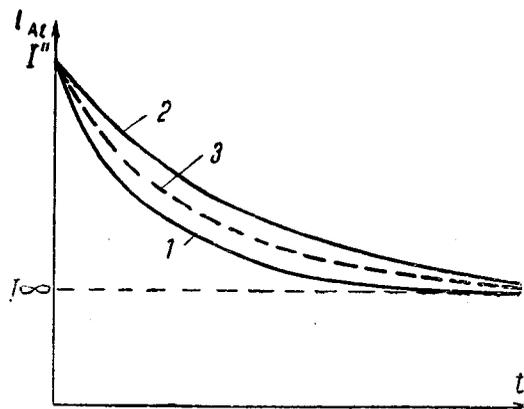


Рис. 1

1 — максимальная асимметрия; 2 — полная симметрия; 3 — средняя кривая

затухания для каждого отношения экстремальных значений токов по средней кривой. Для полностью нагруженных машин погрешность в токе  $I_{At}$  при таком способе определения коэффициентов затухания не превосходит в предельных случаях  $\pm 10\%$  для метода двух точек и  $\pm 8\%$  для метода трех точек, что лежит целиком в пределах точности, с которой обычно определяются значения токов к. з. прямым расчетом. При этом необходимо подчеркнуть, что отказ от кривых, дающих значения тока  $I_{At}$  с запасом, оправдан тем, что при вычислении токов к. з. и так делается ряд допущений в сторону преувеличения: отсутствие дуги в месте к. з., полностью собранная схема, полное возбуждение всех машин, совпадение по фазе э. д. с и т. д. При неполных же возбуждениях, когда диапазон между предельными кривыми несколько расширяется, особенно важно не получать преувеличенных значений токов к. з., так как такие расчеты в большинстве случаев производятся для проверки, будет ли работать при малых токах релейная защита, для определения величины остаточных напряжений и т. п.

Сохранение для неполных возбуждений кривых, построенных при условии полного возбуждения, исключает возможность ошибок в сторону преувеличения, превышающих 8—10%.

Что же касается ошибок в сторону преуменьшения результата, то, доходя до значений 16—18% при половинном возбуждении, они, как видно из предыдущего, создают в большинстве случаев только повышенную надежность.

**Индивидуальные параметры машин.** Значительная часть индивидуальных параметров машин учитывается при вычислении экстремальных значений токов к. з. Единственными параметрами, принимаемыми в качестве средних величин, являются постоянные времени  $T_0$  и  $T_0''$ .

Постоянная времени  $T_0''$  изменяется в узких пределах, и выбор некоторой средней величины приводит к весьма незначительным ошибкам. Постоянная времени  $T_0$  для различного типа машин меняется в более широких пределах. Однако, как показал произведенный анализ, для нормальной серии машин, изготовляемых союзными заводами, погрешности от выбора средних величин  $T_0$  не превосходят даже в худших случаях (исключая машины мощностью до 6000 kW), —7 + 15% для турбогенераторов и —11 + 7% для гидрогенераторов [7, 8].

Так как при этом в реальных, многократно питаемых сетях можно ожидать значительного сглаживания индивидуальных особенностей машин и, следовательно, значительного снижения погрешностей, то, как правило, имеется возможность отказаться от введения каких-либо уточнений, ограничившись принятыми средними значениями.

**Нагрузка и место ее присоединения.** Предельные кривые максимальной и минимальной скорости затухания тока построены в предположении, что нагрузка при переходном и установившемся режиме замещается реактивным шунтом с сопротивлением 1,2, присоединенным к зажимам генератора.

Как показал анализ, местоположение нагрузки, существенно отражаясь на токораспределении, на процесс затухания тока к. з. в месте аварии влияет весьма незначительно. Величина нагрузки жестко связана с возбуждением машины.

Как отмечалось уже выше, наличие неполного возбуждения приводит к некоторому увеличению интервала между предельными кривыми. Однако выбранная средняя кривая достаточно удовлетворяет требованиям практики.

Изложенным исчерпываются основные факторы, влияющие на переходный процесс тока к. з.

В результате произведенного рассмотрения можно видеть, что построение кривых  $I_{At}$  указанным выше методом хотя и не дает полного учета всех факторов, но приводит к весьма незначительным ошибкам. Если при этом учесть целый ряд допущений, которые обычно все равно делаются при вычислении токов к. з. (совпадение по фазе э. д. с., замена нагрузки реактивным шунтом неизменной величины, отсутствие активных сопротивлений, отсутствие дуги в месте к. з., замена действительных коэффициентов трансформации отношением эксплуатационных напряжений и т. п.), то нетрудно видеть, что погрешности в результате построения некоторых средних кривых целиком лежат в пределах точности, с которой вообще на практике определяют величины токов к. з.

Применение метода двух и трех точек для нахождения токораспределения. Проанализировать возможность применения того или иного метода для нахождения токораспределения представляет значительные трудности.

Объясняется это тем, что как бы точен ни был применяемый метод, ошибки в токораспределении, вообще говоря, могут достигать сколь угодно больших величин. Убедиться в этом нетрудно из рассмотрения схемы а рис. 2. Если действительный ток, протекающий по ветви АВ, равен нулю, то как бы ни был мал ток, найденный любым наиболее точным методом, но если он только отличен от нуля, то относительная ошибка равна бесконечности.

При этом токи в ветви АВ, обусловленные качанием векторов э. д. с., могут по абсолютной величине настолько превосходить токи, получаемые без учета этого факта, что без анализа устойчивости параллельной работы нахождение тока в таких ветвях вряд ли вообще представляет практический интерес.

Поэтому оказалось возможным произвести анализ только для несколько более простой схемы б рис. 2. Эта схема, однако, достаточно характерна для того, чтобы выводы, полученные для нее, распространить на сеть и более сложной конфигурации.

Влияние взаимного расположения генератора и точки к. з. Кривые метода двух и трех точек получены как средние между предельными случаями. Поэтому естественно предположить, что погрешности в токораспределении будут стремиться к максимальному, с одной стороны, при приближении к полной симметрии, с другой — при приближении к максимальной асимметрии.

В первом случае, однако, очевидно, что ошибки в токе каждой ветви не будут превосходить ошибок в точке к. з., т. е. 8—10%.

Таким образом анализу необходимо подвергнуть только асимметричные схемы.

Если к. з. происходит не на зажимах генератора, то в реальных сетях оно отделено от зажимов сопротивлением порядка 10%, отнесенным к мощности генератора (повысительный трансформатор или секционный реактор имеют сопротивление обычно порядка 10%), и погрешности не выходят за пределы 12—15%. Анализ, произведенный для схем рис. 3, показывает, что при наличии уже такого сопротивления максимальная ошибка не превосходит +12% для метода трех точек при времени  $t = 2,5$  sec.

Когда к. з. происходит непосредственно на зажимах генератора, то при параллельной работе с сетью бесконечной мощности может иметь место значительно большая ошибка

(до 30%) для генераторной ветви, однако в этом случае очень просто найти значения тока к. з. отдельно от генератора и отдельно от остальной сети. Поэтому в тех редких случаях, когда может понадобиться знание тока в генераторной ветви при к. з. на его зажимах, во избежание указанных ошибок значение тока в каждой из этих двух ветвей следует определять по своим отношениям экстремальных значений, ток же в месте к. з. определять путем суммирования.

Влияние местоположения и величины нагрузки. При сверхпереходном режиме в зависимости от схемы и места к. з. нагрузка может вести себя трояко: 1) подпитывать место к. з.; 2) отсасывать ток от места к. з.; 3) не оказывать никакого действия.

Поведение нагрузки зависит в основном от удаленности ее от места к. з. Принимая во внимание, что как подпитывающее, так и отсасывающее действие нагрузки мало влияют на величину тока в месте к. з., представляется рациональным при вычислении сверхпереходного тока  $I''$  всю нагрузку отсекают. Однако для удаленных от места к. з. ветвей, особенно генераторных, такое упрощение может значительно исказить величину  $I''$ , что при пользовании методом двух точек ( $I''$ ,  $I_{\infty}$ ) потянуло бы за собой и всю кривую тока. Поэтому при желании найти токораспределение в генераторных, а также в удаленных от места к. з. ветвях необходимо пользоваться методом трех точек ( $I''$ ,  $I'$ ,  $I_{\infty}$ ), тогда даже значительная погрешность в величине  $I''$  при  $t \geq 0,25$  sec мало скажется на величине  $I_{At}$ , если известна правильная величина  $I'$ .

Как показал анализ ряда схем типа рис. 2, влияние местоположения и величины нагрузки на процесс затухания тока при найденных с достаточной точностью экстремальных его значениях невелико и направлено обычно в сторону замедления процессов затухания. Поэтому для схем с резко выраженной асимметрией нагрузка частично нивелирует погрешности от асимметрии, а для симметричной схемы, когда можно ожидать наложения погрешностей, они не превосходят 8—10%.

Влияние индивидуальных параметров машины на процесс затухания тока к. з. сравнительно невелико. Наибольшее влияние оказывает  $T_0$ , отличная от  $T_0 = 7$  sec. Если исключить из рассмотрения машины до 6 MVA и случай к. з. на зажимах машины, когда учесть индивидуальное значение  $T_0$  не представляет затруднений, то наибольшее наложение погрешностей от недоучета индивидуальных параметров машин и конфигурации сети получается для машины 7,5 MVA (Т-6-2) в случае схем рис. 3 (15%).

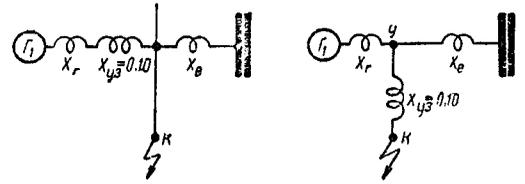


Рис. 3

Исходные параметры и результаты построения кривых. Построение кривых выполнено для типового турбогенератора с нагрузкой, приключенной на его зажимах. Однако кривые метода трех точек, как показано будет ниже, применимы и для гидрогенераторов.

Исходные параметры типового турбогенератора следующие: сверхпереходный реактанс прямой последовательности  $X''_d = 0,12$ ; переходный  $X'_d = 0,20$ ; отношение тока к. з. на зажимах генератора при возбуждении холостого хода к номинальному току  $окз = 0,7$ ; режим работы, предшествующий моменту к. з.  $U_* = 1,0$ ;  $I_* = 1,0$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ ; постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора  $T_0 = 7,0$  sec.

Постоянная времени затухания свободной сверхпереходной составляющей при к. з. на зажимах машины  $T''_d = \frac{1}{8} T'_d$ .

Для метода двух точек это соотношение распространено на к. з. в сети.

Для метода трех точек влияние удаленности места к. з.

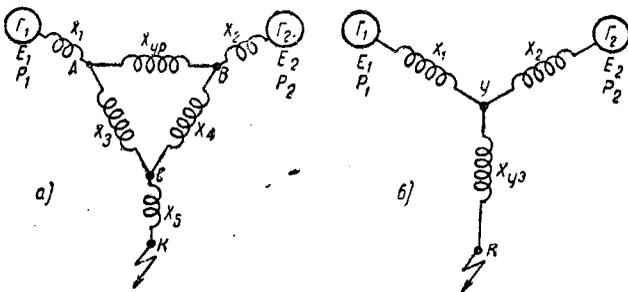


Рис. 2

а — схема с уравнительной ветвью; б — без нее

на  $T$  учтено по формуле:

$$T'' = T_0'' \frac{X_d'' + X_{вн}}{X_d' + X_{вн}}, \quad (4)$$

где  $X_{вн}$  — внешнее сопротивление;  $T_0''$  — постоянная времени затухания сверхпереходной составляющей при  $X_{вн} \rightarrow \infty$ .

Начальные значения э. д. с. сверхпереходного и переходного режимов вычислены по формулам:

$$E_d'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d'')^2} = 1,075; \quad (5)$$

$$E_d' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d')^2} = 1,13. \quad (6)$$

Возбуждение машины, соответствующее моменту к. з., определено из соотношения:

$$I_f = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + \left( U \sin \varphi + I \frac{1,2}{OKЗ} \right)^2} = 2,444. \quad (7)$$

Значение расчетной синхронной э. д. с. установившегося режима вычислено по формуле:

$$E_{d\infty} = 0,8 I_f + 0,2 = 2,16. \quad (8)$$

Синхронный расчетный реактанс установившегося режима определен из соотношения:

$$X_{d\infty} = \frac{E_{d\infty}}{OKЗ \cdot I_f} = 1,26. \quad (9)$$

Относительно параметров нагрузки принято следующее: Реактанс и э. д. с., соответствующие переходному и установившемуся режиму к. з. в соответствии с проектом «Руководящие указания по расчету тока к. з.» [9] приняты

$$X_n = 1,2; E_n = 0.$$

При построении кривых принято на основании изложенного выше, что при сверхпереходном режиме нагрузка отсекается. Для определения же полного ударного тока необходимо к ударному току, полученному по схеме с отсеченной нагрузкой, прибавить ударный ток от нагрузки, подключенной в месте к. з. (с ударным коэффициентом  $p = 1,0$ ).

При нагрузке, сидящей на зажимах генератора, отсечение ее при определении тока  $I''$  приводит к погрешностям  $+7\%$  (при бесконечно удаленной точке к. з.) и  $-5\%$  (при к. з. за внешним сопротивлением в  $8\%$ ).

Постоянные времени вычислены в предположении, что нагрузка приключена к зажимам генератора, что не ведет к большим ошибкам.

При вычислениях типовой турбогенератор объединен с нагрузкой в эквивалентный генератор, что значительно упрощает построение кривых. Параметры эквивалентного генератора при нагрузке, присоединенной к его зажимам, таковы: сверхпереходный режим  $X'' = 0,12$ ;  $E'' = 1,075$ ; переходный —  $X' = 0,171$ ;  $E' = 0,97$ ; установившийся —  $X_{\infty} = 0,615$ ;  $E_{\infty} = 1,055$ ; постоянная времени обмотки возбуждения эквивалентного генератора при разомкнутой обмотке его статора может быть получена следующим путем (рис. 4):

$$\begin{aligned} T' &= T_0 \frac{X_d' + \frac{X_n X_{вн}}{X_n + X_{вн}}}{X_{d\infty} + \frac{X_n X_{вн}}{X_n + X_{вн}}} = \\ &= T_0 \frac{X_d' + X_n}{X_{d\infty} + X_n} \cdot \frac{X_{вн} + \frac{X_d' X_n}{X_d' + X_n}}{X_{вн} + \frac{X_{d\infty} X_n}{X_{d\infty} + X_n}} = \\ &= T_0 \frac{X' + X_{вн}}{X_{\infty} + X_{вн}}, \end{aligned}$$

где

$$T_0 = T_0 \frac{X_d' + X_{н0}}{X_{d\infty} + X_n} = 4,05 \text{ sec}. \quad (10)$$

Результаты построения. Периодическая составляющая тока к. з. в любой момент времени может быть вычислена,

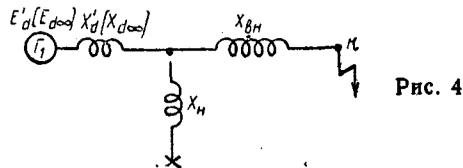


Рис. 4

как указано выше, по формуле (3) — метод двух точек, или (2) — метод трех точек.

Коэффициенты затухания  $\sigma_t$  и  $\sigma_t'$ , входящие в формулы (3) и (2), вычислены для типового турбогенератора как средние арифметические между соответствующими коэффициентами затухания для предельных схем (рис. 5) при совпадающих экстремальных значениях тока. Значения  $\sigma_t$  и  $\sigma_t'$ , полученные в результате этих вычислений, представлены на рис. 6 (метод двух точек) и рис. 7 (метод трех точек).

Хотя кривые построены для трехфазного к. з., но применением метода симметричных составляющих и вычислением по эквивалентной схеме Вагнера и Эванса экстремальных значений тока к. з. нетрудно получить и ток прямой последовательности в любой момент времени для несимметричной аварии. Умножением на соответствующие коэффициенты, зависящие от рода к. з. ( $\sqrt{3}$  при двухполюсном к. з. и 3 при однополюсном) могут быть получены значения полных токов.

Коэффициенты затухания сверхпереходных составляющих в методе трех точек ( $\sigma_t''$ ) были построены, исходя из соотношения (8), тем же путем, что и  $\sigma_t'$ , однако, как видно из рис. 8, большая сходимость кривых позволяет без большой погрешности считать  $\sigma_t''$  не зависящим от места к. з. Поэтому здесь мы приводим также таблицу для коэффициентов  $\sigma_t''$ , соответствующих средней удаленности места к. з.

Благодаря возможным отличиям параметров индивидуальных генераторов от принятых для типового генератора, а также при неполном возбуждении и наличии синхронных моторов кратность затухания может превосходить таковую для к. з. на зажимах типового генератора ( $\beta'' = 5,22$ ;  $\beta' = 3,3$ ). Однако в этих случаях представляется возможным принять закон затухания тока к. з. для предельных отношений  $\beta'' = 5,22$  и  $\beta' = 3,3$ .

Типовой гидрогенератор. В качестве типовых параметров гидрогенератора приняты следующие: переходный реактанс прямой последовательности  $X_d' = 0,3$ ; синхронный (не насы-

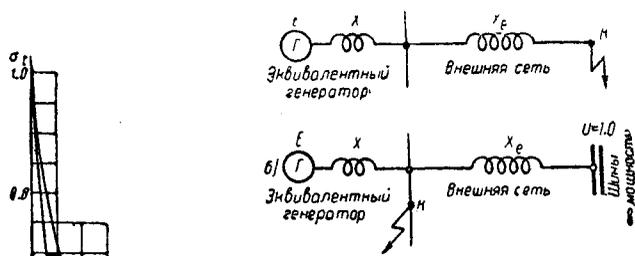


Рис. 5

а — полная симметрия схемы; б — максимальная асимметрия

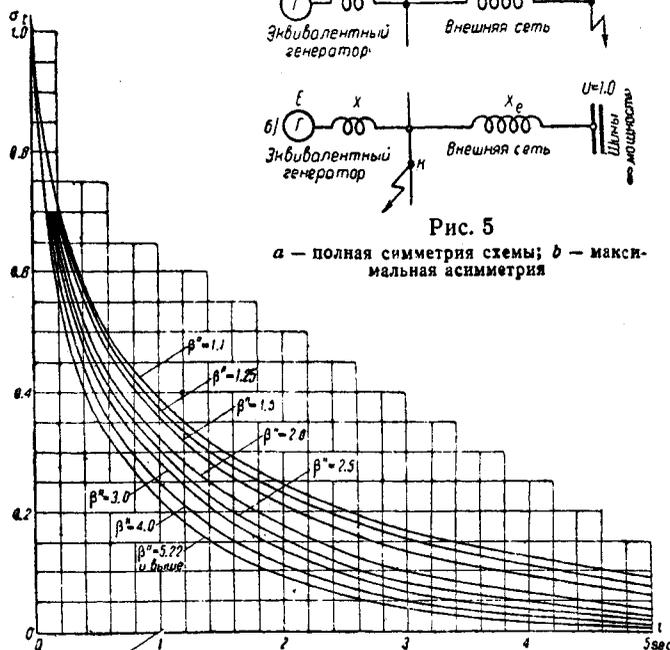


Рис. 6. Метод двух точек ( $I''$ ;  $I_{\infty}$ ). Кривые затухания коэффициентов  $\sigma_t$  периодической составляющей тока к. з.

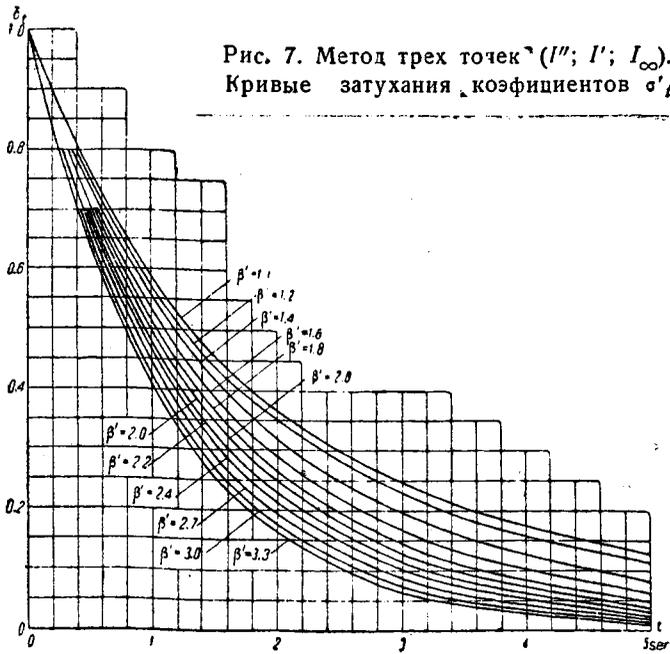


Рис. 7. Метод трех точек ( $I''$ ;  $I'$ ;  $I_\infty$ ). Кривые затухания коэффициентов  $\sigma'_t$

что за параметр для коэффициентов затухания  $\sigma'_t$  принято  $\beta' = \frac{I'}{I_\infty}$ , упомянутые отличия настолько взаимно компенсируются, что кривые  $\sigma'_t$  для турбо- и гидрогенераторов практически совпадают (при условии совпадения экстремальных значений  $I'$  и  $I_\infty$ ). Поэтому расчет тока к. з. для гидрогенератора без демпферной обмотки следует вести по методу трех точек, положив  $I'' = I'$ . Для систем, состоящих из турбо- и гидрогенераторов, а также в случае наличия демпферной обмотки или эквивалентного ему устройства у гидрогенераторов расчет можно вести без каких-либо дополнительных допущений или перестроений по методу трех точек, пользуясь для определения  $I_{d1}$  формулой (2) и рис. 7.

**Генераторы с иной постоянной времени  $T_0$**  Приведенные кривые соответствуют постоянным времени  $T_0 \approx 7$  sec для систем, питаемых турбогенераторами; 5— для систем, питаемых гидрогенераторами, и  $\approx 6$  sec для смешанных систем с турбо- и гидрогенераторами.

В случае, если эквивалентная постоянная времени машин расчетной схемы или при к. з. на зажимах машины  $T_0$  этой машины резко отличается от принятой при построении кривых  $T_0$ , для уточнения можно применить метод приведенных времен, заключающийся в следующем:  $\sigma'_t$  и  $\sigma_t$ , входящие в формулы (3) и (2), определяются из кривых рис. 6 и 7 при времени

$$t_{расч} = t \frac{T_0}{T_{он}}$$

где  $t$  — время, для которого вычисляется ток к. з.;  $T_0$  — постоянная времени, принятая при построении кривых;  $T_{он}$  — фактическая постоянная времени.

**Применение метода двух и трех точек.** Метод двух и трех точек может быть применен в проектных условиях для: 1) выбора схемы коммутации электрических систем и отдельных электрических установок; 2) выбора основной коммутационной аппаратуры, как-то: масляных выключателей, разъединителей, реакторов, трансформаторов тока и пр., а также сечения кабелей и шин; 3) расчета заземляющих устройств; 4) выбора релейной защиты как в отношении типа реле, так и пределов регулировки с ориентировочной оценкой того, на какие токи и напряжения должна быть защита настроена; 5) определения величины остаточных напряжений; 6) определения влияния на линии слабого тока.

В эксплуатационных условиях этот метод может быть применен для проверки: 1) временных эксплуатационных схем; 2) временно устанавливаемой аппаратуры; 3) для предварительного анализа аварий (выяснения причин повреждений оборудования и пр.).

Необходимо отметить, что для всех тех случаев, когда требуется определять ток к. з. в месте к. з. или в ближайших к этому месту ветвях, вполне пригоден метод двух точек. Метод трех точек должен применяться лишь тогда, когда имеются смешанные системы, содержащие и турбо- и гидрогенераторы, а также при необходимости находить токораспределение в отдаленных и генераторных ветвях.

Метод двух и трех точек обладает недостаточной точностью и потому не может быть рекомендован для: 1) окончательной фиксации токов и напряжений, при которых должны трогаться реле в сложных системах; 2) детального анализа аварий в тех случаях, когда есть основание предполагать, что связанные с применением указанного метода погрешности могут создать ложное представление о причинах аварии; 3) анализа ложной работы релейной защиты в сложных системах; 4) для научно-исследовательских работ, требующих высокой точности.

Из изложенного видно, что метод двух и трех точек пригоден для решения весьма большого комплекса вопросов. В частности, при проектировании он решает почти все вопросы, которые ставятся практикой.

Для проектных целей он особенно удобен тем, что в зависимости от того, имеются ли в распоряжении проектирующей организации точные исходные данные или нет, этот метод может применяться в упрощенной или уточненной модификации.

В основном собственно упрощения или уточнения связаны не с самим методом, а с вычислением экстремальных значений. Так, если исходные данные в отношении распределения нагрузок по сети неясны, то имеется возможность внести

шенный) реактанс  $X_d = 1,0$ ; постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора  $T_0 = 5$  sec; режим работы, предшествующий моменту к. з.,  $U_* = 1,0$ ;  $I_* = 1,0$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Остальные параметры определены по формулам:

$$окз = \frac{1,1}{X_d} = 1,1;$$

$$I_f = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + IX_d)^2} = 1,79; \quad (11)$$

$$E_{d\infty} = 0,8 I_f + 0,2 = 1,633;$$

$$X_{d\infty} = \frac{E_{d\infty}}{окз I_f} = 0,829;$$

$$E'_d = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + IX'_d)^2} = 1,205. \quad (12)$$

Таким образом исходные параметры для гидрогенератора существенно отличаются от таковых для турбогенератора. Однако при расчете по методу трех точек, благодаря тому,

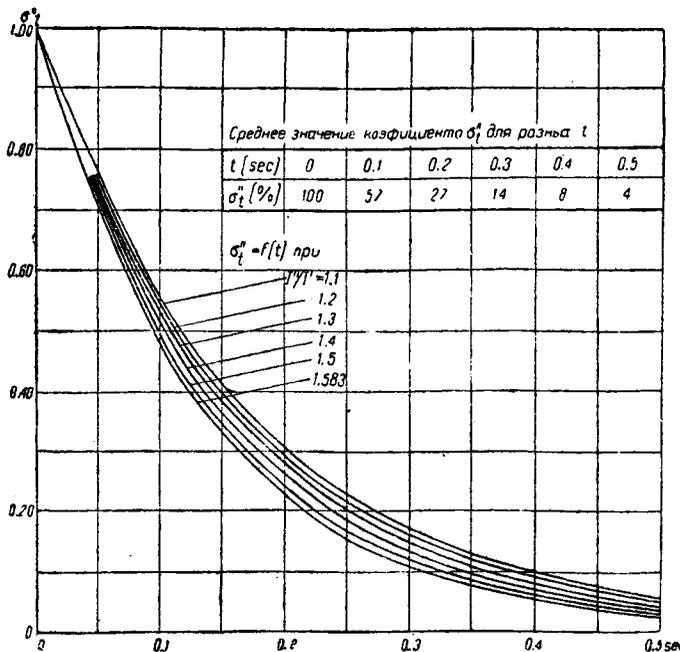


Рис. 8. Метод трех точек ( $I''$ ;  $I'$ ;  $I_\infty$ ). Кривые затухания коэффициентов  $\sigma_t$  для малых  $t$

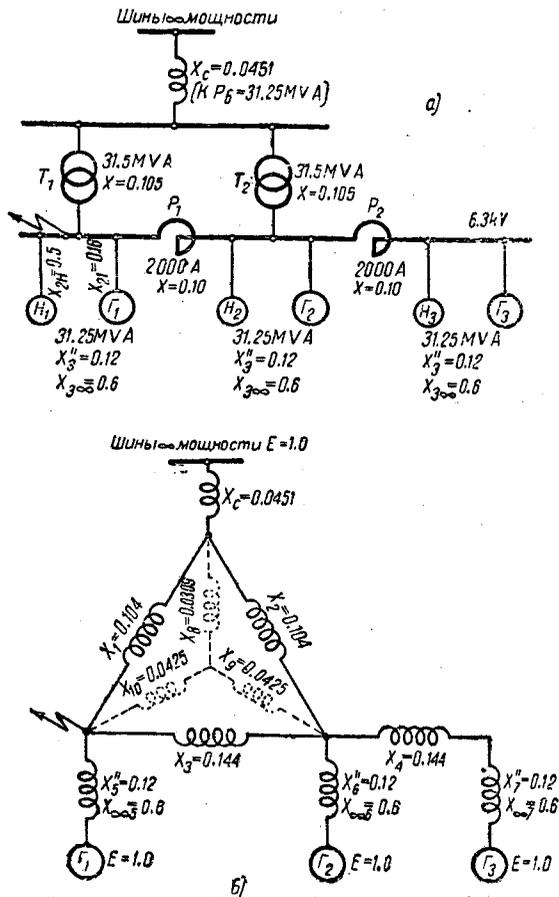


Рис. 9

а — действительная схема; б — расчетная ( $P_G = 31,25 \text{ MVA}$ )

На основании приведенной таблицы можно принять следующие параметры эквивалентного турбогенератора при упрощенном методе двух точек

$$\begin{aligned} E'' &= 1,0; & E_{\infty} &= 1,0; \\ X'' &= 0,12; & X_{\infty} &= 0,6. \end{aligned}$$

Таким образом приближенные формулы для определения экстремальных токов могут быть записаны в виде:

$$I'' = I_G \frac{1,0}{X'' + X_{вн}} = \frac{I_G}{X''_к} \quad (13)$$

и

$$I_{\infty} = I_G \frac{1,0}{X_{\infty} + X_{вн}} = \frac{I_G}{X_{\infty к}} \quad (14)$$

При наличии расчетного стола нахождение установившегося тока к з., таким образом, сводится только к изменению сопротивления генераторной цепи без пересоставления схемы.

При отсутствии расчетного стола значительно облегчаются вычисления, так как все те преобразования, которые были выполнены для внешних сопротивлений, остаются в силе.

Если, однако, наоборот, в распоряжении проектной организации имеются данные о распределении нагрузок, причем характер этого распределения существенно отличается от того, который принят для последних упрощенных формул, метод двух и трех точек позволяет определить значения  $I''$ ,  $I'$  и  $I_{\infty}$  с той степенью точности, с которой это желательно.

**Пример 1.** Определить токи трех- и двухфазного к. з. на 1-й секции шин 6,3 kV тэз через 0,25 sec (рис. 9) по упрощенному методу двух точек. На шинах тэз 10 kV — параллельная работа с сетью бесконечной мощности. Реактивность сети  $X_c = 0,0452$  (к  $P_G = 31,25 \text{ MVA}$ ).

Ток трехфазного к. з. при  $t = 0,25 \text{ sec}$ .

Вычисленные эквивалентные реактивности расчетных схем  $X''_к = 0,0512$ ;  $X_{\infty к} = 0,0903$ .

Можно видеть, что в данном случае при приведении схемы к разомкнутому виду (преобразование треугольника в звезду) генераторные ветви не участвуют в преобразовании. Поэтому вычисление  $X_{\infty к}$  сводится к замене в генераторных ветвях реактивностей  $X'' = 0,12$  на  $X_{\infty} = 0,60$  и несколькими последовательным и параллельным сложениям реактивностей.

Экстремальные значения токов в месте к. з. по формулам (13) и (14) равны:

$$I''_к = I_G \frac{1}{X''_к} = \frac{31,25}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \cdot \frac{1}{0,0512} = 2860 \cdot 19,5 = 56\,000 \text{ A};$$

$$I_{\infty к} = I_G \frac{1}{X_{\infty к}} = \frac{31,25}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \cdot \frac{1}{0,0903} = 2860 \cdot 11,1 = 31\,800 \text{ A}.$$

$$\text{Кратность затухания } \beta'' = \frac{I''_к}{I_{\infty к}} = \frac{56000}{31800} = 1,76.$$

Согласно рис. 6 при  $\beta'' = 1,76$  и  $t = 0,25 \text{ sec}$ ,  $\sigma_t = 0,64$ . Ток через 0,25 sec определится по формуле (3):

$$\begin{aligned} I_{At} &= I_{\infty к} + (I''_к - I_{\infty к}) \sigma_t = 31\,800 + \\ &+ (56\,000 - 31\,800) \cdot 0,64 = 47\,300 \text{ A}. \end{aligned}$$

следующие упрощения при определении величин токов  $I''$  и  $I_{\infty}$ .

Предполагая, что нагрузка присоединена к зажимам генератора, можно при определении тока в месте к. з. с достаточной точностью допустить, что:

а) на величину тока  $I''$  нагрузка вообще влияния не оказывает, и, следовательно, эквивалентная схема может быть собрана без нагрузочных ветвей;

б) для определения тока  $I_{\infty}$  может быть применена та же схема, что составлена для сверхпереходного режима, но с заменой сверхпереходного сопротивления генератора эквивалентным сопротивлением генератора и нагрузочной ветви.

Приводимая ниже таблица показывает достаточно наглядно, что для всех турбогенераторов можно принять это эквивалентное сопротивление равным  $X_{\infty} = 0,60$  при эквивалентной э. д. с., равной 1,0. Возможность аналогичного упрощения была уже в свое время отмечена П. Г. Седовым [10].

Таблица 1

Параметры турбогенераторов [7]

| Тип              | Номинальное напряжение kV | Номинальная мощность MVA | Номинальный cos φ | $X''$ | окз  | $I_f$ | $E_{\infty}$ | $X_{\infty}$ | $E''$ | $X_{\infty} = \frac{X_{\infty} X_n}{X_n + X_{\infty}}$ ( $X_n = 1,2$ ) |       |
|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|-------|------|-------|--------------|--------------|-------|--|-------|
|                  |                           |                          |                   |       |      |       |              |              |       | $E_{\infty} = \frac{E_{\infty} X_n}{X_n + X_{\infty}}$                 |       |
| T-6-2 . . . . .  | 6,3                       | 7,5                      | 0,8               | 0,125 | 0,69 | 2,48  | 2,19         | 1,28         | 1,08  | 1,06   | 0,618 |
| T-12-2 . . . . . | 6,3                       | 15                       | 0,8               | 0,126 | 0,64 | 2,60  | 2,38         | 1,37         | 1,08  | 1,065  | 0,639 |
|                  | 10,5                      |                          | 0,8               | 0,14  | 0,60 | 2,72  | 2,38         | 1,46         | 1,01  | 1,073  | 0,683 |
| T-25-2 . . . . . | 6,3                       |                          | 0,8               | 0,123 | 0,64 | 2,60  | 2,28         | 1,37         | 1,08  | 1,065  | 0,639 |
|                  | 10,5                      | 31,25                    |                   | 0,123 | 0,68 | 2,49  | 2,19         | 1,29         | 1,08  | 1,055  | 0,621 |
| T-50-2 . . . . . | 10,5                      | 58,9                     | 0,85              | 0,115 | 0,65 | 2,52  | 2,22         | 1,36         | 1,065 | 1,04   | 0,637 |
| T-50-4 . . . . . | 10,5                      | 55,5                     | 0,9               | 0,134 | 0,76 | 2,21  | 1,97         | 1,17         | 1,065 | 0,998  | 0,593 |
| Типов . . . . .  | —                         | —                        | 0,8               | 0,12  | 0,7  | 2,44  | 2,16         | 1,26         | 1,08  | 1,06   | 0,615 |

Ток двухфазного к. з. при  $t = 0,25$  sec.  
 Вычисленная эквивалентная реактивность обратной последовательности расчетной схемы  $X_{2к} = 0,0519$ .

Экстремальные значения токов в поврежденных фазах:

$$I''_{к(2)} = I_б \frac{1 \cdot \sqrt{3}}{X''_{к} + X_{2к}} = 2860 \frac{\sqrt{3}}{0,0512 + 0,0519} = 48\ 000\ \text{A};$$

$$I''_{\infty к(2)} = I_б \frac{1 \cdot \sqrt{3}}{X_{\infty к} + X_{2к}} = 2860 \frac{\sqrt{3}}{0,0903 + 0,0519} = 34\ 800\ \text{A}.$$

Кратность затухания

$$\beta'' = \frac{I''_{к}}{I''_{\infty к}} = \frac{48000}{34800} = 1,38.$$

Согласно рис. 6 при

$$\beta'' = 1,38 \text{ и } t = 0,25$$

$$\sigma_t = 0,65.$$

Ток через 0,25 sec определится по формуле (3):

$$I_{At} = 34\ 800 + (48\ 000 - 34\ 800) 0,65 = 43\ 400\ \text{A}.$$

**Пример 2.** Определить остаточное напряжение на 2-й секции шин 6,3 kV при  $t = 0,5$  и  $2,0$  sec при трехфазном к. з. на 1-й секции шин 6,3 kV тэп (рис. 10). На шинах тэп 110 kV — параллельная работа с мощной гидроэлектростанцией. Базисная мощность принята  $P_б = 1000$  MVA.

Реактивность линии передачи определена по формуле:

$$X_A = \frac{X_e}{n} \frac{P_б}{U^2} = \frac{0,4 \cdot 30}{2} \cdot \frac{1000}{110^2} = 0,497,$$

где  $n = 2$  — число цепей.  
 Схема легко приводится к разомкнутой преобразованием треугольника в звезду. Выполнив это, нетрудно получить расчетные схемы рис. 11, на котором все реактивности отнесены к  $P_б = 1000$  MVA. Хотя рассматривается к. з. на зажимах генератора, но так как тока этой генераторной ветви не требуется, все коэффициенты затухания  $\sigma'_t$  можно определять по кратности затухания тока  $\beta'$  в месте к. з.<sup>1</sup>  
 Вычисленные эквивалентные реактивности и э. д. с. расчетных схем равны:

Сверхпереходный режим  $E''_к = 1,12$ ;  $X''_к = 1,87$

Переходный режим  $E'_к = 0,942$ ;  $X'_к = 2,26$

Установившийся режим  $E_{\infty к} = 0,995$ ;  $X_{\infty к} = 4,20$

Экстремальные значения токов в месте к. з.:

$$I''_{к} = \frac{E''_к}{X''_к} \cdot \frac{P_б}{\sqrt{3} U} = \frac{1,12}{1,87} \cdot \frac{10^6}{3 \cdot 6,3} = 0,598 \cdot 91\ 500 = 54\ 700\ \text{A};$$

<sup>1</sup> Если бы этот ток требовался, то необходимо было бы коэффициенты затухания  $\sigma'_t$  определять порознь для к. з. генератора и остальной схемы, а ток в точке к. з. — суммированием.

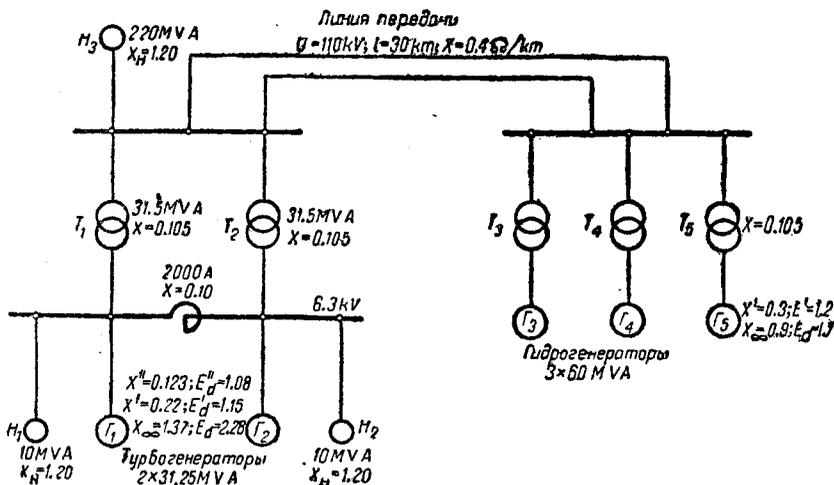


Рис. 10. Действительная схема (пример 2)

$$I'_{к} = \frac{E'_к}{X'_к} \cdot \frac{P_б}{\sqrt{3} U} = \frac{0,942}{2,26} \cdot 91\ 500 = 38\ 200\ \text{A};$$

$$I_{\infty к} = \frac{E_{\infty к}}{X_{\infty к}} \cdot \frac{P_б}{\sqrt{3} U} = \frac{0,995}{4,20} \cdot 91\ 500 = 21\ 800\ \text{A}.$$

Кратность затухания

$$\beta' = \frac{I'}{I_{\infty}} = \frac{38200}{21800} = 1,75$$

и

$$\frac{I''}{I'} = \frac{51700}{38200} = 1,44.$$

Остаточное напряжение за реактором (на 2-й секции шин 6,3 kV).

Остаточные напряжения, вычисленные при нахождении токораспределения для  $I'$ ,  $I''$  и  $I_{\infty}$  в процентах от  $U_N$ , равны:

$$U'' = 60,4; \quad U' = 47,0; \quad U_{\infty} = 31,0.$$

Для определения остаточного напряжения в любой момент времени можно воспользоваться также формулой (2) в рис. 7 и 8, причем

$$\frac{I''}{I'} = 1,44;$$

$$\frac{I'}{I_{\infty}} = 1,74.$$

При  $t = 0,5$  sec

$$U_{At} = U_{\infty} + (U' - U_{\infty}) \sigma'_t + (U'' - U') \sigma''_t =$$

$$= 31,0 + (47,0 - 31,0) 0,73 + (60,4 - 47,0) 0,04 = 43,3\%.$$

При  $t = 2,0$  sec

$$U_{At} = 31,0 + (47,0 - 31,0) 0,275 = 35,9\%.$$

Приложение

Сравнительная оценка метода двух и трех точек и метода кривых затухания. Метод двух и трех точек был предложен Ленинградской комиссией как метод, пригодный

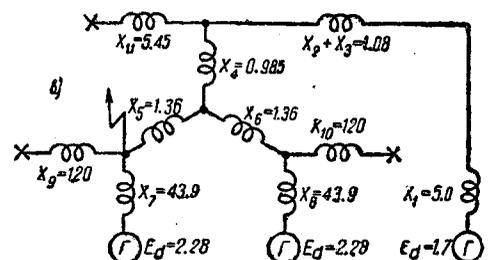
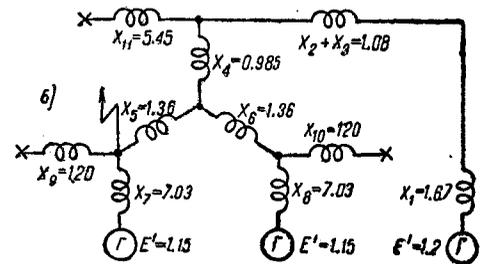
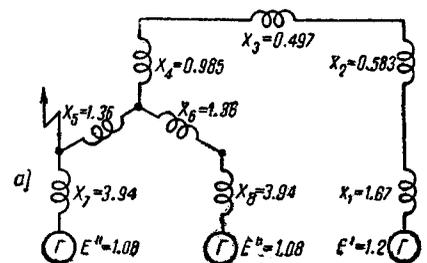


Рис. 11. Расчетные схемы.

а — св.рхпереходного; б — переходного и в — установившегося режима

для решения весьма разнообразных вопросов в области расчета токов к. з. В том числе он был рекомендован и для вычисления токов к. з. для выбора высоковольтной аппаратуры.

Поэтому представляет интерес сравнительная оценка этого метода с методом кривых затухания, широко распространенным для выбора аппаратуры. Принято считать, что метод кривых затухания для токов в месте к. з. дает сравнительно небольшую погрешность и в то же время менее трудоемок, чем все остальные, так как требует определения прямым расчетом только одной величины. В действительности, однако, дело обстоит не совсем так.

Кривые затухания, если пользоваться ими без всяких уточнений (без разбивки по лучам), значительно упрощают вычисления. Однако в таком виде они могут дать ошибки недопустимых размеров.

Характерным примером в этом отношении является к. з. на зажимах генератора, работающего параллельно с системой весьма большой мощности. В предельном случае, когда реактивность связи с системой столь велика, что можно пренебречь током из системы, ток в месте к. з. будет затухать по закону к. з. на зажимах генератора. По кривым же затухания в этом случае получится практически незатухающий ток, так как расчетный реактанс должен быть отнесен к суммарной мощности генераторов системы. Для современных турбогенераторов отношение  $\frac{I''}{I_\infty} \approx 5-6$ . Таким обра-

зом в худшем случае ошибка в величине  $I_\infty$  может достигать 400-500%.

Хотя в реальных сетях погрешности обычно меньше этих предельных величин, однако все же они могут достигать таких размеров, что применять метод кривых затухания в неуточненном виде вряд ли представляется возможным.

Для уточнения величины тока к. з. приходится поэтому учитывать индивидуальное затухание от ряда генераторов. Это весьма нетрудно сделать для схемы, упомянутой выше, так как точка к. з. сама рассекает схему на лучи. В общем же случае замена действительной схемы лучевой значительно усложняет расчет.

Существенное преимущество метода двух точек — это то, что вводимые допущения с этим методом органически не связаны, и их можно делать для упрощения вычислений, но можно и не делать; в методе же кривых затухания такая гибкость отсутствует, и допущения сохраняются в силе, как бы они ни противоречили действительности.

Ниже приводятся примеры того, к каким ошибкам в величине установившегося тока  $I_\infty$  может привести метод кривых затухания вне зависимости от того, учитывается ли индивидуальное затухание генераторов или нет.

**Пример 3** (рис. 12). Конденсационная станция не имеет потребителей на генераторном напряжении: короткое замыкание произошло на шинах понизительной подстанции, куда и присоединены указанные потребители.

Согласно действительной расчетной схеме *б* рис. 12

$$I_\infty = \frac{I_0 E_d}{X_\infty + X_{T1} + X_A + X_{T2}} = 1,34 I_0$$

Согласно эквивалентной схеме *в* кривых затухания рис. 12

$$I_{\infty 1} = \frac{I_0 E_{s1}}{X_{s1} + X_{T1} + X_A + X_{T2}} = 1,11 I_0$$

где

$$E_{s1} = \frac{E_d X_N}{X_N + X_\infty} = 1,03$$

и

$$X_{s1} = \frac{X_\infty X_N}{X_N + X_\infty} = 0,63$$

Ошибка равна

$$\frac{I_\infty - I_{\infty 1}}{I_\infty} \cdot 100 = \frac{1,34 - 1,1}{1,34} \cdot 100 = 17\%$$

в сторону преуменьшения.

**Пример 4** (рис. 13). Нагрузка распределена поровну между станцией и подстанцией; на последней она, однако, состоит в основном из синхронных моторов.

При к. з. на шинах понизительной подстанции установив-

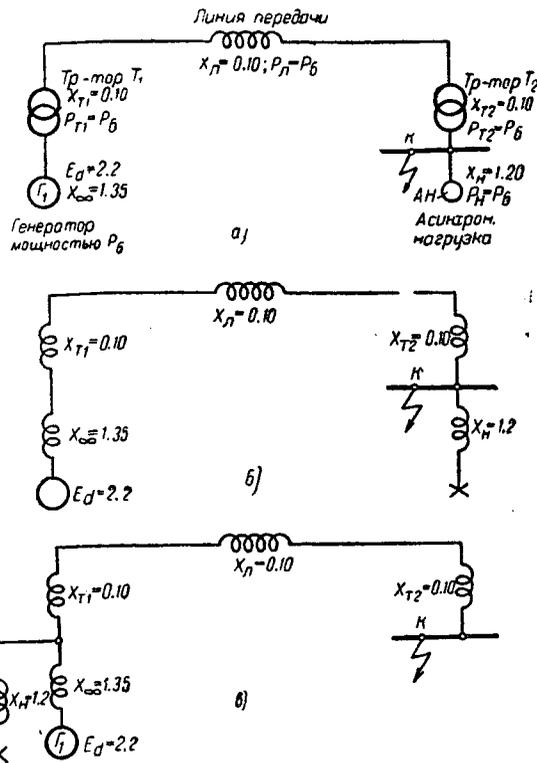


Рис. 12 (пример 3).

*a* — действительная схема установившегося режима; *б* — расчетная схема установившегося режима к. з.; *в* — эквивалентная схема, содержащая допущения, принятые при построении кривых затуханий

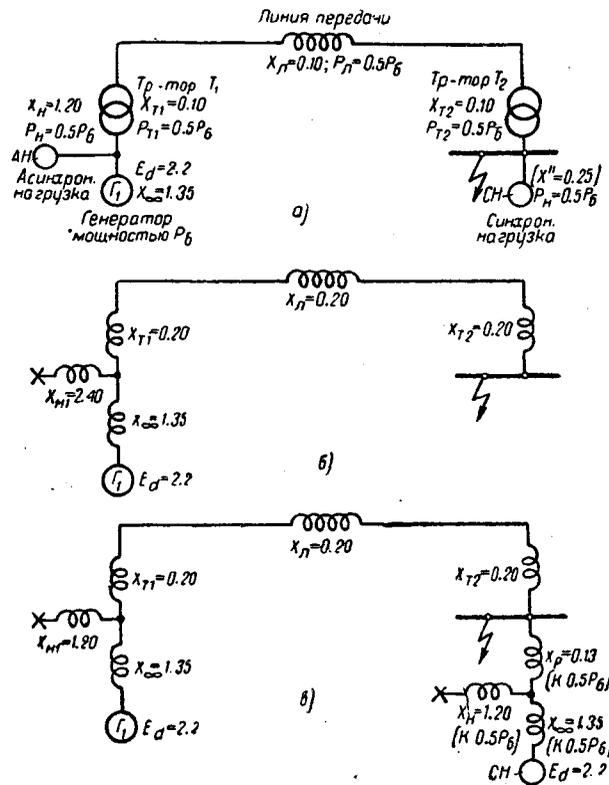


Рис. 13.

*a* — действительная и *б* — расчетная схемы установившегося режима; *в* — эквивалентная схема, содержащая допущения, принятые при построении кривых затуханий

шийся ток к. з. от синхронных моторов равен нулю. Таким образом по действительной расчетной схеме б рис. 13

$$I_{\infty} = \frac{I_0 E_0}{X_0 + X_{T1} + X_A + X_{T2}} = 0,96 I_0,$$

где

$$E_0 = \frac{E_d X_n}{X_n + X_{\infty}} = 1,41;$$

$$X_0 = \frac{X_{\infty} X_n}{X_n + X_{\infty}} = 0,864.$$

Согласно же «Руководящим указаниям по производству расчетов коротких замыканий» при пользовании методом кривых затухания синхронные двигатели большой мощности рассматриваются как синхронные генераторы той же мощности. Таким образом расчетная схема для метода кривых затухания принимает вид, изображенный на рис. 13, в.

Из сравнения схем б и в рис. 13 видно, что, помимо того, что эта схема отнюдь не эквивалентна действительной расчетной схеме, ток к. з. равен:

$$I_{\infty 1} = I_{\infty \text{ ген}} + I_{\infty \text{ мот}} = \frac{E_{01} I_0}{X_{01} + X_{T1} + X_A + X_{T2}} + \frac{E_{01} \cdot 0,5 I_0}{X_{01} + X_p} = 0,84 I_0 + 0,5 \cdot 1,34 I_0 = 1,51 I_0,$$

где

$$E_{01} = \frac{E_d X_{n1}}{X_{n1} + X_{\infty}} = 1,03$$

$$X_{01} = \frac{X_{\infty} X_{n1}}{X_{\infty} + X_{n1}} = 0,63.$$

$$\text{Ошибка равна } \frac{I_{\infty} - I_{\infty 1}}{I_{\infty}} 100 = \frac{1,51 - 0,96}{0,96} 100 = 57\% \text{ в}$$

сторону преувеличения.

Приведенные два примера уже в должной мере иллюстрируют недостаточную гибкость метода кривых затухания в учете индивидуальных особенностей схем.

Помимо того, надо отметить еще и следующие моменты:

1. В ряде случаев необходимо знать не только кривую тока в месте к. з., но и токораспределение. Не говоря уже о релейной защите, проектирование которой может идти комплексно с выбором аппаратуры, но даже при выборе реакторов, т. е. именно аппаратов, необходимо бывает проверить величину остаточных напряжений в отдельных узлах. Метод кривых затухания для этой цели, как правило, непригоден, в то время как метод двух и трех точек позволяет это сделать с достаточной для практики точностью.

2. При расчете токов к. з. в сложных системах приходится иногда вводить некоторые уточнения, как например: 1) учесть активные сопротивления; 2) заменить нагрузку шунтом с реактивностью, отличной от принятой средней; 3) учесть индивидуальные параметры машин, особенно гидрогенераторов, синхронные сопротивления которых имеют довольно широкий диапазон колебаний; 4) учесть индивидуальные параметры синхронных моторов и компенсаторов; 5) учесть правильные коэффициенты трансформации трансформаторов и, следовательно, различные э. д. с. машин; 6) применить, наконец, метод Шетцлейна, позволяющий учесть угловые сдвиги э. д. с.

Метод двух и трех точек позволяет вводить все указанные уточнения для экстремальных значений, метод же кривых затухания создает значительно меньшие возможности для таких уточнений.

3. При определении термического эффекта в системах, питаемых как турбо-, так и гидрогенераторами, пользование кривыми затухания попросту невозможно, так как в этих случаях необходимо знать переходный ток.

Таким образом значительно большая универсальность метода двух и трех точек вырисовывается достаточно наглядно.

Наряду с этим необходимо также отметить и некоторые формальные моменты, снижающие ценность метода кривых затухания:

1. При пользовании методом кривых затухания необходимость перехода к лучевой схеме и выбор количества лучей предоставляются усмотрению расчетчика, так как требование при любой схеме находить токораспределение во всех генераторных ветвях привело бы к чрезмерному увеличению трудоемкости. Но, с другой стороны, такая свобода может привести к тому, что расчеты, будучи формально совершенно правильными, могут давать в некоторых случаях совершенно неверные результаты.

2. При наличии в системе синхронных моторов замена их в расчетной схеме генераторами без корректуры величины остающейся асинхронной и осветительной нагрузки, а наоборот, с добавлением еще нагрузки на зажимах этих фиктивных генераторов с формальной стороны не выдерживает критики, так как противоречит простому здравому смыслу.

Все вышеизложенное направлено не к тому, чтобы опровергнуть метод кривых затухания. Указанный метод благодаря своей простоте нашел себе чрезвычайно широкое применение. Необходимо только учитывать, что метод кривых затухания дает значительные упрощения тогда, когда он применяется без уточнения. Поэтому он вполне пригоден в тех случаях, когда требуются только ориентировочные результаты, т. е. для определения основных параметров при эскизном проектировании и составлении проектных заданий. Также применим он для выбора выключателей в сетях 35 кВ и выше, где лимитируют обычно предельные отключаемые токи, сравниваемые с токами к. з. через 0,15—0,25 сек. Большие интервалы между разрывными мощностями выключателей позволяют мириться с приближенным учетом затухания для столь малых времен.

## Литература

- Инж. Чернин А. Б., Упрощенный американский метод расчета токов короткого замыкания. «Электричество» № 10—11, 1934.
- Инж. Чернин А. Б., Метод спрямленных характеристик для расчета токов к. з. «Электричество» № 4, 1935.
- VDE, Method zur Berechnung von Kurzschlussströmen Schalterleistungen. ETZ, 1929, стр. 242, 279.
- Hahn W. C., Decrement Curves for specific Systems. AIEE, Paper 32, M-5.
- Wagner C. F. and S. H. Wright, Calculations of short-circuit on Power Systems. AIEE, Paper 32, M-4 (см. также El. Journal № 5, 1933).
- Щедрин Н., Токи короткого замыкания высоковольтных систем. ОНТИ, 1935.
- Инж. Дементьев Ф. А., Турбогенераторы. Технический справочник завода «Электросила». Изд. ВЭО, август 1933.
- Инж. Еремеев А. С. и Соломин Л. Н., Гидрогенераторы Ленинградского электромеханического завода «Электросила» им. Кирова. Технический справочник. Изд. ГЭП, февраль 1935.
- Руководящие указания по производству расчетов коротких замыканий в трехфазных электрических системах. Составлены инж. С. А. Ульяновым.
- Седов П. Г., Установившиеся токи к. з. «Электричество» № 17, 1933.

# Ртутно-струйный турбинный выпрямитель

П. А. Семенов  
Саратов

Существует ряд установок и производств, где требуется постоянный ток большой силы, при напряжении, не превышающем 10—20 V. К ним относятся различного рода электролитические ванны, водородные электролизеры, устройство для зарядки аккумуляторных батарей большой емкости, ванны для хромирования и т. д.

Применение ионных ртутных выпрямителей в этом случае нерационально, так как минимальное напряжение, необходимое для поддержания дуги, составляет 20—30 V и, следовательно, к. п. д. будет очень мал.

Применяемые одноякорные преобразователи или моторгенераторы имеют более высокий к. п. д., но их широкому распространению препятствуют громоздкость этих машин, затраты большого количества меди и сложность токоснимающих устройств (при низком напряжении).

В литературе еще описываются системы механических выпрямителей (выпрямители с вращающимся коммутатором и выпрямители с колеблющейся ртутной струей системы Гартмана). Область применения их в настоящее время весьма ограничена.

Описываемый в статье ртутно-струйный турбинный выпрямитель, предложенный инж. Адмиральским, является в принципе многофазным коммутаторным выпрямителем с неподвижным коллектором и вращающимся токоснимающим устройством в виде струй ртути, выбрасываемых из вращающегося барабана и скользящих по коллекторным пластинкам.

**Принцип коммутаторного выпрямителя.** Рассмотрим вкратце процесс выпрямления тока в механическом коммутаторном выпрямителе (рис. 1). Для большей простоты и наглядности взят двухфазный ток. Вторичная обмотка трансформатора присоединена к коммутаторным пластинкам коллектора, как показано на рисунке. Противоположные пластинки соединены между собой.

Если вращать щетки *kk* синхронным мотором, то при соответствующей синхронной скорости щетки будут скользить по пластинкам одной фазы в течение полупериода.

В момент перехода щеток на соседнюю пару пластинок полярность изменяется. В результате в нагрузочном сопротивлении получается пульсирующий постоянный ток.

Очевидно, подобным же образом, можно вы-

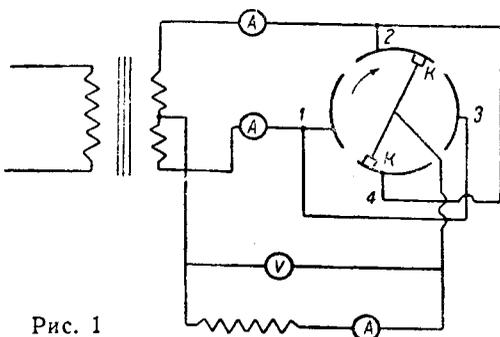


Рис. 1

прямлять и *m*-фазные токи. Среднее значение (рис. 2) выпрямленного напряжения

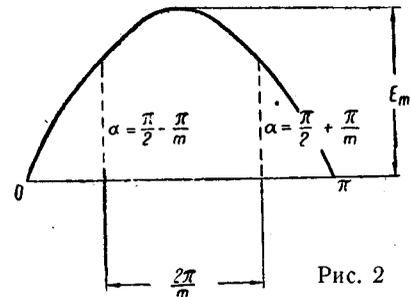
$$E_g = E'_{gm} = E_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = E\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \quad (1)$$

где *E* — эффективное значение переменного тока, *m* — число фаз.

Подобное соотношение существует между выпрямленным током и фазовым током трансформатора:

$$I_g = mI_{g'} = \frac{m}{\pi} I_m \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2)$$

*I<sub>g</sub>* — постоянная слагающая выпрямленного тока, которую покажет магнитоэлектрический прибор, включенный в цепь нагрузки (рис. 2).



Тепловой прибор, включенный в фазу трансформатора, показывает эффективное значение тока ламели выпрямителя

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}} I_m^2 \sin^2 \alpha \, d\alpha} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}. \quad (3)$$

Тот же прибор в цепи нагрузки дает

$$I_{g, \text{эф}} = \frac{m}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi} \left( \sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}. \quad (4)$$

*I<sub>g</sub>* — эффективное значение выпрямленного тока. Отношение:

$$\frac{I_{\text{эф}}}{I_{g, \text{эф}}} = \frac{1}{\sqrt{m}}. \quad (5)$$

При включении в фазу трансформатора теплового прибора, а в цепь нагрузки прибора магнитоэлектрического, очевидно, будем иметь:

$$\frac{I_{\text{эф}}}{I_g} = \frac{\frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}}{\frac{m}{\pi} I_m \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\sqrt{\pi \sin \left( \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}}{2m \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (6)$$

Разница между *I<sub>гэ</sub>* и *I<sub>г</sub>*, как известно, практически получается очень незначительной в особенности для большого числа фаз.

**Коммутация.** Рассмотрим случай коммутации тока щетками выпрямителя при трехфазной системе (рис. 3). При синхронной скорости вращения щеток коммутация должна происходить в моменты, изображенные на кривой точками *A<sub>1</sub>*, *A<sub>2</sub>*, *A<sub>3</sub>*, когда коммутаторные пластины соседних фаз, закорачиваемых щеткой, — эквипотенциальны.

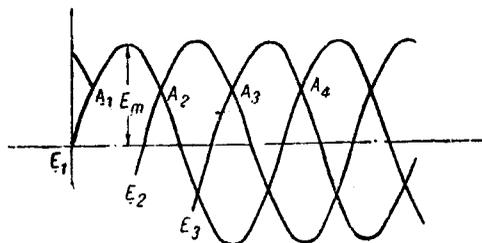


Рис. 3

Безыскровая, нормальная работа возможна лишь при условии, что период коммутации будет весьма мал. Этот период при постоянной угловой скорости вращения щеток зависит лишь от аксиальной ширины их. Однако по условиям плотности тока и отчасти из соображений механической прочности щетки мы не можем беспредельно уменьшать ее ширину.

Помимо этого, сопротивление ламель I щетка — ламель II (рис. 4), во избежание больших токов к. з. при набегании и сбегании щетки (положение A и C, рис. 4), должно иметь какую-то оптимальную величину. Таким образом коммутация токов большой силы в выпрямителях при помощи твердых щеток является весьма сложной задачей.

Эта задача весьма просто разрешена в описываемой конструкции системы инж. Адмиральского. Твердые щетки в этом выпрямителе заменяются струей ртути, расщепленной на две струи и не-

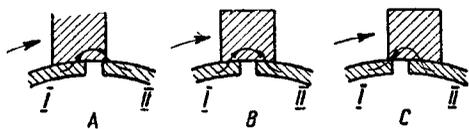


Рис. 4

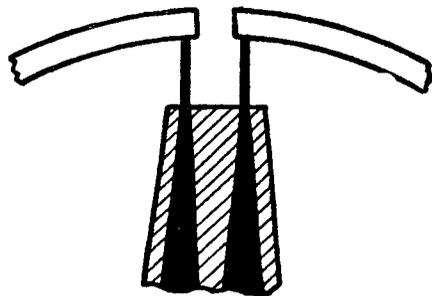


Рис. 5

прерывно вытекающей из сопла (рис. 5) со скоростью около 12 м/сек. Благодаря большой скорости струи и высокой электропроводности ртути в данной конструкции могут быть допущены значительные плотности тока без особенного повышения температуры ртути. В описываемой осуществленной модели плотность тока составляет, например,  $\sim 60$  А/мм<sup>2</sup>.

В результате возможно значительно уменьшить поверхность „щеток“. Можно также варьировать сопротивление пути ламель — щетка — ламель, удлиняя канал, по которому идет ртуть. При этом подбор наиболее выгодного режима коммутации при любой нагрузке может быть осуществлен весьма быстро.

**Конструкция ртутно-струйного выпрямителя.** Синхронный мотор, ротор которого питается постоянным током и снабжен клеткой Леблана для асинхронного запуска, вращает полый кони-

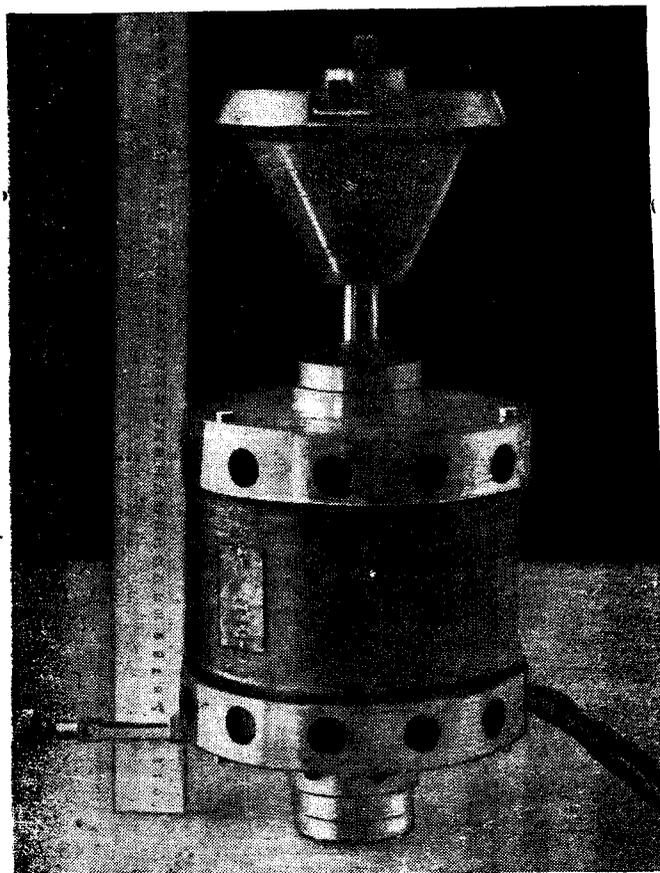


Рис. 6

ческий железный стакан с двумя соплами, направленными в противоположные стороны. Нижняя часть стакана погружена в чашку со ртутью. Ртуть при вращении стакана центробежной силой поднимается по внутренним стенкам его и выбрасывается из сопел со скоростью около 12 м/сек под углом 30° к горизонту вверх.

На фотографии рис. 6 показан мотор с монтированным на его валу стаканом с соплами. Материал сопел — фибра.

Стакан монтируется в никелированный железный кожух (рис. 7), стенки которого во избежание замыканий струй ртути изолированы листовой фиброй.

На рис. 8 показан внутренний кожух. Чашка со ртутью, расположенная в середине кожуха, снабжена двумя крестообразно установленными перегородками, препятствующими вращательному движению ртути в чашке.

Ртуть, выбрасываемая в виде двух струй из каждого сопла, попадает на фазовые коммутаторные пластинки коллектора, изготовленные из 8-мм листового никеля, гофрированного с поверхности для улучшения контакта со ртутью. Пластинки изолированы друг от друга вертикальными перегородками из 2-мм листовой фибры и монтируются на верхней крышке выпрямителя.

Их расположение показано на рис. 9.

Фотография (рис. 10) дает вид крышки сверху. На поверхности крышки видны контактные болты коммутаторных пластин, крепящие их на крышке и одновременно служащие для присоединения подводных проводников. Крышка крепится к основному кожуху выпрямителя при помощи бол-

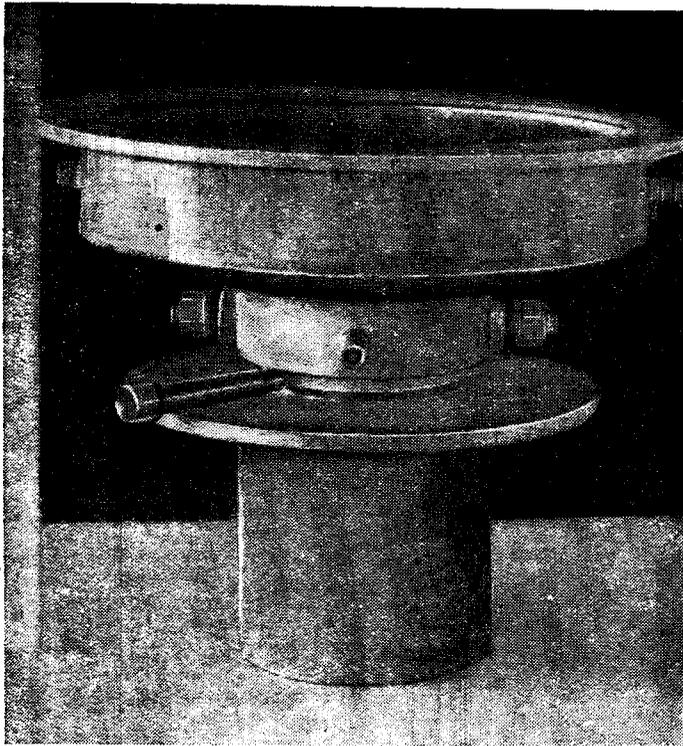


Рис. 7

тов с резиновой прокладкой. Круглое окно в крышке заделывается целлулоидовой пленкой, что дает возможность наблюдать за работой выпрямителя.

Ртуть, вытекающая из сопел, после соприкосновения с коммутаторной пластинкой падает вниз и скатывается по наклонным стенкам дна кожуха в чашку. Для охлаждения сильно нагревающейся при работе ртути ( $70-100^{\circ}\text{C}$ ) нижняя часть кожуха и чашка снабжены рубашкой, по которой

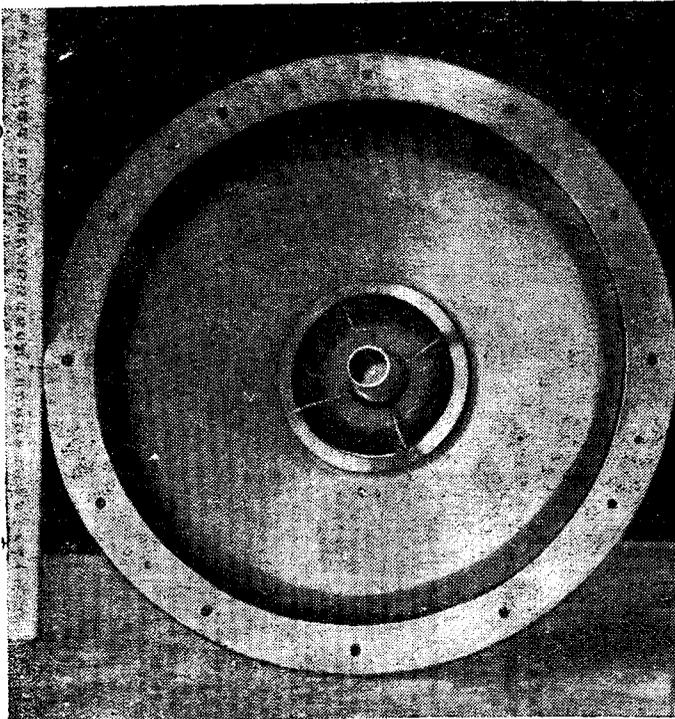


Рис. 8

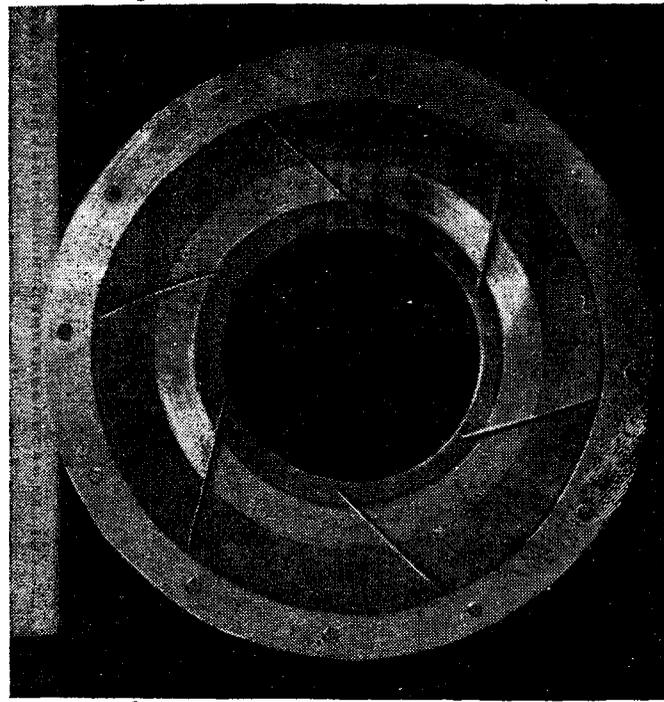


Рис. 9

идет проточная вода. Таким образом ртуть непрерывно циркулирует внутри выпрямителя.

Во избежание окисления ртути, неизбежного в воздухе, внутренность выпрямителя наполнена водородом. Присутствие водорода уменьшает также искрение выпрямителя вследствие высокого потенциала ионизации водорода. Благодаря хорошей системе уплотнений расход водорода (утечка) незначителен и пополняется автоматически небольшим электролизером, питающимся от выпрямителя. Давление водорода внутри выпрямителя составляет около 1 см Hg. Каждое сопло имеет 2 отверстия диаметром 2 мм. При таком размере сопел полное внутреннее сопротивление выпря-

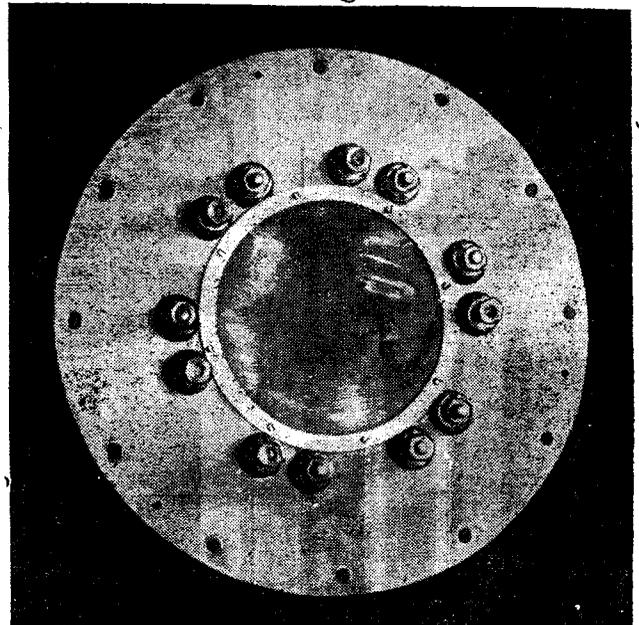


Рис. 10

мителя при нормальной нагрузке составляет<sup>1</sup>  $R = 0,007 \Omega$ .

Кожух выпрямителя является одним из полюсов постоянного тока. Вторым полюсом служит нулевая точка вторичной обмотки трансформатора, соединенной в звезду.

Схема соединения выпрямителя приведена на рис. 11.

В процессе разработки и испытаний данного выпрямителя был конструктивно изменен ряд

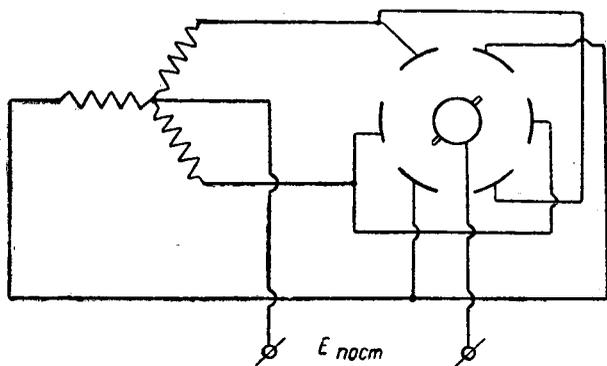


Рис. 11

деталей. Предлагаемая здесь модель, повидимому, может считаться вполне приемлемой для эксплуатации ее в производственных условиях. При указанных выше габаритах выпрямитель имеет следующую характеристику. При фазовом напряжении переменного тока  $E_{\phi} = 12 \text{ V}$  (табл. 1).

Таблица 1

|                   |    |     |     |     |      |
|-------------------|----|-----|-----|-----|------|
| $I$ (A) . . . . . | 0  | 300 | 500 | 800 | 1000 |
| $E$ (V) . . . . . | 15 | 13  | 11  | 8   | 5    |

Для данных габаритов выпрямителя ток 800 А следует считать предельным, так как при дальнейшем увеличении тока выпрямитель начинает сильно перегреваться.

На рис. 12 показан выпрямитель в собранном виде. Выпрямитель представляет собой весьма компактный аппарат по сравнению с аналогичными по мощности мотор-генераторами низкого напряжения. Синхронный мотор переделан из асинхронного мотора «ЭМОС» мощностью 0,3 kW. Возбуждение ротор получает от батареи аккумуляторов напряжением 6 В. Эта же батарея подпитывает электролизер во время остановок выпрямителя. Мощность батареи рассчитана на 3 суток питания электролизера. В заключение необходимо отметить явление, которое наблюдалось во время замера сопротивления выпрямителя на постоянном токе.

При опыте пластинки коллектора замыкались между собой накоротко и через выпрямитель пропускался постоянный ток (при вращающемся роторе) различной силы, и замерялось падение напряжения на выпрямителе. Экспериментально полученная кривая сопротивления в зависимости от силы тока приведена на рис. 13. При изменении

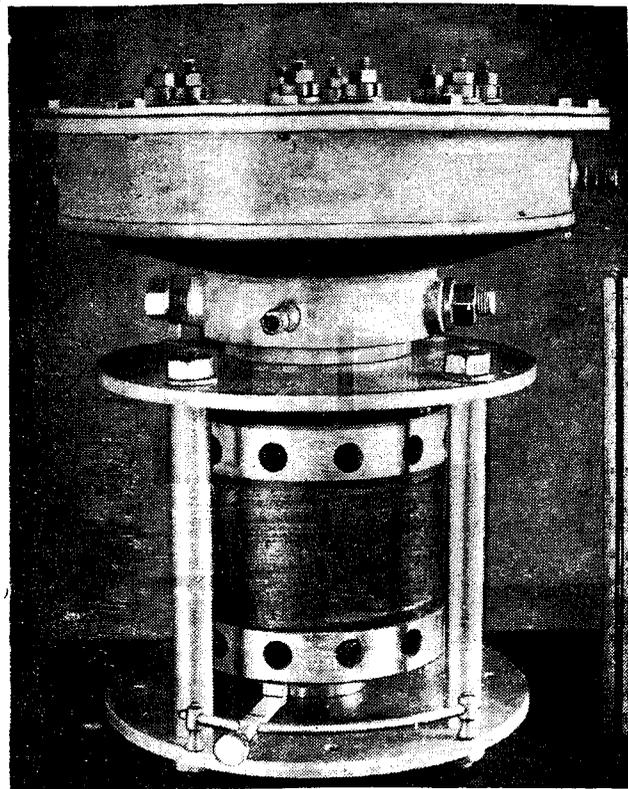


Рис. 12

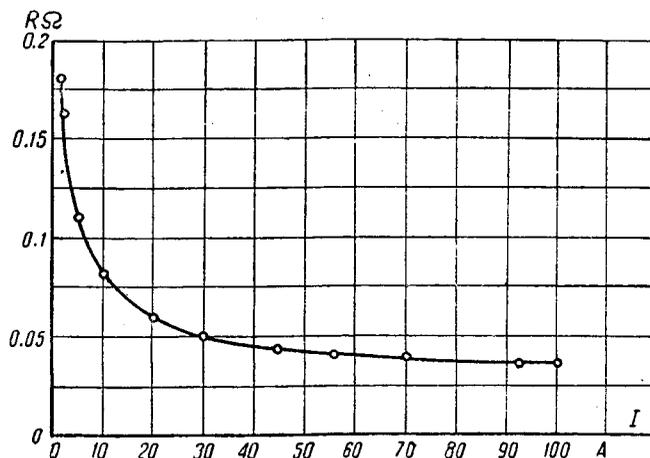


Рис. 13

тока от 1,0 А до 100 А сопротивление выпрямителя изменялось от 0,2 до 0,03 Ω. Таким образом при увеличении тока, проходящего по струе, наблюдается сильное падение внутреннего сопротивления выпрямителя. Это обусловлено, повидимому, изменением поверхностного натяжения ртути в зависимости от силы тока, проходящего по струе. По проведенным предварительным опытам это явление наблюдается только в движущейся (вращающейся) струе ртути.

#### Литература

1. Вологдин В., Выпрямители. 1936, стр. 80—91, 309—314.
2. Угримов и Генсель, Основы техники сильных токов, т. I, 1928.
3. Günterschulze A., Gleichrichter und Ventile, Berlin 1930.

<sup>1</sup> См. ниже.

# Использование индуктивного ваттметрового прибора для автоматического пуска синхронного мотора<sup>1</sup>

Б. Е. Телешевский  
Москва

Наиболее распространенным методом пуска синхронных двигателей является асинхронный пуск. Он осуществляется при пониженном напряжении через реактор или автотрансформатор. При этом пуск двигателя в ход и доведение его до подсинхронной скорости происходит на асинхронном режиме.

Синхронный двигатель работает без возбуждения, обмотка возбуждения замкнута через сопротивление на возбудитель.

Включение двигателя в синхронизм происходит в момент возбуждения индукторов, если это включение произошло при достижении двигателем подсинхронной скорости.

В настоящее время существуют два принципа автоматического включения возбуждения при достижении подсинхронной скорости:

1. Частотное реле, включаемое в цепь возбуждения двигателя и реагирующее на уменьшение (прекращение) пульсации в цепи возбуждения.

2. Реле времени, устанавливаемое с заранее подобранной выдержкой времени, в соответствии с временем разбега двигателя.

Автором настоящей статьи предлагается использовать следующий принцип для автоматического запуска синхронного двигателя.

В первый момент пуска синхронного двигателя затрачивается активная мощность на сообщение ускорения массам ротора, определяемая, как известно, из выражения.

$$P = 2,74 \frac{GD^2}{t_0} \cdot n^2 \cdot 10^{-6} \text{ kW.}$$

По достижении подсинхронной скорости активная мощность, потребляемая двигателем, составит лишь небольшую величину, определяемую потерями холостого хода двигателя.

Реактивная мощность, засасываемая двигателем из сети во время пуска, постоянна и определяется намагничивающим током статора, при работе двигателя без возбуждения.

Таким образом коэффициент мощности пуска двигателя в начальный момент относительно высок и достигает величины порядка 0,03—0,04.

При достижении двигателем подсинхронной скорости коэффициент мощности падает до величины ниже 0,01.

Прибором, реагирующим на изменение коэффициента мощности, может быть трехфазный счетчик для равномерной нагрузки фаз, включаемый по схеме Арона.

Как известно, вращающий момент счетчика при постоянном напряжении прямо пропорционален току и коэффициенту мощности.

$$M \equiv I_{cp} \cos \varphi.$$

С уменьшением коэффициента мощности момент уменьшается, достигая нуля, при  $\cos \varphi$ , равном нулю.

При величинах коэффициента мощности, близких к нулю, счетчик может быть отрегулирован на обратный ход. Для этого нужно сдвинуть магнитную систему одной фазы к внешней стороне диска.

Обратный ход при этом получается за счет вредных вращающих моментов между системами обеих фаз, из-за их несимметричного расположения относительно центра диска.

Число оборотов ваттметрового прибора (счетчика) с несимметричной магнитной системой, в зависимости от  $\cos \varphi$ , представлено в следующей таблице.

|   |            |      |      |              |      |      |      |
|---|------------|------|------|--------------|------|------|------|
| Коэффициент мощности                    | 0,4        | 0,3  | 0,2  | 0,1          | 0,03 | 0,06 | 0,04 |
| Число оборотов диска в минуту . . . . . | 19,4       | 12,5 | 6,68 | 0            | 1    | 2,5  | 4,75 |
|   | Прямой ход |      |      | Обратный ход |      |      |      |

Ток при регулировке прибора принят постоянным (равным 1 А). В действительности при пуске он не будет постоянен. Диск счетчика в момент включения быстро вертится, затем останавливается и поворачивается в обратную сторону, замыкая контакты.

Кривая регулировки счетчика на «обратный ход» в зависимости от  $\cos \varphi$  представлена на прилагаемом рис. 1.



Рис. 1. Зависимость числа оборотов ваттметрового прибора от  $\cos \varphi$

Пуск синхронного двигателя на указанном принципе осуществлен на пяти мотор-генераторах мощностью 1100 kVA, 500 об/мин, работающих на подстанциях комбината Запорожсталь.

Включение возбуждения контактами счетчика представлено на схеме рис. 2 и особых пояснений не требует.

Общий вид счетчика с пристроенными контак-

<sup>1</sup> Заявка № 192357. Авторское свидетельство (пост. НИСИС НКТП от 3/ХІІ 1936 г.).

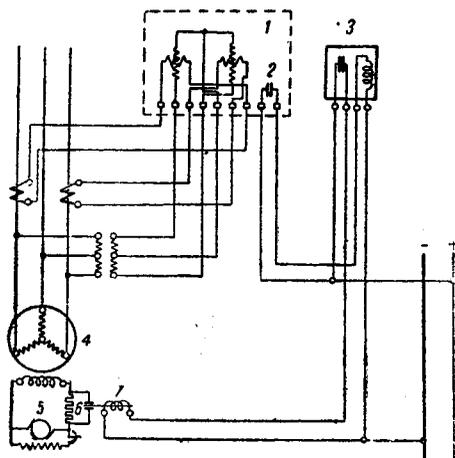


Рис. 2. Схема включения ваттметрового прибора (счетчика) для пуска синхронного двигателя, 1—трехфазный индукционный счетчик; 2—контакты счетчика; 3—промежуточное реле; 4—синхронный двигатель; 5—возбудитель; 6—ограничительное сопротивление; 7—контактор

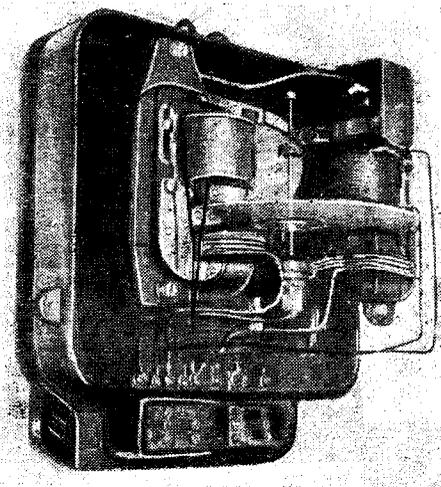


Рис. 3

тами, работающими на замыкание при обратном ходе счетчика, изображен на рис. 3.

Описанный способ автоматического пуска синхронного двигателя проще, нежели распространенные в настоящее время способы для двигателей, пускаемых вхолостую.

Ваттметровый прибор типа счетчика проще и дешевле реле времени с большой выдержкой,

а также частотных реле. Этот принцип пуска больше соответствует физическому процессу, происходящему в момент пуска в цепи синхронного мотора, и поэтому более надежен.

На этом же принципе может быть автоматизирован пуск больших асинхронных моторов, пускаемых при пониженном напряжении от реактора или автотрансформатора.

## Практический расчет электронагревателей

В. Н. Аносов и Г. В. Ключин  
Ленинград

Известно, что теория электротермии определяет температурное состояние нагревателя всецело через нагрузку его поверхности. В это же время в общем электромашиностроении принято связывать температуру проводника с допущенной для него плотностью тока. Нетрудно показать, что в рассматриваемых приборах токовая нагрузка сечения ( $A/mm^2$ ) сама по себе не может служить мерилем нагрева. В самом деле, при устойчивом тепловом состоянии

$$t = c \frac{P}{\alpha s} = c \frac{\vartheta}{\alpha}.$$

$\vartheta$  — удельная нагрузка поверхности;  
 $\alpha$  — общий коэффициент теплоотдачи;  
 $P$  — мощность, выделяющаяся в проводнике;  
 $t$  — накал проводника;  
 $s$  — поверхность проводника;  
 $c$  — коэффициент пропорциональности.

Предположим, что круглый проводник расчленяется на  $n$  нитей. Тогда, пренебрегая неравномерностью температуры внутри проводника

$$t_n = \frac{\alpha t_0}{\alpha_n \sqrt{n}}, \quad (1)$$

где  $n$  — число нитей;  
 $\alpha_n$  — общий коэффициент теплоотдачи одной нити;  
 $t_n$  — накал нити;  
 $t_0$  — первоначальный накал проводника.

Для ленты сечения  $ma^2$  ( $a$  — толщина,  $ma$  — ши-

рина) подобная же задача расчленения ее решается следующим образом:

$$t_n = \frac{\alpha(m+1)t}{\alpha(nn+1)}. \quad (2)$$

Для поддержания накала ветвей на прежнем уровне общую подаваемую мощность следует увеличить при круглом сечении в  $\frac{\alpha_n \sqrt{n}}{\alpha}$  раз, а при ленте в  $\frac{\alpha_n(nm+1)}{\alpha(m+1)}$  раз.

Как видим, разделение проводника на части приводит к резкому изменению его температурного состояния, хотя плотность тока осталась неизменной. Однако для проводника определенного сечения плотность тока вполне определяет его накал:

$$P = \delta Uq; \quad t = c \frac{P}{\alpha s} = c \frac{\vartheta}{\alpha};$$

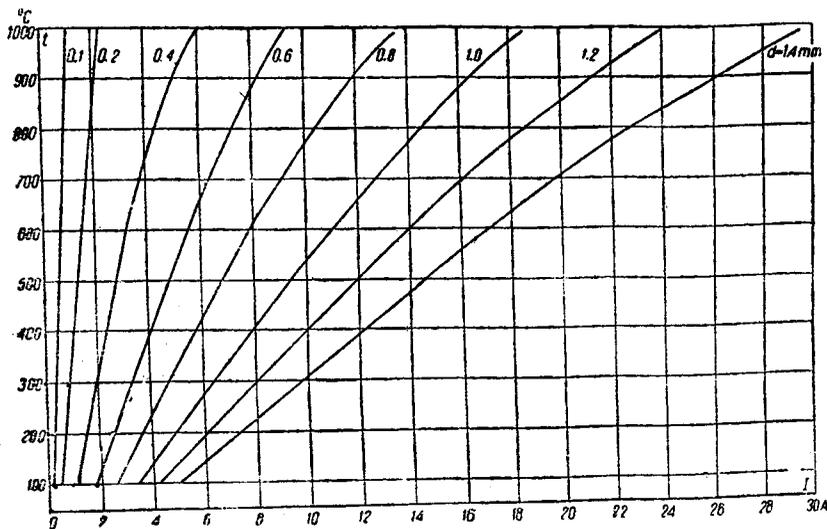
$$\vartheta = \frac{\delta Uq}{s}; \quad \delta = \frac{\vartheta s}{Uq}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — плотность тока;  
 $U$  — напряжение;  
 $q$  — сечение проводника.

Получим следующие выражения:  
для нити

$$\vartheta = \frac{\delta \rho l}{\pi d}; \quad \delta = \frac{\vartheta \pi d}{\rho l}; \quad (4)$$

$I$  — ток;  
 $d$  — диаметр нити;  
 $\rho$  — удельное сопротивление;



Р.с. 1

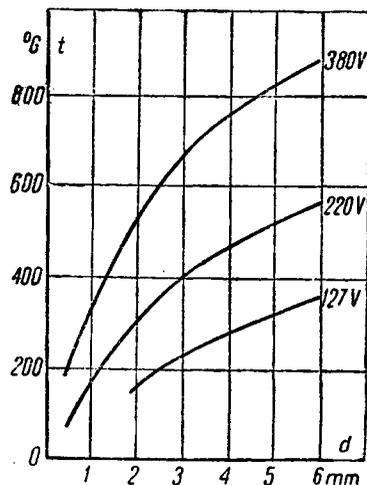


Рис. 3

для ленты

$$\vartheta = \frac{\delta \rho l}{2a(m+1)}; \quad \delta = \frac{\vartheta 2a(m+1)}{\rho l}, \quad (5)$$

откуда

а) для нити

$$t = c \frac{\delta \rho l}{\alpha \pi d}; \quad (6)$$

б) для ленты

$$t = c \frac{\delta \rho l}{2a\alpha(n+1)}. \quad (7)$$

Рис. 1 дает зависимость температуры  $t$  от тока  $I$  (использованы данные Асиер d'Imphy). Рис. 2 показывает связь между  $t$  и  $d$  при постоянном  $\delta$ .

Практически задается напряжение и уже, исходя из него, нужно дать проводнику требуемый накал, причем и сечение и сила тока играют подчиненную роль. Поэтому имеет смысл выразить все тепловые показатели нагревателя через напряжение.

В общем виде

$$t = c \frac{U^2}{\alpha s R}, \quad (8)$$

где  $R$  — сопротивление.

Общеизвестная формула Тен-Босх для нити

$$t = \frac{344 I^2 \rho}{\alpha d^3}$$

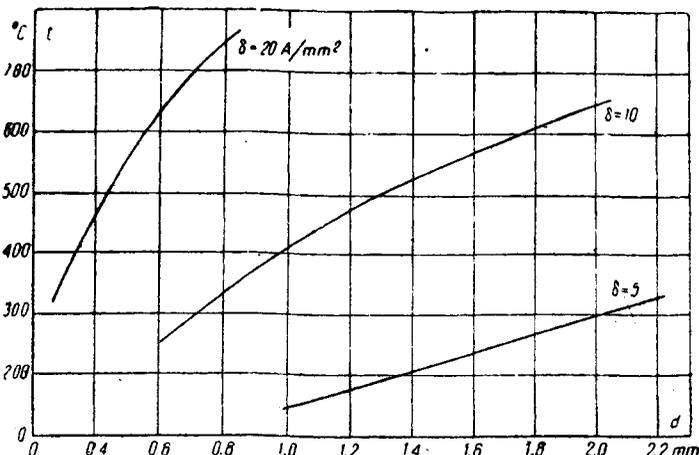


Рис. 2

преобразуется следующим образом:

$$t = \frac{344 U^2 \rho}{R^2 a d^3} = 212,5 \frac{U^2 d}{\rho l^2}. \quad (9)$$

Соответственно для ленты:

$$t = \frac{m}{(m+1)} \frac{U^2 a}{2 \rho l^2 \alpha}, \quad (10)$$

здесь

$$t \text{ в } ^\circ\text{C}, U \text{ в } V, d \text{ в } \text{мм}, \rho \text{ в } \frac{\Omega \text{ мм}^2}{\text{м}}, l \text{ в } \text{м} \text{ и } \alpha \text{ в } \frac{\text{Cal}}{^\circ\text{C м}^2 \text{ч}}.$$

Из формулы (9) следует, что накал проводников при неизменном напряжении прямо пропорционален диаметру (рис. 3). Построение рис. 3 выполнено для длины 40 м. Температурный коэффициент нихрома строго учтен (как и повсюду ниже).

На основании той же формулы составлены графики рис. 4 и 5. Они могут служить для упрощенных тепловых подсчетов.

Кривые построены для свободного излучения. Поэтому при подсчете нагревателей для полузакрытых и закрытых камер следует вводить к температуре поправочный коэффициент от 0,4 до 0,7.

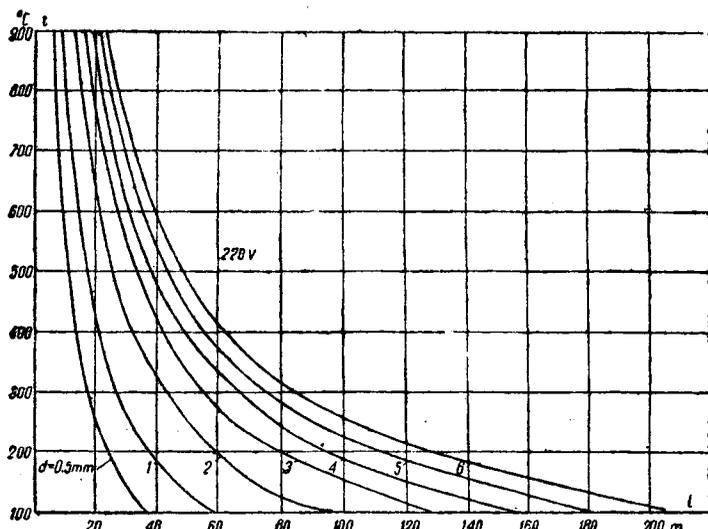


Рис. 4

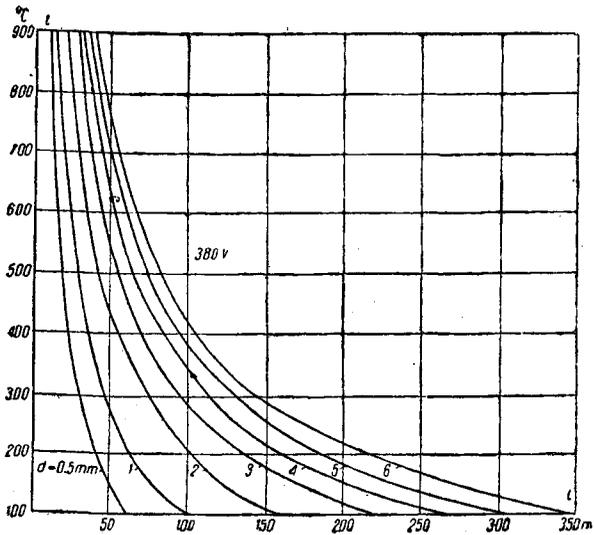


Рис. 5

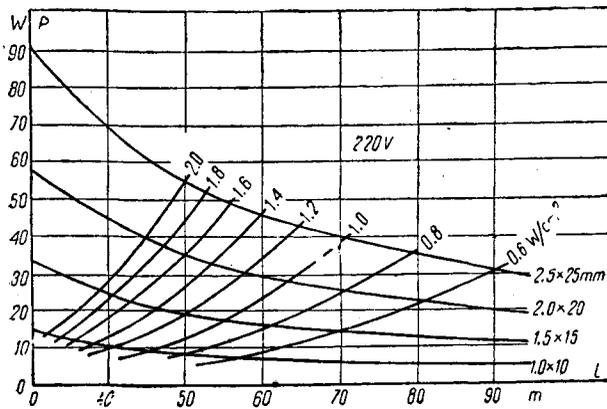


Рис. 6

Совершенно тождественные графики можно построить и для ленты. Однако прямоугольное сечение применяется главным образом в мощных установках, где решающим показателем служит величина удельной нагрузки поверхности (от  $3 \text{ W/cm}^2$  при  $600^\circ\text{C}$  до  $0,8\text{--}1,0 \text{ W/cm}^2$  при  $1000^\circ\text{C}$ ), поэтому более интересно графически связать удельную нагрузку с мощностью, выделяемой в нагревателе.

Это сделано на рис. 6 и 7 для ленты с отношением ширины к толщине, равным десяти. Для построения графиков использованы следующие простейшие формулы:

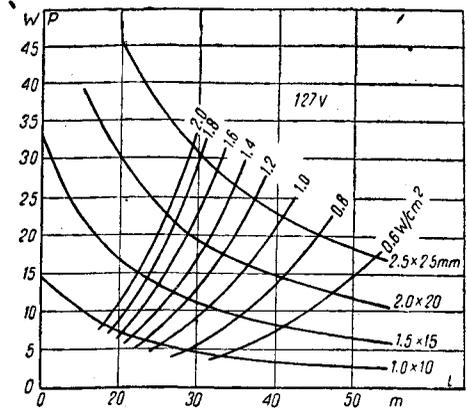


Рис. 7

напряжение 220 V

$$P = \frac{440a^2}{l}; \quad l = \sqrt{\frac{2000a}{\vartheta}} = 47 \sqrt{\frac{a}{\vartheta}}; \quad (11)$$

напряжение 127 V

$$P = \frac{146,7a^2}{l}; \quad l = \sqrt{\frac{666,7a}{\vartheta}} = 25,8 \sqrt{\frac{a}{\vartheta}}. \quad (12)$$

Пример. Задано: температура сопротивления  $900^\circ\text{C}$ , мощность печи  $30 \text{ kW}$ . Напряжение  $220 \text{ V}$ . Подобрать нагреватель, если  $\vartheta = 1,0 \text{ W/cm}^2$ . По кривым рис. 6 находим, что сечение ленты —  $2 \times 20 \text{ mm}$ , а длина ее —  $65 \text{ m}$ .

В заключение приведем зависимости, связывающие  $t$  с  $U$  и  $\delta$  одновременно:

$$t = 67,5 \frac{\delta U d}{a l}; \quad (13)$$

лента

$$t = \frac{m U a \delta}{2(m+1) l a}. \quad (14)$$

При  $m$ , равном десяти, последняя формула принимает следующий вид:

$$t = 0,45 \frac{U a \delta}{l a}. \quad (15)$$

#### Литература

1. Тен-Бош, Теплопередача.
2. Паткис, Промышленные электропечи.
3. Тринкс, Промышленные печи, ч. 2.
4. Сибилев, Электрические печи.
5. Знамеровский, Лабораторные электропечи. Ж. „Металлург“ № 4, 1931.
6. СЭТ, т. IV.

## Рассмотрение вопроса об электромагнитных единицах в Академии наук СССР

Комиссия по единицам мер Академии наук СССР (Отделение технических наук, Группа технической физики. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4), работающая под председательством члена-корреспондента М. А. Шателена, занималась в 1936—1937 гг. рассмотрением вопросов, связанных с теми изменениями в системе электромагнитных единиц, которые были поставлены на международное обсуждение. В итоге комиссия выступила с двумя определенными предложениями:

1. В системе MKS (Джорджи), выдвинутой Международной Электротехнической комиссией, выбрать в качестве четвертой единицы (которая была фиксирована) единицу магнитной проницаемости, составляющую  $10^7/4\pi$  от магнитной проницаемости пустоты. Получающаяся при этом система с четырьмя основными единицами: m, kg (масса), sec и единица магнитной проницаемости, является абсолютной практической системой единиц.

2. Принять указанную выше систему единиц в

«рационализованной» форме, предполагающей «рационализованную» форму системы уравнений в учении об электричестве (отсутствие множителя  $4\pi$  в уравнениях, выражающих закон пол-

ного тока  $\oint H dl = \Sigma i$  или  $\Sigma Hl = \Sigma aw$ , теорему

Гаусса  $\oint D ds = \Sigma q$  и т. п.).

С содержанием первого предложения комиссии можно ознакомиться по статье К. М. Поливанова «О выборе четвертой (электрической или магнитной) единицы в системе MKS», напечатанной в Известиях Отделения технических наук Академии наук СССР, № 2, 1937, стр. 209.

Эти предложения будут обсуждаться на заседании комиссии в декабре 1937 г., в котором приглашаются принять участие электротехники, физики и метрологи, заинтересованные поставленными вопросами.

## БИБЛИОГРАФИЯ

### НОВЫЕ КНИГИ

Глазунов А. А., проф., и Глазунов Е. А., доц., Розанов Г. М., доц., Мельников Н. А., инж. Задачник по местным электрическим сетям. Под ред. проф. А. А. Глазунова. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 208 стр., ц. 3 руб.

Коваленков В. И. Теория передачи по линиям электросвязи. Т. I. Учебное пособие для втузов связи и НКПС. М., Связьтехиздат, 1937, 365 стр. с иллюстр., ц. 11 руб.

Содержание первого тома составляет теория активного и пассивного четырехполюсника. Этот основной раздел вводит учащихся в общую теорию передачи по линиям электросвязи (установившийся режим).

Павловский В. П., Петров И. А., Розанов С. П., инженеры. Электрооборудование текстильных фабрик. Утверждено ГУУЗ НКТП СССР в качестве учебного пособия для текстильных втузов. М.—Л., Гизлегпром, 1937, 487 стр. с иллюстр., ц. 10 р. 15 к., перепл. 1 р. 85 к.

Работа состоит из трех частей. В первой содержится описание электродвигателей и электросетей, их классификация, характеристика, проектирование установок электрического освещения. Во второй — характеристика и устройство электрических приводов для разных отраслей работы фабрик. Третья часть содержит материал по проектированию электросилового оборудования текстильных фабрик.

Пирочкин П. П., проф. Искробезопасные системы электрической сигнализации и связи и воспламенение рудничного газа. Харьков, Гос. научно-технич. изд-во Украины, 1937, 211 стр. с иллюстр., ц. 3 р. 25 к.

Сборник научно-технических статей Харьковского электротехнического института им. П. П. Постышева. Вып. 3, Энергетика. Отв. ред. проф. В. М. Хрущов. Харьков—Киев, Гос. научно-технич. изд-во Украины, 1937, 272 стр., ц. 3 р. 50 к.

В сборник вошло десять статей. Среди них: «Еще о расчете районных сетей с одним пунктом питания» проф. В. М. Хрущова; «Определение напряжения и токо-

распределения в районных сетях» доц. А. Н. Миляха; «Сервисная компенсация реактивности мощных электропередач» доц. Л. В. Цукерника; «Расчет токов однополюсного короткого замыкания методом спрямленной внешней характеристики» инж. Б. Н. Жанколя и Е. В. Хрущова; «Влияние неравенства емкостей конденсаторов на работу генератора импульсов» инж. С. М. Фертик и ряд других.

Хализев Г. П. Конспект курса «Пуско-регулирующая аппаратура». Для студентов специальности электрооборудования промышленных предприятий. М., Изд. Московского энергетического института им. В. М. Молотова. 168 стр. с иллюстр. (на правах рукописи), ц. 5 р. 50 к.

В сжатом изложении дано описание аппаратур различного назначения, методы их работы, схемы и расчеты. В книгу вошли следующие виды аппаратуры: неавтоматического управления моторами; максимально нулевой защиты моторов; электромагнитной автоматики; электронной автоматики; автоматизации процессов ускорения и торможения моторов.

Хенней К. Электронные и ионные приборы в промышленности. Перевод с английского под ред. инж. А. А. Соколова. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для энергетических втузов. М.—Л., Главн. ред. энергетической лит-ры, 1937, 439 стр. с иллюстр., ц. 7 р. 50 к., перепл. 1 р. 50 к.

Книга дает представление о полезности и больших возможностях электронной автоматики, описывает сущность действия приборов, схем включения и методов их использования, содержит много примеров из практики американской промышленности.

Юрковский Е. К. Электрический привод металлообрабатывающих станков. Под ред. проф. С. А. Пресса. Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве учебного пособия для втузов. Л.—М., Главн. ред. машиностроительной и автотракторной лит-ры, 1937, 144 стр. с иллюстр., ц. 2 р. 25 к.

Отдельные главы содержат: основные особенности электрического привода, механические свойства двигателей, выбор мощности, регулирование станков, аппаратуру и схемы управления.

# РЕФЕРАТЫ

Н. Е. М. KENSIT. Новое в методике монтажа мощных гидродерогенераторов. *El. T. Vol. 92, № 2396, 1937*

В апреле 1937 г. оригинальным методом с применением сухого льда был снят с поврежденного вала ротор мощного вертикального гидрогенератора (55 000 kVA,  $\cos \varphi = 0,8$ , 12 kV, 25 Hz, 187,5 об/мин), установленного на гэс Квинстон (Канада). Вал генератора со сквозным центральным отверстием диаметром 0,20 м имеет следующие размеры: длина—9,23 м, диаметр в том месте, где насажена крестовина ротора,—0,82 м. Вес вала 40 т, а общий вес секционированного ротора и вала—307 т.

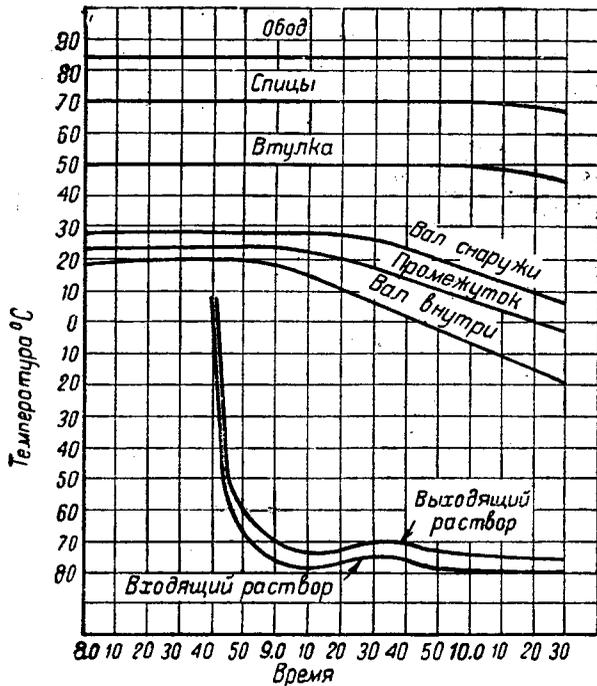


Рис. 1. Приблизительный ход температур при извлечении вала

Предварительные опыты на модели проводились в физической лаборатории Университета в Торонто.

Во время операции ротор поддерживался двумя кранами, каждый грузоподъемностью 150 т. Охлаждающее вещество было приготовлено в стальном баке емкостью 2,85 м<sup>3</sup>, диаметром 1 м и высотой 3,4 м, который содержал 1,35 м<sup>3</sup> алкоголя и 3 т твердой углекислоты в форме блоков, весом по 13,5 кг, уложенных на особой решетке. Вал, ротор и бак были целиком защищены термоизоляцией от влияния наружной атмосферы.

Для циркуляции охлаждающей смеси сквозь полый вал был подготовлен центробежный насос производительностью 750 л в минуту, а для извлечения вала были установлены два 75-т домкрата. Предварительно, в течение 5 дней, ротор нагревался электрической печью мощностью 10 kW, а вал охлаждался посредством циркуляции воды температурой 4°, что создало 22° разности температур между валом и ротором. При этом 200-т усилие все же не могло сдвинуть вал с места.

Затем с помощью циркуляции алкоголя и твердой углекислоты разность температур была доведена до 34°, и вал был сдвинут усилием 150 т. В дальнейшем разность температур достигла 48°, после чего вал стал опускаться только под действием собственного веса. В течение двух часов операция извлечения ротора была закончена.

Н. А. Караулов

KOBER C. Сухие выпрямители большой мощности. Фирменный материал. *Elip A. G. für elektr. Industrie*

Зависимость сопротивления отдельных металлов и контактов между сплавами от направления тока известна около сотни лет. Однако только после империалистической войны 1914—1918 гг. инж. L. O. Grondahl построил меднозакисный

выпрямитель, который удовлетворял требованиям достаточного срока службы необходимой диэлектрической прочностью против пробоя напряжением обратной волны и высокого к. п. д.

В настоящее время сухие выпрямители находят себе применение в радиотехнике, технике связи, измерительной технике, зарядке батарей и т. д. По мере усовершенствования сухих выпрямителей область применения их все расширяется.

На рис. 1 дан общий вид сухого выпрямителя фирмы Elip на 12 V и 1000 А. На этом рисунке: 1 — кожух выпрямителя, 2 — ступенчатый трансформатор для регулировки напряжения, 3 — вентиляторы, 4 — главный трансформатор, 5 — вводы для присоединения трехфазного тока, 6 — шины трехфазного тока низкого напряжения, питаемые от вторичной обмотки трансформатора.

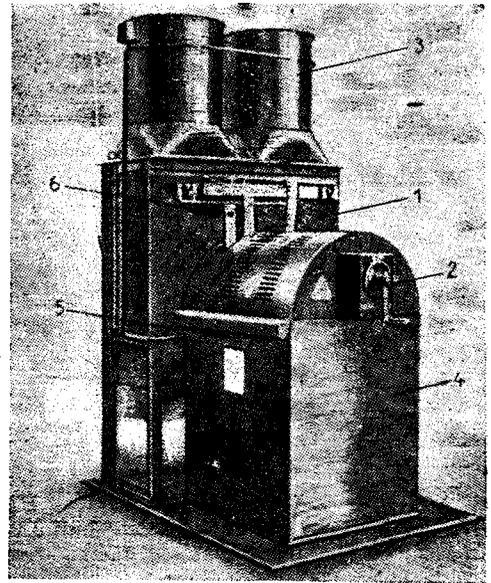


Рис. 1

Каждый элемент меднозакисного выпрямителя состоит из отдельных ячеек, собранных из медных пластин, из коих некоторые имеют медную контактную поверхность, а у других контактная поверхность покрыта закисью меди. Между медными пластинами зажаты тонкие металлические листы для увеличения охлаждающей поверхности и повышения таким образом теплоотдачи. Элемент меднозакисного выпрямителя фирмы Elip изображен на рис. 2.

Путем последовательного и параллельного соединения таких элементов можно составить сухие выпрямители на заданные значения выпрямленного тока и напряжения.

Для питания электрохимических установок и особенно для электролиза металлов, хромирования, никелировки и т. д.

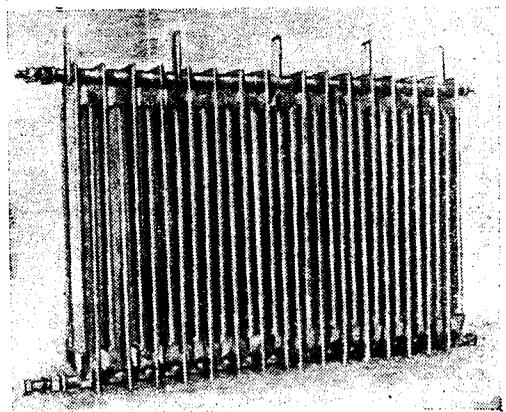


Рис. 2

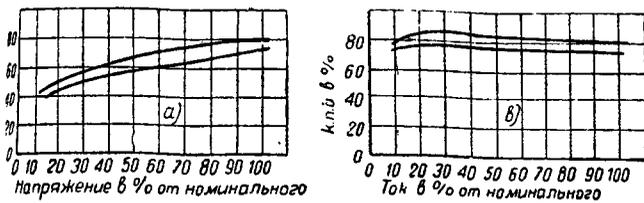


Рис. 3

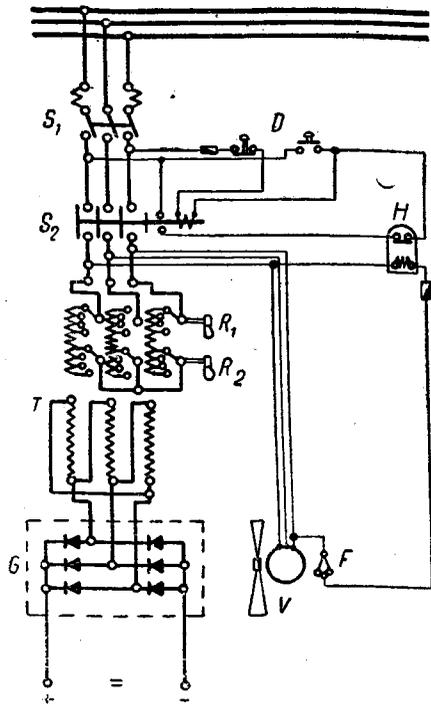


Рис. 4

применение сухих выпрямителей особенно целесообразно, так как для перечисленных производств требуется ток очень большой силы и относительно низкого напряжения. Зависимость к. п. д. сухого выпрямителя от напряжения при постоянстве тока дана на рис. 3, а, зависимость к. п. д. нагрузки при постоянстве напряжения дана на рис. 3, б. Относительно высокий к. п. д. позволит сократить потребление энергии на единицу продукции и снизить установленную мощность трансформаторных подстанций на электрохимических заводах. Другими преимуществами сухих выпрямителей перед мотор-генераторами является отсутствие фундамента, меньшая площадь пола и кубатура здания, более простое обслуживание. Сухие выпрямители не боятся пыли, грязи и повышенной влажности, однако в случае наличия в воздухе паров кислот рекомендуется выносить сухие выпрямители в пристройки.

На рис. 4 дана схема включения сухого выпрямителя фирмы Elin. На этой схеме  $S_1$  — рубильник,  $S_2$  — трехфазный контактор,  $D$  — кнопки управления,  $H$  — промежуточное реле,  $R_1$  и  $R_2$  — переключатели ступеней трансформатора  $T$ , из них один для грубой, а другой для тонкой регулировки выпрямленного напряжения,  $G$  — выпрямитель,  $V$  — вентилятор,  $F$  — устройство, отключающее выпрямитель при остановке вентилятора.

Однотипные сухие выпрямители могут работать параллельно без каких-либо специальных приспособлений. Они могут быть приспособлены для работы на передвижных установках (например в автомобиле) легче, чем какой-либо другой выпрямитель.

В. А. Соловьев

Н. ZIEGLER. Графический расчет электрических полей в сложных коаксиальных цилиндрических конденсаторах. А. ф. Е. № 5, 1937, т. 31, стр. 333

Аналитический расчет полей в цилиндрических конденсаторах с диэлектриком, состоящим из нескольких слоев, обладающих различными диэлектрическими проницаемостями,

довольно сложен, автором разработан простой графический метод расчета.

Для определения распределения напряжений по отдельным слоям, по вертикальной оси (рис. 1) откладываются вниз значения  $p$ , равные для каждого слоя отношению внешнего и внутреннего радиусов, и вверх — значения диэлектрических проницаемостей  $\epsilon$  отдельных слоев. Проницаемость  $\epsilon$  наносится в масштабе обратных значений. Вычерчивается также кривая по уравнению  $C_0 = \frac{1}{2 \ln p}$ . Проводя горизонтально до пересечения с этой кривой на уровне значений  $P$  и нся полученные точки по вертикалям на горизонтальную

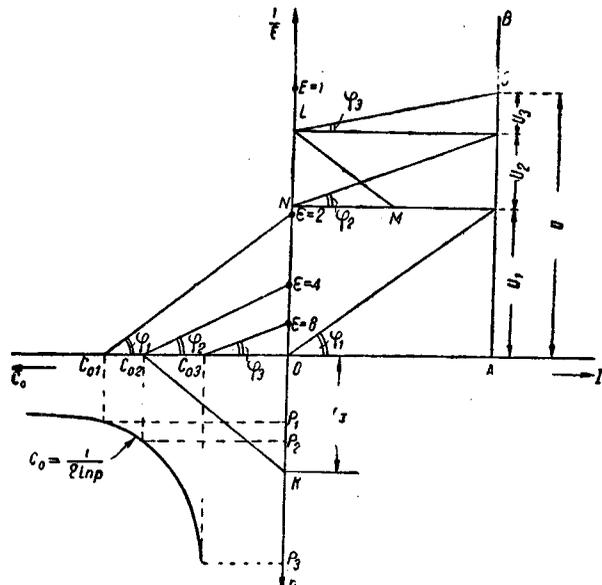


Рис. 1

ось, получаем в некотором масштабе значения емкостей  $C_0$  для каждого из слоев (построение выполнено для случая трех слоев) в предположении, что диэлектрическая проницаемость каждого слоя равна единице. Соединяем теперь прямыми точки  $C_0$  и  $\epsilon$  для каждого слоя. Угол наклона любого ( $i$ -го) слоя  $\varphi_i$  равен  $\arctg \frac{1}{\omega C_i}$ .

Теперь, откладывая по оси токов  $I$  в произвольно выбранном масштабе отрезок  $OA$  и проводя последовательно, как показано на рис. 1, между вертикальной осью и вертикалью  $AB$  отрезки, параллельные отрезкам  $C_{01}\epsilon_1, C_{02}\epsilon_2$  и т. д.,

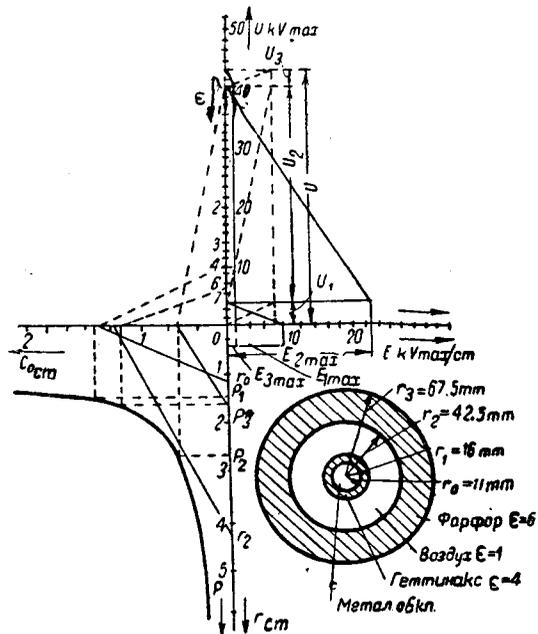


Рис. 2

получаем отрезки, равные напряжениям на отдельных слоях  $U_1, U_2$  и т. д. В том же масштабе отрезок  $AC$  равен полному напряжению  $U$  на всех слоях. Описанный метод является развитием построения, который предложил ранее Schweiger для плоского конденсатора.

Можно также графически определить напряженность поля в любой точке каждого слоя. Для этого по оси  $p$  откладывается расстояние  $r_x$  от оси до точки  $K$ , в которой требуется определить напряженность поля. Точка  $K$  соединяется прямой с точкой  $C_{oi}$  данного слоя (в случае, изображенном на чертеже второго слоя), через точку  $L$  проводим прямую  $LM$  параллельно  $C_{oi}K$ ; отрезок  $NM$  равен искомой напряженности поля  $E_x$ , причем масштаб для определения величины  $E_x$  находится из уравнения

$$\mu E = \frac{\mu_C \mu_U}{2\mu_r}$$

где  $\mu_C$  — масштаб емкостей (1 см =  $\mu_C$  мм);

$\mu_U$  — " напряжений (1 кВ =  $\mu_U$  мм);

$\mu_r$  — " расстояний (1 см =  $\mu_r$  мм);

$\mu_E$  — " градиентов (1 кВ/см =  $\mu_E$  мм).

На рис. 2 дан числовой пример графического расчета проходного изолятора для рабочего напряжения 30 кВ<sub>эфф</sub>. Геометрические размеры, а также материалы и диэлектрические проницаемости отдельных слоев показаны на рисунке. На рисунке даны полученные построением значения напряжений на трех слоях  $U_1, U_2$  и  $U_3$  (построение ведется для амплитудных значений напряжений), а также максимальные значения градиентов  $E_{1max}, E_{2max}$  и  $E_{3max}$  для каждого слоя.

С. А. Яманов

#### Телеуправление осветительными установками. Siemens № 4, 1936

Работа по выбору и детальным испытаниям различных методов телеуправления осветительной сетью была проведена в Потсдаме (Германия).

В результате этой работы была выполнена дистанционная установка, которая находится в эксплуатации с конца 1935 г. Эта установка используется также и для изменения тарифов на электроэнергию с одновременным изменением потребителей об этом.

Применяемые для бытовых целей реле имеют 3-позиционную установку и таким образом могут служить для управления трехтарифными счетчиками. Данные реле малы по габаритам и устанавливаются в нормальном двух-, трехтарифном счетчике, что удешевляет установку. Внешний вид реле изображен на рис. 1.

Общий передатчик рассчитан на мощность 35 000 кВА и на передачу 12 сигналов.

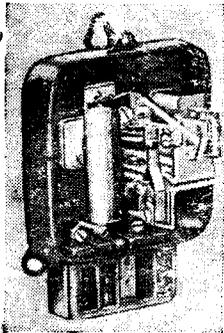


Рис. 1. Теле-реле (форма  $T_a \frac{2}{zb}$ ) для счетчика двойного тарифа

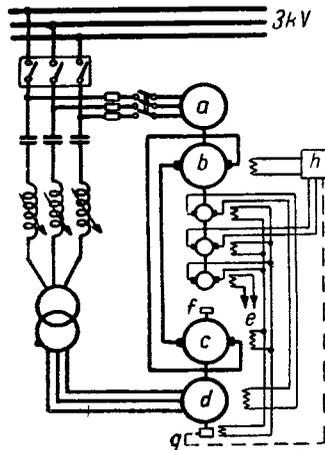


Рис. 2. Основная схема телеуправления в г. Потсдаме.

$a$  — асинхронный мотор;  $b$  — генератор постоянного тока;  $c$  — мотор постоянного тока;  $d$  — трехфазный генератор звуковой частоты;  $e$  — к батареи;  $f$  — выключатель (центробежный);  $g$  — звуковое колесо;  $h$  — регулятор

На рис. 2 приведена основная схема соединений передаточной установки. Мотор  $a$ , питаемый от сети, приводит в действие генератор постоянного тока и три машины возбуждения. Генератор постоянного тока работает с мотором постоянного тока по системе Леонарда, приводящей в действие генератор трехфазного тока звуковой частоты. К нему присоединен, кроме того, небольшой однофазный мотор звуковой частоты, работающий на индикатор точного регулирования числа оборотов для регулирования напряжения генератора постоянного тока, которое, в свою очередь, определяет скорость мотора и таким образом посылаемую частоту. Генератор звуковой частоты работает через трансформатор и масляный вы-

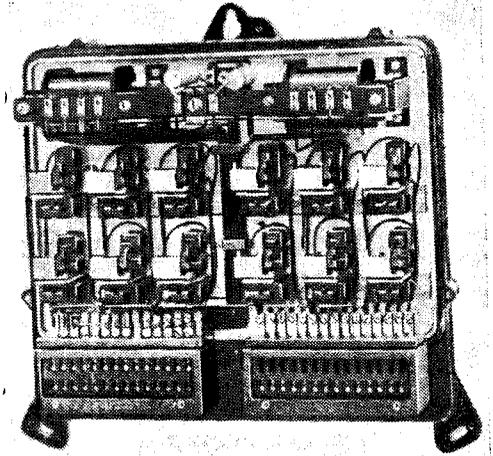


Рис. 3. Теле-резонансный вольтметр распределительного щита

ключатель на собирательные шины, от которой электроэнергия поступает ко всем потребителям. Схема наложения несущей частоты состоит из последовательно включенных конденсаторов и регулируемых дросселей, настраиваемых на резонанс с соответствующей частотой, вследствие чего энергия звуковой частоты почти беспрепятственно проходит через присоединительную цепь в сеть, тогда как вследствие большого емкостного сопротивления конденсатора для частоты 50 Hz обратно из сети в генератор звуковой частоты протекает сравнительно небольшой ток в 50 Hz. Все же протекающий ток 50 Hz достигает 75% максимального тока звуковой ча-

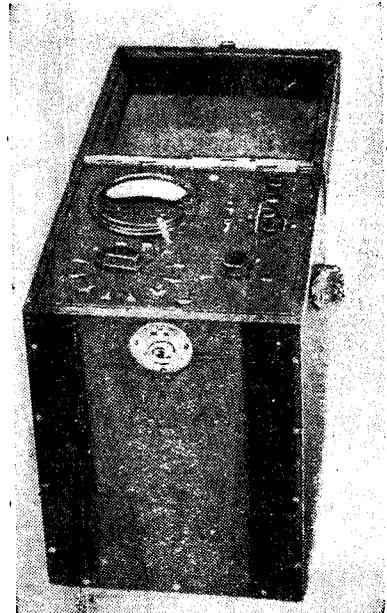


Рис. 4. Теле-резонансный вольтметр переносного типа

поты. Для включения асинхронного мотора имеется воздушный автомат.

Вся установка управляется от 2 распределительных щитов, установленных на контрольной площадке силовой станции. Один щит предусмотрен для обычной автоматической работы.

В центре щита наверху установлена световая доска, непрерывно указывающая положения теле-реле в сети. На щите имеются, кроме того, блинкера для контроля различных рабочих величин, а также нажимные кнопки на случай аварий. Предусмотрено отключение всей автоматики для перехода на ручное управление. Измеритель напряжения звуковой частоты, приключенный непосредственно к собирательной шине через трансформатор напряжения, показывает напряжение собирательной шины. В этом приборе имеется специальное теле-реле для каждого сигнала, показывающее через дифференциальную схему на указательном приборе протекающий в реле ток. Так как ток в реле изменяется в зависимости от частоты, и при собственной частоте реле даст максимальную величину, то прибор показывает резонансное отклонение, максимальная величина которого указывает напряжение при телепередаче. На рис. 3 изображена группа реле измерителя напряжения на распределительном щите. Для измерения напряжения в сети сконструирован по тому же принципу портативный прибор.

Как уже было указано выше, установка работает с сентября 1935 г. для дистанционного включения осветительных уличных установок, причем эксплуатационный опыт показал весьма хорошие результаты и надежную работу оборудования.

С. Н. Макарян

**S. MIYAUCHI. Повреждения бушингов и меры предупреждения их.** ETJ, том I, № 5, 1937, октябрь, стр. 147—151

В реферируемой статье приводятся результаты многолетнего опыта по эксплуатации бушингов в высоковольтной аппаратуре в сети г. Токио. Полное количество бушингов в эксплуатации около 5000, в том числе около 40% конденсаторного типа, 40% фарфоровых, 17% с компаундным наполнением и 3% с масляным наполнением. За период времени с начала 1929 г. по апрель 1936 г. всего имело место 45 аварий с бушингами, в том числе 4 — в закрытых установках и 41 — подавляющее большинство — в открытых установках. По типам бушингов аварии распределялись следующим образом: с бушингами конденсаторного типа — 22, с компаундным наполнением — 15, с масляным наполнением — 3, с фарфоровыми — 5. Наибольшее число всех аварий вызвано поглощением влаги вследствие механических повреждений или старения защитных оболочек; ненормально высокое перенапряжение явилось результатом 8 аварий, утечка масла или компаунда — 3, перегрев вследствие несвершенного присоединения провода — 2; по другим и невыясненным причинам произошло 14 аварий. Значительное уменьшение числа аварий за последние годы вызвано правильной постановкой контроля за бушингами; в частности, своевременное обнаружение увлажнения изоляции дало возможность предупреждения большого числа аварий. Согласно принятым в настоящее время правилам эксплуатации бушинги конденсаторного типа разбираются и исследуются на наличие увлажнения раз в 3 года; бушинги с компаундным наполнением осматриваются раз в 6 лет, причем компаунд удаляется и заменяется новым; в бушингах с масляным наполнением испытание масла производится ежегодно, причем независимо от результатов этих испытаний масло заменяется свежим раз в 10 лет.

Б. М. Тареев

**L. TRIAU. Новый метод определения магнитных свойств железа.** RGE, т. 52, № 9, 28/VIII 1937, стр. 264—268, 6 рис.

Новый прибор, построенный фирмой Сименс и Гальске и названный «феррометр», состоит из механического выпрямителя, комбинированного с устройством для сдвига фаз (рис. 1).

На одном из полюсов постоянного магнита  $P$  расположен небольшой электромагнит  $E$ , индуктирующая обмотка которого питается переменным током от устройства для сдвига фаз  $D$ .

На постоянное поле постоянного магнита накладывается переменное поле, которое при каждом полупериоде тока производит, с одной стороны, ослабление постоянного поля, а с другой стороны — усиление его, так что результирующий магнитный поток замыкается то на пра-

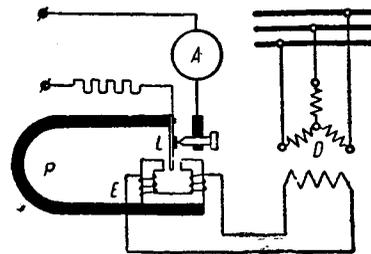


Рис. 1

вой, то на левой стороне электромагнита, увлекая при этом вибрирующую пластину  $L$ ; эта пластинка замыкает таким образом контакт, которым она управляет в течение одного из двух полупериодов и размыкает его в течение другого полупериода. Через амперметр постоянного тока  $A$  проходит ток в течение одного полупериода индуктирующего тока. Если измеряемый ток находится в фазе с этим индуктирующим током, контакт дает возможность проходить всем положительным или отрицательным полупериодам в зависимости от выполненного соединения, и тогда амперметр дает полное отклонение. Если фаза сдвинута на  $90^\circ$ , то ток возбуждения сдвинут на тот же угол по отношению к измеряемому току, и контакт тогда при всяком замыкании пропускает положительный и отрицательный полупериод, которые взаимно уничтожаются, и прибор показывает нуль. Для положения сдвига между  $0$  и  $90^\circ$  амперметр дает все промежуточные значения, и результаты получаются таким образом весьма хорошими. Впрочем, сам по себе прибор по принципу стоит выше статических выпрямителей, вроде купроксов. Точность прибора — достаточная для измеряемых целей. Но ввиду некоторой механической инерции вибрирующих пластин он может быть использован для частот до 1000 Hz, а вообще его используют для частот между 25 до 150 Hz для изучения свойств железа, что собственно и требуется. Общая схема соединения феррометра дана на рис. 2. Принцип действия его довольно прост. На испытуемый образец наматываются две об-

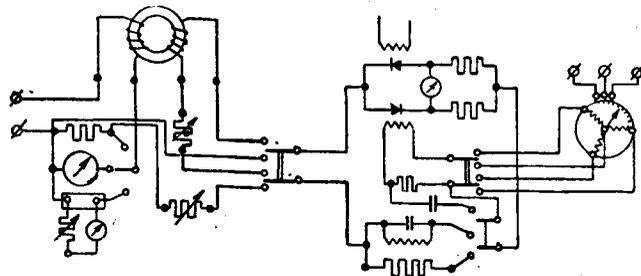


Рис. 2

мотки — первичная и вторичная, и магнитные свойства этого образца выводятся из измерений, сделанных над током, протекающим в первичной обмотке и над напряжением, индуктируемым этим током во вторичной обмотке. Образец может иметь форму тороида или просто бруска весом соответственно в 50 г и 20 г. Так как потребление измеряемого прибора должно быть очень мало, то прибегают к выпрямителю, который дает возможность использовать для измерений прибор с рамкой, потребление его меньше, чем таковое прибора переменного тока. Рамка прибора не поворачивается на оси, но подвешена как в гальванометре, и отклонения даются не перемещением стрелки, а светящимся «зайчиком» на шкале прибора.

Феррометр дает возможность измерять значения активных и реактивных составляющих магнитизирующего тока и, кроме того, дает значения следующих величин: вторичного напряжения, эффективного вторичного тока в случае синусоидальной и несинусоидальной кривой и сдвиг фаз между напряжением и током; имея остальные нужные данные образца, можно вывести максимальное значение индукции, активную мощность, потребляемую одним килограммом образца, проницаемость и эффективную проницаемость его.

Еще предусмотрено комбинированное использование феррометра с регистратором координат, что дает возможность заснять на фотобумагу кривые гистерезиса изучаемого образца железа в течение 30 сек, так же как и кривые магнитизирующего тока.

Л. Г. Брауде

W. WILSHAUS. Новый регулятор напряжения. Die El.-W. № 19, 1937

Новая конструкция отличается от всех ранее выполненных отсутствием реле в автоматике регулятора.

Это дает большие преимущества в смысле надежности работы.

На рис. 1 представлена схема такого автомата для тока 50 А.

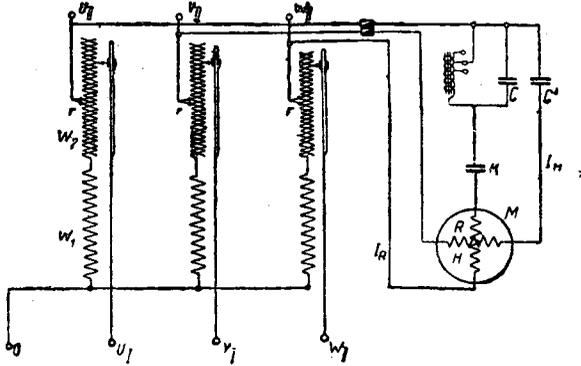


Рис. 1

В устройство входит трансформатор, состоящий из обмоток возбуждения  $W_1$  и регулирующих обмоток  $W_2$ . Первые намотаны так, что могут по потребности включаться на 220 или 380 В.

Регулирующая обмотка — однослойная, двухходовая. С одной стороны регулировочных обмоток снята узкой полосой изоляция для передвижения контактных ползунков, к которым подводится напряжение  $U_1$ ,  $V_1$  и  $W_1$ .

Цель регулируемого напряжения  $U_{II}$ ,  $V_{II}$ ,  $W_{II}$  приключается к середине регулирующих обмоток через два сопротивления  $r$ , равных  $0,01 \Omega$ . Эти сопротивления служат для предупреждения появления значительных токов при замыкании подвижным контактом рядом лежащих витков. Напряжение, соответствующее одному витку, равно 1 В; поэтому наибольший ток, возникающий при замыкании двух витков, лежащих рядом, при таком устройстве, если пренебречь сопротивлением самой обмотки, будет:

$$I_A = \frac{1}{2 \times 0,01} = 50 \text{ А.}$$

Если регулируемое и подведенное напряжения одинаковы, то ползунки находятся на высоте сопротивлений  $r$ , и ток переходит из подходящей цепи в отходящую, без изменения напряжения.

При разности напряжений ползунки занимает такое место, чтобы на регулируемой стороне получить нужное напряжение.

Отсюда видно, что потери в обмотке регулятора зависят от положения ползунков.

Они составляют для крайнего регулировочного положения и номинального тока около 270 Вт.

Автоматическое регулирование на нужное напряжение происходит при помощи устройства, показанного на рис. 1. Двухфазный индукционный мотор  $M$  с короткозамкнутым ротором соединен посредством шнекового редуктора и шпинделя с регулируемыми ползунками.

Обмотка  $R$  статора мотора включена через искусственную схему, состоящую из параллельно соединенных дроссельной катушки и конденсатора. Характеристики этой цепи мотора подобраны таким образом, что при определенном заданном напряжении  $U_0$  ток  $I_R$  противоположен по фазе току  $I_H$ . При этом мотор неподвижен. При изменении напряжения сдвиг между этими токами изменится (работа дроссельной катушки соответствует криволинейной части кривой намагничивания), что вызовет вращение мотора вправо или влево, в зависимости от характера изменения напряжения до тех пор, пока не восстановится нужное напряжение.

Выполненная конструкция АЕГ имеет быстроту регулирования примерно 2 В/сек.

Величина ошибки до 1%.

Регулятор переносит без повреждения 30-кратный ток короткого замыкания.

В. М. Файницкий

J. NYST. Развитие троллейбусного транспорта в Льеже. Verkehrstechnik № 13, 1937 (1 июля), стр. 331—336

Наличие в Льеже (Бельгия) узких улиц и крутых поворотов при насыщенности улиц автотранспортом заставило перейти от трамвая к троллейбусам на многих центральных улицах и на мало загруженных загородных линиях. Динамика развития городского электротранспорта в Льеже видна из табл. 1.

Таблица 1

| Годы           | Длина линий, км |             |       |
|----------------|-----------------|-------------|-------|
|                | трамвая         | троллейбуса | всего |
| 1930 . . . . . | 68              | —           | 68    |
| 1931 . . . . . | 68              | 3           | 71    |
| 1934 . . . . . | 65,3            | 26,8        | 92,1  |
| 1936 . . . . . | 65,3            | 28          | 93,3  |
| 1937 . . . . . | 45,5            | 51,8        | 97,3  |

Из таблицы видно, что уже в начале 1937 г. протяжение троллейбусной сети превысило протяжение трамвайной.

Семилетний опыт эксплуатации троллейбусов позволил не только уточнить область технически и экономически целесообразного применения этого вида городского транспорта, но и выработать рациональный тип подвижного состава и способов эксплуатации контактной сети.

В Льеже отдали предпочтение двухосному троллейбусу средней вместимости со сварным кузовом и компаундным двигателем. Эксплуатация контактной сети троллейбуса первые два года причиняла много хлопот. В настоящее время правильной организацией ночного осмотра контактной сети и смазыванием провода густой смазкой с графитом аварийность и чрезмерный износ устранены. В Льеже наблюдается повышенный износ отрицательного провода, как видно из табл. 2, дающей картину износа проводов троллейбусной сети.

Таблица 2

| Год замера                                | 1934  | 1935          | 1937          |
|---|-------|---------------|---------------|
| Число проходов токоприемника . . . . .    | 0     | 200 000       | 420 000       |
| Полярность провода . . . . .              | ±     | +   -         | ±   -         |
| Толщина провода (в среднем), мм . . . . . | 8,65  | 8,50   8,48   | 8,37   8,30   |
| Ширина провода (в среднем), мм . . . . .  | 12,65 | 12,73   12,43 | 12,72   12,68 |

Таким образом средний износ по толщине положительного провода при 420 000 проходах токоприемника составляет 0,28 мм, а отрицательного соответственно 0,35 мм, что нельзя признать чрезмерным даже для трамвайных условий. Опыты со смазкой контактных проводов показали также снижение троллейбусных радиопомех в результате смазки.

В. А. Соловьев

Электрификация горной дороги. Electric Railway Traction, апрель 30 1937, стр. 880—881

Электрификация зубчатой железной дороги Pilatus (в Швейцарии) к настоящему времени закончена. Это самая крутая в мире дорога с максимальным уклоном в 48% (1:2,1), минимальным в 19% (1:5,3) и средним около 40% (1:2,5).

Трехфазный ток 50 kV, получаемый от центральной швейцарской силовой станции, преобразуется в постоянный ток

1550 V на подстанции в Альпнахштад, который и питает контактную сеть.

Подстанция оборудована аппаратурой Броун-Бовери и содержит два 600-кВ ртутных выпрямителя.

Контактный провод сечением 107 mm<sup>2</sup> подвешен через каждые 12 м к бронзовому несущему тросу сечением 70 mm<sup>2</sup>. Укрепленный на опорах медный фидер сечением 180 mm<sup>2</sup> тянется от подстанции до вершины горы. Расстояние между мачтами на прямых участках — 60 м, на кривых же применена наклонная подвеска системы Figger и Frey, что уменьшает количество опор, которые были бы необходимы при обычной подвеске, и устраняет необходимость в промежуточных опорах. Автоматическое натяжение контактной линии достигается (через 750—900 м) грузовыми компенсаторами. Высота контактного провода над головкой рельса — 4,4 м на открытой части, а в туннелях — 3,7 м.

Механическая часть вагонов изготовлена фирмой Swiss Locomotive, электрическая же — фирмой Oerlikon. Вагон на 40 мест весит 10 т, из коих 3,3 т падают на электрооборудование. Полная длина вагонов — 11 м; колесная база — 6,9 м. Нормальная скорость 7,7 км/ч, максимальная же — 12 км/ч. Два мотора общей мощностью 210 л. с. приводят в движение два зубчатых колеса на нижнем конце вагона. Верхний конец вагона приспособлен для торможения, которое установлено двойным: обычное — автоматическое и ручное и рекуперативное.

При электрификации время, нужное для поездки в любом направлении, сократилось с 75 до 30—40 min.

М. Д. Трейвас

#### Иностранные патенты в области электроматериалов. Chemisches Zentralblatt № 1—5, 1937

Электроизоляционные материалы. Франц. патент 800518, принадлежащий General Motors Corp., предусматривает способ получения плотного, прозрачного, изоляционного материала с гладкой поверхностью, обладающего высокой жаростойкостью и пригодного для применения в зажигательных свечах двигателей внутреннего сгорания и в других аналогичных случаях. Оксиды металлов — алюминия, тория, бериллия, магния, циркония, титана, ванадия и пр. — смешиваются со связующими смолами, например, бакелитом, прессуются в форме при 700 kg/cm<sup>2</sup> и подвергаются прогреву для удаления связующего; затем следует окончательная прессовка при давлении 1750—7000 kg/cm<sup>2</sup> и обжиг.

Способ, изложенный в англ. патенте 449955 и во франц. патенте 800979, принадлежащих Standard Telephone and Cables Ltd. и Material Téléphonique Société Anonyme, служит для повышения диэлектрических свойств органических волокнистых материалов (шелк, шерсть и пр.). Этот способ заключается в обработке волокна дубильными веществами, как ковы HCHO и танин, нафтосульфоновой кислотой, ангидридами кислот жирного ряда и тому подобными веществами, с последующей промывкой и просушкой. Целесообразно после обработки танином или тому подобным волокна еще подвергать ацетилюрованию.

Способ AEG (англ. патент 445839) предусматривает получение хорошо пристающих к основе эластичных и медленно стареющих изоляционных лаков, а также пропиточных материалов из клея или желатина посредством растворения их в алифатических или ароматических спиртах и добавления фенолальдегидных, глифталевых или карбамидаальдегидных смол.

Standard Oil Co получила патент (америк. патент 2050428) на получение хорошо пристающего к металлам изоляционного воска из сырого нефтяного воска посредством растворения в этилендихлориде, смеси ацетона и бензина или т. п. и повторного охлаждения и центрифугирования.

Маслостойкий изоляционный материал согласно герм. патенту 635536, принадлежащему AEG, получается смешением продуктов конденсации многоатомных спиртов и многоосновных кислот с каучуком, получаемым выпадением из растворов, суспензий или эмульсий.

Cellulosefabrik Balsthal предлагает повысить пробойную крепость и стабильность таких материалов, как искусственные и естественные волокнистые материалы, бумаги, производные целлюлозы, керамические материалы, смолы, лаки и масла, посредством введения 0,1—2% коллоидного графита, алюминия, цинка и тому подобных материалов, теплопроводность которых больше теплопроводности основного материала (шведск. патент 183770).

Материал, сохраняющий хорошие электроизоляционные свойства при высоких температурах, применимый при вы-

соких частотах и стойкий к резким перепадам температуры запатентован British Thomson-Houston Co (англ. патент 452856). Это — спеченная смесь весьма чистых оксидов магния (около 80%) и бериллия (около 20%).

Патент W. Ruppert англ. патент 450230) предусматривает способ получения стекловидных изоляционных материалов с высокой прочностью и эластичностью из продуктов полимеризации винилацетата и эстеров акриловой кислоты.

Америк. патент 2039837 (Armour and Co) описывает получение изоляционных материалов со структурной формулой R—CO—R', где R есть карбоциклический или гетероциклический радикал, например арил, а R' — алкил, содержащий по крайней мере 11 атомов углерода, например гептадецил.

Герм. патент 626385, принадлежащий AEG, касается способа изготовления материала для распределительных щитов посредством смешения высыхающих масел и копалов с асфальтом с добавкой сиккатива, например линолеата марганца, прогрева при 230° около 12 h, последующего добавления жирной кислоты и смешения с конденсационной смолой; 19 частей смеси перемешиваются с 80 частями асбеста и 30 частями портланд-цемента, прессуются и запекаются при давлении 150—600 kg/cm<sup>2</sup> и температуре 65—115° C.

Фирма Siemens-Schuckert запатентовала способ получения пазовой изоляции в электрических машинах посредством обмотки проводников тонкими полосками соответствующей формы из алюминия, покрытыми оксидной изоляцией и лаком или же слюдой, нитроцеллюлозой или ацетилцеллюлозой. Подобная изоляция дает значительную экономию места в пазу.

Проводниковые материалы и материалы с сопротивлений. E. W. Bremer предложил проводниковый материал высокой механической прочности и тепловой стойкости: сплав серебра с 0,5—3% бериллия и 0,5—1% хрома (америк. патент 2046056).

C. Lubben (герм. патент 637746) в качестве материала высокого сопротивления, высокой стабильности и термостойкости предлагает двусернистый молибден MoS<sub>2</sub>, запресовываемый между металлическими обкладками.

Фирма Siemens-Halske получила герм. патент 625847 (изобретатель R. Reichmann) на способ получения нагревательного сопротивления для высоких температур. Проволока из сплава сопротивления располагается в полой теле из спеченного оксида алюминия, магния, бериллия и т. п.; вводы проволоки герметически запаиваются стеклом типа молибденового или твердого калийного стекла.

Способ изготовления электрических сопротивлений фирмы Stemag (англ. патент 801922) заключается в смешении искусственной смолы с тонкоизмельченными проводящими или полупроводящими веществами и в прессовании смеси в формах в присутствии катализаторов полимеризации, как-то: соляная кислота, гидрат аммония, бензоат натрия или т. п.

Высокоомные сопротивления по способу Radio Corp. of America (канадск. патент 357648) получают смешением порошков стекла и графита и обжигом до спекания стекла. Может также применяться смесь свинцового сурика, борной кислоты, карбоната лития, кварца и графита, с небольшой добавкой глицерина и спирта. Эта смесь после нанесения на изолирующее основание сушится и прогревается примерно 20 min при температуре 400—500°.

Электролитические конденсаторы. Патентная литература по электролитическим конденсаторам и выпрямителям чрезвычайно обширна. Рассматриваются новые конструкции, материалы для электродов, электролиты и т. п. Здесь мы упоминаем только два патента, касающихся выбора материалов для электродов электролитических конденсаторов.

Фирма Plessey Co запатентовала применение для электродов конденсатора вместо чистого алюминия — алюминия с добавкой тантала в количестве до 2%, что согласно англ. патенту 449645 повышает допустимое напряжение.

J. D. Edwards получил америк. патент 2043038 на применение для той же цели вместо чистого алюминия обычного торгового алюминия с добавкой около 0,2% титана. Алюминий с этой добавкой может заменять алюминий высшей степени чистоты, применяемый для электролитических конденсаторов.

Электрические кабели. Фирма British Thomson-Houston Co запатентовала способ антикоррозийного покрытия кабельной брони составом из продуктов полимеризации акриловой кислоты или ее эстеров, в особенности акрилоэтилового эстера, в смеси с мелким кварцевым порошком и примерно 0,5% альфанафтола (англ. патент 450802).

Та же фирма получила патент (англ. патент 450805) на высоковольтный кабель, в котором жила покрывается плотным слоем полимеров акриловой кислоты или ее гомологов или производных со смягчителями, например хлордифенилом, и проводящим наполнителем, например порошком графита. Поверх этого слоя уже накладываются обычная пропитанная волокнистая изоляция и свинцовая оболочка.

Фирма Aрасonda Wire and Cable Co в своем америк. патенте 2047271 предусматривает способ изолирования кабеля посредством наложения на жилу пропитанной асфальтом волокнистой изоляции, а сверху нее — каучукового слоя, получаемого осаждением из водной суспензии коллоидально измельченных каучука, синтетического каучука, регенерата или балаты (возможно в смеси со смолами), с добавкой сильнодействующего ускорителя вулканизации, например ксантата цинка. Такой кабель подвергается вулканизации при температуре, лежащей ниже точки плавления асфальта.

Кабельная изоляция по англ. патенту 450631 фирмы Liverpool Electric Cable Co состоит из слоя хлорированных органических соединений, покрытого оболочкой из волокнистых материалов — преимущественно асбеста — с пропиткой веществами, выделяющими при нагреве газы, препятствующие горению. В качестве пропиточных средств могут быть использованы силикаты, эстеры целлюлозы, смолы, каучук,

желатин, казенн, крахмал и декстрин. Такой кабель, изобретенный А. Е. Hughes, практически негорюч.

Изоляция для кабелей, разработанная фирмой I. G. Farbenindustrie, состоит из смеси полимеров винилхлорида и эстеров акриловой кислоты и высших алифатических спиртов и гидроароматических спиртов. Повышение содержания в смеси винилхлорида увеличивает твердость, негорючесть и стабильность материала, в то время как при возрастании содержания эстеров повышается механическая прочность и пластичность. Для повышения стойкости к действию тепла и света рекомендуется добавка нескольких процентов метакриловых эстеров и обработка полученных продуктов нагревом с разбавленным водным раствором щелочи (франц. патент 82196).

Фирма Polskie Fabryki Kabli i Walcownie Miedzi Spol/ka Аксуяла разработала теплостойкую изоляцию для кабелей (польск. патент 22261), состоящую из слоя асбеста, пропитанного теплостойкими глифталевыми или фенольноальдегидными смолами. Для придания изоляции гибкости применяются пластификаторы, например трикрезилфосфат, трифенилфосфат, диалкиловый эстер фталевой или янтарной кислоты и этиловый или бутиловый эстер абиетиновой кислоты.

Б. М. Тареев

## СОДЕРЖАНИЕ

|  | Стр. |
|--|------|
| Заседание Петроградского Совета Р. и С. Д. 7 ноября (25 октября) 1917 г. . . . .   | 1    |
| <i>Парецкий М. И.</i> — Коммутационный метод в автоматике . . . . .  | 2    |
| <i>Стецула И. В.</i> — Метод фиктивной нагрузочной диаграммы . . . . .   | 11   |
| <i>Пашин М. Ф.</i> — Как рассчитать кенотронную установку . . . . .  | 15   |
| <i>Левин М. И.</i> — Комплексная погрешность измерительных трансформаторов . . . . .   | 17   |
| <i>Солтамов Б.-С. Д.</i> — Экспериментальное исследование колебаний шин и изоляторов . . . . .                                     | 21   |
| <i>Розенберг Б. И. и Костенко М. В.</i> — Вычисление токов короткого замыкания методом двух и трех точек . . . . .                 | 26   |
| <i>Семенов П. А.</i> — Ртутно-струйный турбинный выпрямитель . . . . .   | 35   |
| <i>Телем'вский Б. Е.</i> — Использование индуктивного ваттметрового прибора для автоматического пуска синхронного мотора . . . . . | 39   |
| <i>Аносоз В. Н. и Ключин Г. В.</i> — Практический расчет электроннагревателей . . . . .  | 40   |
| <i>На обложке</i> — плакат Изогиза к избирательной кампании (газет. „Известия“ от 12 ноября 1937 г. № 253) . . . . .               |      |

### ИЗДАТЕЛЬ ОНТИ

Технический редактор А. П. Александрова  
Зав. ред. М. Г. Башкова

Отв. редактор Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

Сдано в набор 15/XI 1937 г. Подп. к печати 18/XII 1937 г. Стат. ф. 226 × 293 Печ. л. 7. У. а. л. 9,1 Печати. зн. в листе 78 800

Уполн. Главлита Б-34169. 1-я Журн. тип. ОНТП НКТП СССР. Москва, Денисовский пер., 30. Заказ 2476. Тираж 9675

## Сплавы для сопротивлений

### Манганин

для измерительных инструментов,

удельное сопротивление 0,43 ома, температурный коэффициент  $\pm 0,00001$ , термическая сила (по сравнению с медью) + 1 микровольт на  $1^\circ \text{C}$ .

Оба сплава содержат от 12 до 13% марганца, вырабатываемого в Дилленбурге из лучшего советского железняка Изабелленхютте в течении почти 50 лет является единственным производителем сплава манганин, широко употребляемого на всем свете, а также в СССР для прецизионной измерительной техники.

Нововыпущенный сплав Изабеллин жароупорен до  $600^\circ$  и широко употребляется для сильно нагруженных технических сопротивлений и пусковых реостатов.

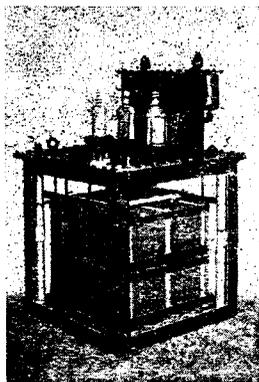
**ISABELLEN-HUTTE / HEUSLER K. G. / DILLENBURG (ГЕРМАНИЯ)**

6741

### Изабеллин

свободный от никеля сплав для технических сопротивлений,

удельное сопротивление 0,50 ома, температурный коэффициент — 0,00002, удельный вес 7,9—8.



Высоковольтный конденсатор с открытыми боковыми стенками



Высоковольтный конденсатор для 10/20 KV

# AEG

## Конденсаторы

для

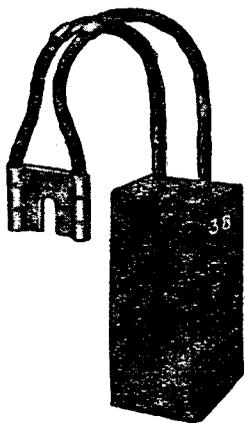
### сетей и заводских установок

Наибольшая выполненная установка 23400 KVA

# Allgemeine Elektrizitäts - Gesellschaft

Abt. Rußland — Berlin NW 40

1741

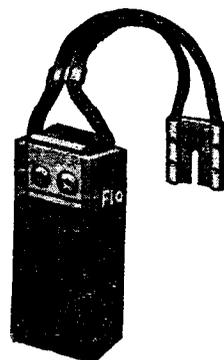


# SCHUNK & EBE

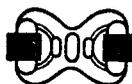
## GIESSEN (Германия)

Фабрика угольных щеток и щеткодержателей

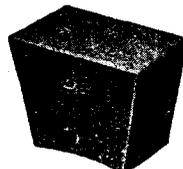
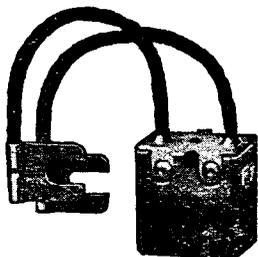
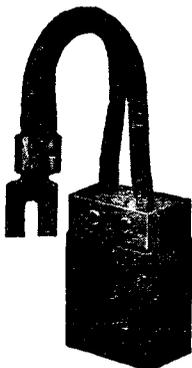
Мы являемся между прочим постоянным поставщиком всех сортов и качеств изображенных в настоящем объявлении угольных щеток для советских промышленных предприятий



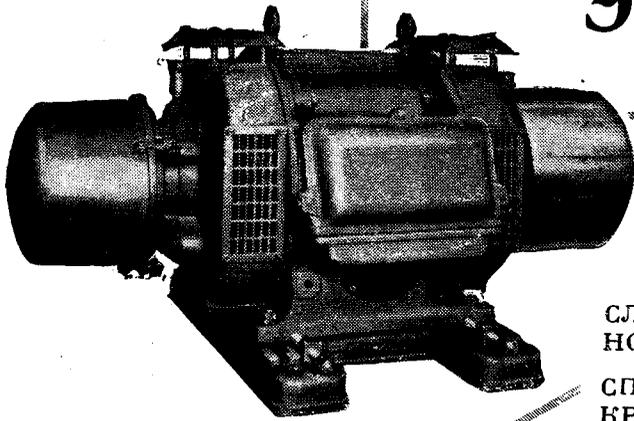
Наша фабричная марка



гарантия высокого качества



# ЭЛЕКТРОМОТОРЫ ВСЕХ ТИПОВ



СЛЕВА МОТОР ЗАЩИЩЕ-  
НОГО ТИПА НА САЛАЗКАХ

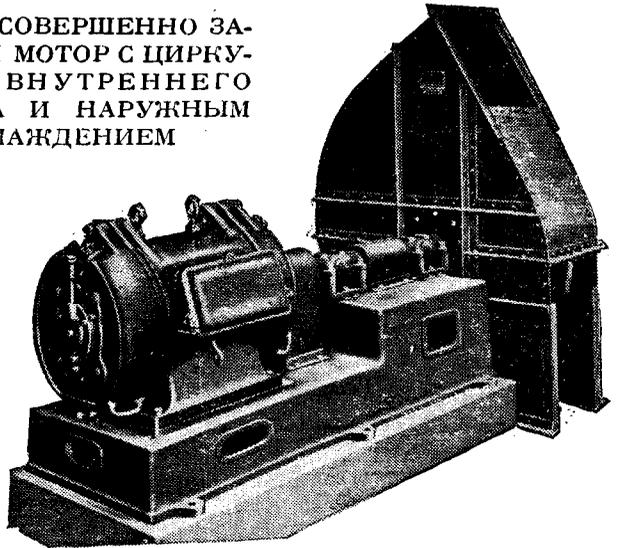
СПРАВА СОВЕРШЕННО ЗА-  
КРЫТЫЙ МОТОР С ЦИРКУ-  
ЛЯЦИЕЙ ВНУТРЕННЕГО  
ВОЗДУХА И НАРУЖНЫМ  
ОХЛАЖДЕНИЕМ



## МЕТРОПОЛИТЭН Виккерс

ЭЛЕКТР.

АКЦ.О-ВО



## Цекас

**Термо-  
биметалл**

для  
Термостатов  
Выключателей для  
сильных токов  
Автоматических  
регуляторов температуры  
и т.д.

Разные сорта  
проволок и лент

из  
нихрома

для  
сопротивлений

изготавливает из материалов Крупна  
фирма

**C. KUNBIER & SOHN**

DAHLEBRÜCK i. W.

(Германия)

## Мавометр WG пригоден:

в лаборатории,  
для инсталляци-  
онных,  
монтажных,  
кустарных,  
радиотехни-  
ческих и  
научно-исследо-  
вательс. работ

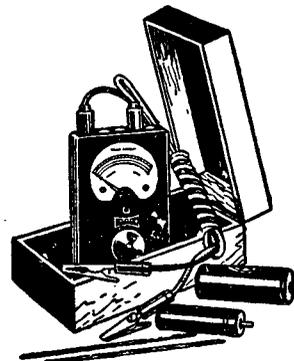
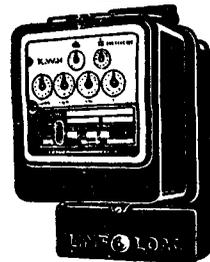
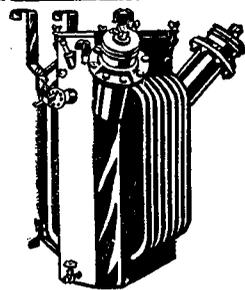
(Обратите внима-  
ние на предыду-  
щие объявления)

6736



**GOSSEN**  
FABRIK ELEKTRISCHER  
MESSGERÄTE  
ERLANGEN/BAYERN

# Ferranti



## МАСТЕРА ЭНЕРГО-СИЛЫ...

Начиная с первой пионерской работы д-ра S. Z. de Ferranti выросла огромная всемирно известная организация электро-трансформаторов, самопишущих измерительных приборов и таких же счетчиков. Имя Ферранти является синонимом того, что есть лучшего в развитии и достижениях электротехники.

**FERRANTI LTD., HOLLINWOOD, LANCs • АНГЛИЯ**

FG 16

809

## N. V. NEDERLANDSCHE KABELFABRIEK

DELFT (Голландия),

◆◆◆◆

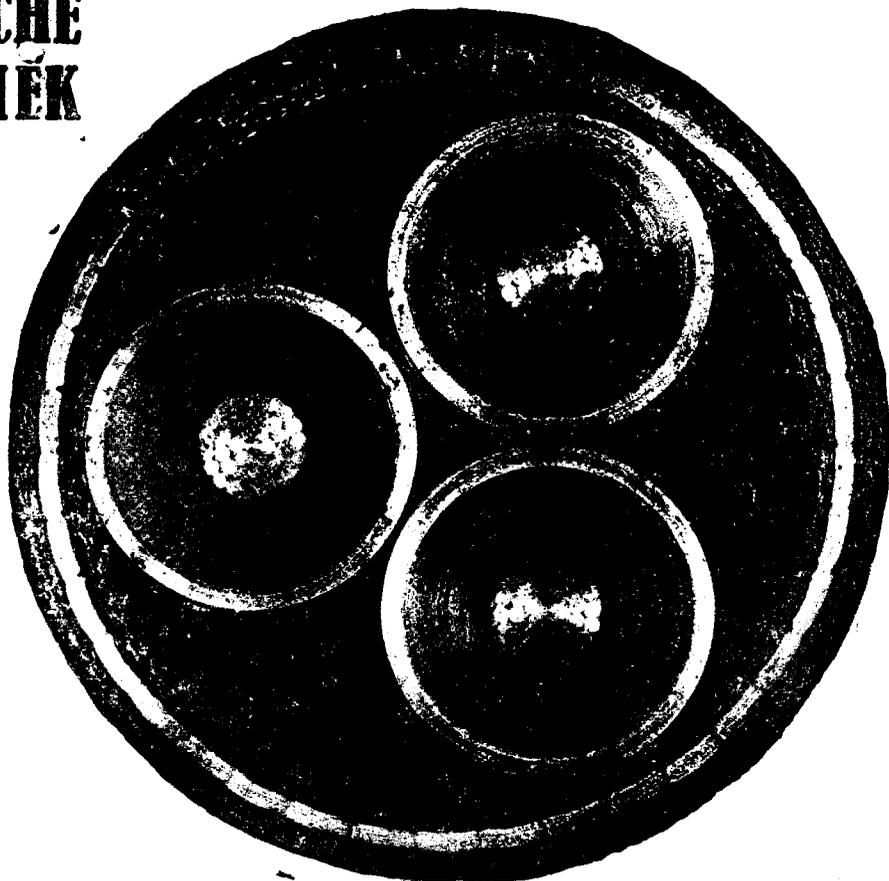
### ПРОИЗВОДИТ:

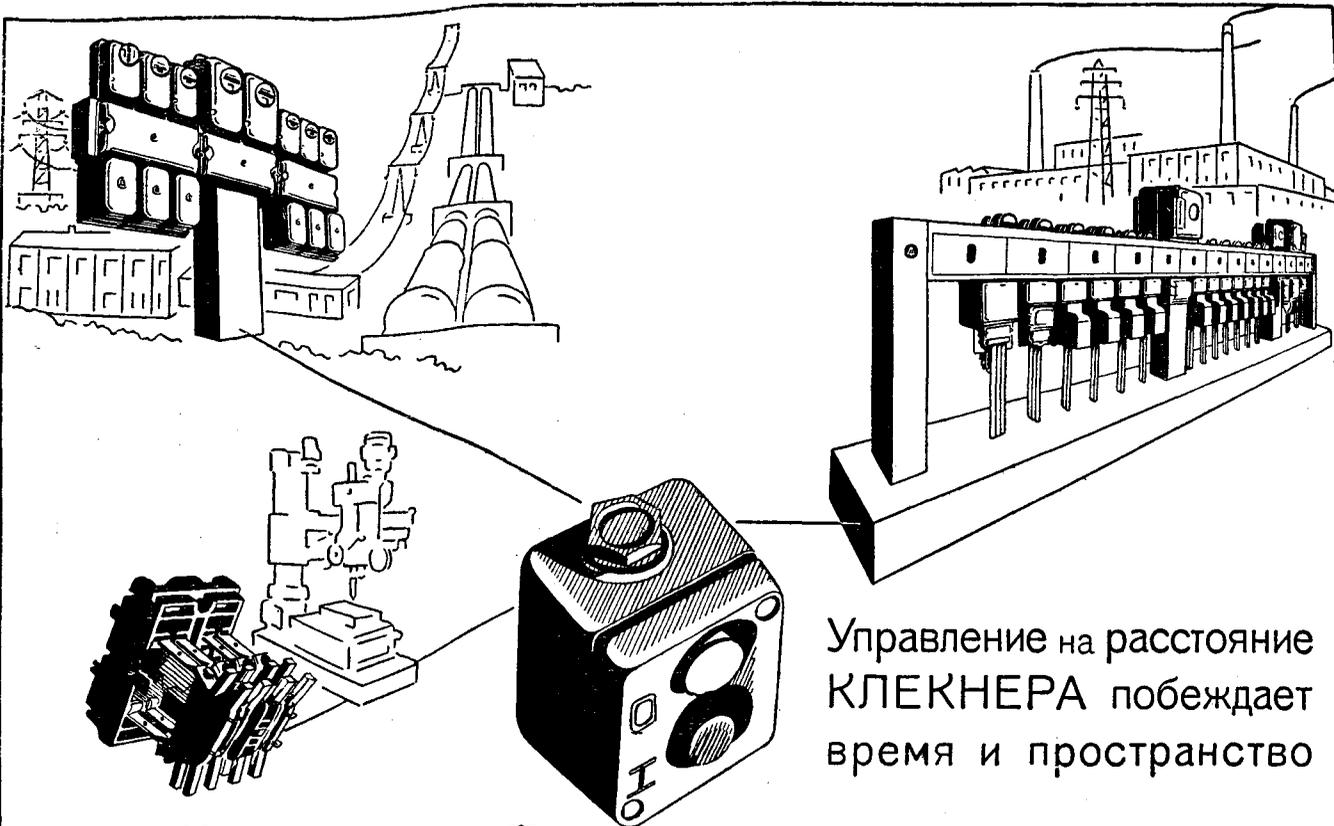
Подземные электрические кабели высокого и низкого напряжения с бумажной изоляцией

Подземные телефонные и сигнализационные кабели

Подводные кабели

Неизолированную проволоку и неизолированные кабели из электролитическ. меди





Управление на расстояние  
КЛЕКНЕРА побеждает  
время и пространство

**F. KLÖCKNER, KÖLN-BAYENTHAL (ГЕРМАНИЯ)**

**AKTIENGESELLSCHAFT  
R. & E. HUBER**  
Schweizerische Kabel-, Draht- und Gummiwerke  
**PFAFFIKON-ZÜRICH** (Швейцария)

Поставщик Технопроимпорта, Москва

**Специальность:**

прецизионная эмалированная медная про-  
волока,

обтянутая шелком медная и эмалирован-  
ная проволока,

проволока для сопротивлений, а именно

**КОНСТАНТАН  
МАНГАНИН  
НИКЕЛИН  
НИХРОМ**

эмалированная и  
обтянутая шелком

высокочастотные провода для  
**РАДИОТЕХНИКИ**

50-летняя фабричная практика явля-  
ется гарантией высокого качества преци-  
зионных изделий

Образцы и технические данные в Вашем  
распоряжении

6743

**JOHNSON &  
PHILLIPS, Ltd.**

**ELECTRICAL ENGINEERS & CABLE MAKERS  
CHARLTON LONDON**

**Джонсон и Филлипс, Лимитед  
ЛОНДОН, АНГЛИЯ**

ooo

Заводы ДЖОНСОН и ФИЛЛИПС предоставляют Вам  
воспользоваться их более чем 60-летней промыш-  
ленной практикой, а также высококачественным  
выполнением, признанным инженерами всего мира

**КАБЕЛИ** вплоть до 33.000 вольт

**РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ДОСКИ**

Специальность: распределительные  
доски для индустрии

**ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**СТАТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ**  
для увеличения активности электрической силы

**ВОЗДУШНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОВОДКА** и материалы для нее

**ИНСТРУМЕНТЫ**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ**

**ПОШЛАЙТЕ НАМ ВАШИ ЗАПРОСЫ!**

# ATELIERS DE CONSTRUCTIONS ÉLECTRIQUES DE CHARLEROI

Специальные кабели для самого высокого напряжения  
Металлизированные кабели - Кабели для жидкого масла  
Кабели под давлением для напряжения до 220.000 вольт



Câblerie  
Кабельный завод

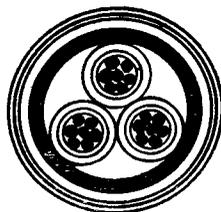


Charleroi  
(Бельгия)

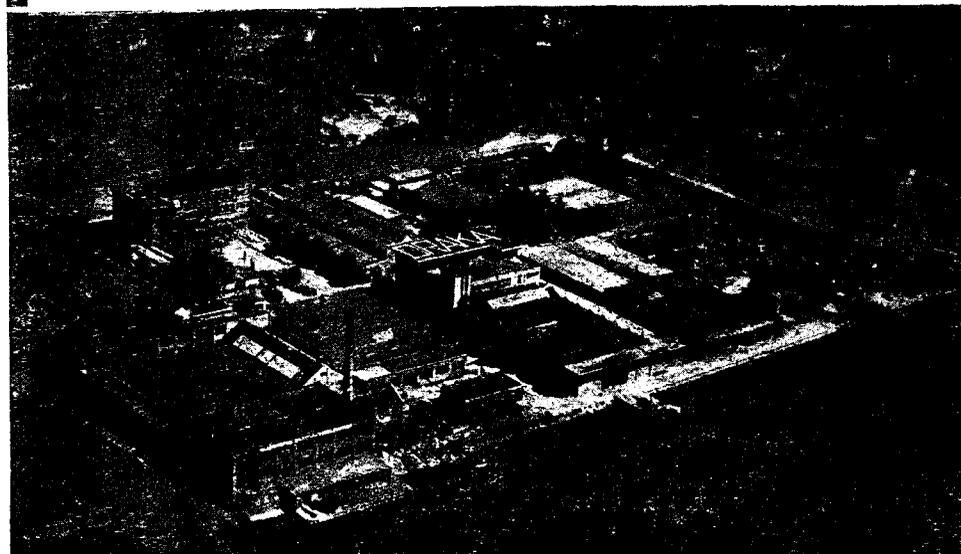
# DRAKA

N.V. HOLLANDSCHE  
DRAAD- EN KABEL FABRIEK  
AMSTERDAM - HOLLAND

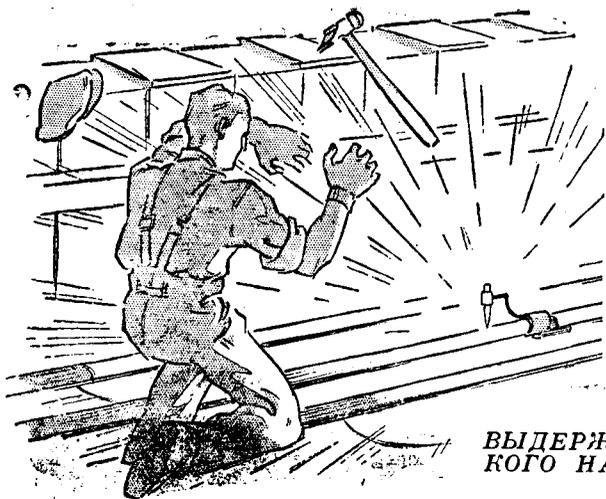
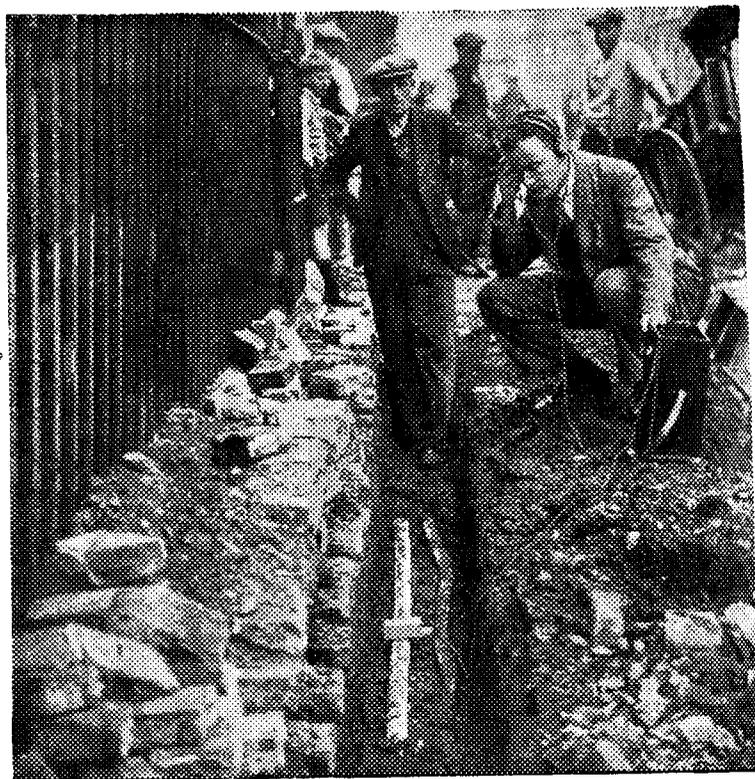
адрес для телеграмм: DRAKA · AMSTERDAM · ГОЛЛАНДИЯ



специальность:  
все сорта проволоки и  
кабелей для электричества  
с резиновой изоляцией.



# Неужели Вы прокалываете Ваши кабели, чтобы убедиться, есть ли в них ток?



**ВЫДЕРЖКА ИЗ ИНСТРУКЦИЙ ПО УХОДУ ЗА СЕТЯМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОДНОГО КРУПНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

„ . . . . . и если, при вскрытии грунта, возникает малейшее сомнение относительно правильности местоположения кабеля, то необходимо проверить его положение по плану при помощи поверочных испытаний...“

**Испробовали ли Вы для этих испытаний прибор  
для местонахождения кабеля фирмы**

# *Standard?*

Бесчисленное множество несчастных случаев вызываются ошибками при распознавании кабелей.

Испытательный прибор **“Standard”** является единственным аппаратом на рынке, безошибочно определяющим любой кабель на любом участке.

Этот прибор отличается простотой конструкции и мгновенностью действия. Если Вы до сих пор еще не приобрели этих приборов, то просим затребовать проспект и цены.

## *Standard Telephones and Cables Limited*

**NORTH WOOLWICH, LONDON, E. 16 - АНГЛИЯ**

Телегр. адрес : WESTOPHONE, LONDON.

**Отделения и представительства во всем мире**



# ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1938 год НА ЖУРНАЛЫ ОБЪЕДИНЕННОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА (ОНТИ)

## БЮЛЛЕТЕНЬ ЗАВОДА „ДИНАМО“

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 12 руб., на 6 мес. — 6 руб., на 3 мес. — 3 руб.

## ВЕСТНИК КОЧЕГАРА

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 6 руб., на 6 мес. — 3 руб., на 3 мес. — 1 р. 50 к.

## ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 30 руб., на 6 мес. — 15 руб., на 3 мес. — 7 р. 50 к.

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 30 руб., на 6 мес. — 15 руб., на 3 мес. — 7 р. 50 к.

## Известия электропромышленности слабого тока

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 24 руб., на 6 мес. — 12 руб., на 3 мес. — 6 руб.

## МАШИНИСТ

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 6 руб., на 6 мес. — 3 руб., на 3 мес. — 1 р. 50 к.

## Советское котлотурбостроение

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 24 руб., на 6 мес. — 12 руб., на 3 мес. — 6 руб.

## ТЕПЛО и СИЛА

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 33 руб., на 6 м. — 16 р. 50 к., на 3 м. — 8 р. 25 к.

## Энергетическое обозрение вып. теплотехнический

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 21 руб., на 6 м. — 10 р. 50 к., на 3 м. — 5 р. 25 к.

## Энергетическое обозрение вып. электротехнический

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 21 руб., на 6 мес. — 10 р. 50 к., на 3 м. — 5 р. 25 к.

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 33 руб., на 6 мес. — 16 р. 50 к., на 3 м. — 8 р. 25 к.

## Электрические станции

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 24 руб., на 6 мес. — 12 руб., на 3 мес. — 6 руб.

## ЭЛЕКТРОМОНТЕР

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 12 руб., на 6 мес. — 6 руб., на 3 мес. — 3 руб.

## ЭНЕРГЕТИКА

4 номера в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 18 руб., на 6 мес. — 9 руб.

## СВЕТОТЕХНИКА

12 номеров в год

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год — 18 руб., на 6 мес. — 9 руб., на 3 м. — 4 р. 50 к.

ПОДПИСКУ и ДЕНЬГИ направлять по адресу: Москва 31, Пушкинская 9. Главная контора „Техпериодика“. Подписка также принимается: отделениями и уполномоченными „Техпериодики“, магазинами и киосками Книгосбыта ОНТИ и всюду на почте.

АДРЕСА ОТДЕЛЕНИЙ:

Ленинград, проспект 25 Октября, внутри Гостиного двора, пом. 100;  
Киев, Горовица 38, магазин 1;  
Харьков, Суздальские ряды 32/33;  
Горький, Октябрьская ул. 25, дом ИТР;

Свердловск, Дом промышленности, 4 й этаж, 2-й блок, ком. 46;  
Днепропетровск, проспект Карла Маркса 84;  
Ростов-на-Д., ул. Энгельса 79;  
Новосибирск, Красный проспект 17;  
Сталино-Донбасс, 8-я линия 28;  
Тбилиси, проспект Плевахова 88;  
Одесса, ул. Ленина 2.