

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1947



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Н. Д. Папалекси	3
Н. Н. Андреев—Пьезоэлектрические кристаллы и их применение	5
В. Г. Комар—Селеновые выпрямители	14
С. М. Брагин—Высоковольтные кабельные линии в энергетических системах	23
Э. А. Меерович—Геометрическая теория электрических цепей	30
А. Л. Вайнер, А. К. Потужный и С. М. Фертик—Исследование заземлителей в плохо проводящих грунтах	40
С. И. Тельный—Некоторые вопросы теории дуговой электрической печи	48
Г. И. Штурман и Р. Л. Аронов—„Краевой эффект“ в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом	54
Из научно-исследовательских работ. Авторефераты	
П. А. Ионкин—О схемах замещения электрических цепей с магнитной связью	60
Н. В. Горохов—Однфазные индукционные регуляторы	64
С. И. Тетельбаум, А. Б. Будницкий и В. Г. Холмский—Влияние земли на потери энергии в прямоугольных рамках при повышенной частоте	66
И. И. Корнилов, Р. С. Минц и А. А. Азовская—Опыт применения новых железо-хром-алюминиевых сплавов для нагревательных элементов	68
А. А. Глазунов—Зависимость времени потерь от продолжительности использования максимума и коэффициента мощности нагрузки	71
В. Я. Гальперн—О величине возможных перенапряжений в ртутно-выпрямительных агрегатах большой мощности	72
Дискуссии	74
Рефераты	77
Хроника	87
Стандарты	93
Библиография	95
И. И. Петров—Рецензия на книгу А. Т. Голована „Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин для машиностроительных вузов“	95



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

Ответственный секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**



**Академик Н. Д. ПАПАЛЕКСИ**

3 февраля 1947 г. скончался выдающийся советский ученый, действительный член Академии наук СССР, лауреат Сталинской премии Николай Дмитриевич Папалекси.

Н. Д. Папалекси родился в 1880 г. в Симферополе. Он являлся одним из пионеров радио и одним из создателей нашей отечественной радиотехники. Под руководством Н. Д. Папалекси в России была впервые осуществлена радиотелефонная связь, разработаны методы радиопеленгации, созданы первые русские электронные лампы и т. д.

После Октябрьской революции Н. Д. Папалекси участвовал в создании научной базы для молодой советской радиопромышленности. Находясь во главе одного из отделов Центральной радиолaborатории, он руководил целым рядом важных научных исследований и практических разработок, нашедших широкое применение в радиопромышленности.

Н. Д. Папалекси являлся одним из создателей нового направления в физике колебаний, так называемой теории нелинейных колебаний.

Наряду с разработкой теоретических вопросов, Н. Д. Папалекси уделял чрезвычайно большое внимание практическим применениям результатов научного исследования. Под его руководством были разработаны новые типы электрических генераторов (так называемые параметрические машины) и ряд радиотехнических приборов. За эти научные работы Н. Д. Папалекси совместно с Л. И. Мандельштамом в 1936 г. была присуждена первая премия имени Д. И. Менделеева.

В течение последних лет академик Н. Д. Папалекси руководил обширными работами по исследованию распространения радиоволн. Созданные им новые радиоинтерференционные методы исследования распространения радиоволн и основанные на них способы точного измерения рас-

стояний выдвинули советскую радиотехнику в этой области на первое место в мире.

За эти выдающиеся по своему научному и практическому значению работы Н. Д. Папалекси совместно с Л. И. Мандельштамом в 1942 г. была присуждена Сталинская премия 1-й степени.

Академик Н. Д. Папалекси был не только выдающимся ученым, но и крупнейшим педагогом и воспитателем молодежи.

Крупнейшие заслуги академика Н. Д. Папалекси перед советской наукой и техникой были отмечены высокой наградой — в 1945 г. он был награжден орденом Ленина.

Смерть Николая Дмитриевича Папалекси — тяжелая утрата. Академия наук лишилась одного из выдающихся ученых, который весь свой талант, все свои силы и знания отдавал делу развития советской науки и техники.

Президиум Академии наук СССР,  
Отделение физико-математических наук,  
Отделение технических наук,  
Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Академии наук СССР,  
Всесоюзный научный совет по радиофизике  
и радиотехнике при Академии наук СССР,  
Энергетический институт Академии наук СССР.

Редакция журнала „Электричество“ с глубоким прискорбием извещает о скоропостижной смерти выдающегося ученого в области радиофизики и радиотехники, члена редакционной коллегии журнала „Электричество“, академика Николая Дмитриевича Папалекси.

# Пьезоэлектрические кристаллы и их применение

Член-корреспондент Академии наук СССР Н. Н. АНДРЕЕВ

Физический институт им. Лебедева Академии наук СССР

В настоящее время применение пьезоэлектрических кристаллов выросло в обширную отрасль техники. При генерации или приеме звуковых, и в особенности ультразвуковых, колебаний пьезоэлектрические кристаллы имеют большое значение; таково, например, значение пьезокварца в стабилизации электромагнитных колебаний. В промышленность, связанную с производством и применением пьезокристаллов, вложены немалые средства. Одно только применение пьезоэлектрического кварца для стабилизации колебаний потребовало многих тонн первоклассных кристаллов и, например, только одна фирма Western Electric Co и только один (1943) год выпустила 8 000 000 кварцевых стабилизаторов. Другим примером является сегнетова соль ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), входящая как пьезоэлектрический элемент в телефоны, микрофоны, гидрофоны, громкоговорители и т. п. Производство кристаллов сегнетовой соли по количеству недавно отстало от производства пьезокварца.

В промышленности СССР пьезокристаллы также играют видную роль; однако, роль эта не так велика, как этого можно было бы ожидать. У нас применение пьезокристаллов ограничивается кварцем и сегнетовой солью; практически не ведется работ по отысканию новых, пригодных для технических целей пьезокристаллов, хотя здесь имеются интересные перспективы; необходимо обратить внимание нашей общественности, научной и технической, на этот вопрос. Настоящая статья отчасти преследует эту цель и сообщает о некоторых важнейших новых работах в области пьезокристаллов (см. также [Л. 1] и др.). Предмет, однако, очень обширен, и нет возможности в журнальной статье коснуться всех его сторон. Другая наша задача — дать общий обзор физических принципов, которые лежат в основе расчета пьезоэлектрических приборов в той форме, которую разрабатывал автор этой статьи.

Естественные и искусственные пьезоэлектрические кристаллы. Как уже сказано, наиболее

*Статья рассматривает свойства и возможности практического применения пьезоэлектрических кристаллов. Излагается общая теория линейных пьезоэлектрических кристаллов и ее приложение к пьезоэлектрическим приемникам давления. Описываются новые конструкции приемников, в том числе конструкция построенного в Акустической лаборатории ФИАН измерительного гидрофона с турмалиновым пьезокристаллом в оправе из плексигласа.*

важными пьезокристаллами по техническим применениям являются кварц и сегнетова соль; однако, рост интереса к пьезокристаллам и рост промышленности, их использующей, за-

ставляет искать новые материалы. Отсюда возникает потребность в просмотре пьезоэлектрических кристаллов всех классов.

Начнем сначала с естественных кристаллов. Из 32 классов кристаллов 19 классов имеют симметрию, допускающую наличие пьезоэлектрических свойств; однако, наибольшее количество естественных кристаллов — около 90% — относится к классам, имеющим центральную симметрию, а потому лишенным пьезоэлектрических свойств; из остальных кристаллов только весьма немногие обладают удовлетворительными пьезоэлектрическими и одновременно удовлетворительными техническими свойствами. Бонд [Л. 2] произвел довольно полный пересмотр пьезоэлектрических минералов; среди 70 минералов, допускающих пьезоэлектрические свойства, было обнаружено только 17, имеющих эти свойства; большая часть их оказалась, однако, либо редкими, либо имеющими недопустимые в технических приложениях дефекты.

Кроме кварца и отчасти турмалина, который довольно редко находится в больших и достаточно совершенных кристаллах, не нашлось ни одного минерала, в практической пригодности которого не возникало бы серьезных сомнений.

Иное дело — искусственно приготовляемые пьезоэлектрические кристаллы. Возможности в этом отношении практически неограниченны. Кроме столь распространенной в современной технике сегнетовой соли, начинается техническое применение фосфата аммония; тарtrat аммония, виннокаменная кислота, сахар, легко получаемые в форме больших кристаллов, хотя еще и не используются технически, однако на наш взгляд представляют в отношении технических применений определенный интерес. Наконец, за последнее десятилетие появились работы по сегнетоэлектрикам — кристаллам со свой-

ствами сегнетовой соли, — и другим кристаллам, свойства которых представляют большой технический интерес и которые уже начинают находить технические применения: это — кислые соли фосфорной и мышьяковой кислот, в особенности аммониевые и калиевые. Надо отметить, что описанные технические применения — о некоторых из них пойдет речь ниже — носят еще характер проб; автору этой статьи не встречались какие-либо указания на производство разрабатанных образцов. Несомненно, однако, что в ближайшие годы мы будем свидетелями появления в технике многих новых пьезоэлектрических приборов.

**Линейные и нелинейные кристаллы.** По отношению к электромеханике пьезоэлектрических кристаллов мы разделяем их на линейные и нелинейные. К первой группе мы относим те кристаллы, в которых связи между механическими деформациями, напряжениями, электрическими поляризациями и полями выражаются линейными соотношениями; такие кристаллы мы будем называть линейными; к ним относятся: кварц, турмалин, сахар, виннокислотная кислота и, в определенном температурном интервале, сегнетозлектрики. Если же вышеуказанные связи не могут быть выражены линейными соотношениями, то кристаллы с такими свойствами мы будем называть нелинейными; к ним в первую очередь, надо отнести сегнетову соль; в последнее время открыт и ряд других нелинейных пьезоэлектрических кристаллов. Все до сих пор известные нелинейные пьезоэлектрические кристаллы сохраняют свою нелинейность только в определенном интервале температур. Вне этого «интервала нелинейности» они либо вообще теряют пьезоэлектрические свойства, либо становятся линейными, как, например, та же сегнетова соль при температурах, превышающих 23,7° С.

Характерной особенностью нелинейных кристаллов является их весьма высокая диэлектрическая и пьезоэлектрическая проницаемость даже в области линейности, чем и определяется техническое значение их, и сильная зависимость их свойств от температуры, что является техническим дефектом.

Линейные кристаллы наиболее изучены теоретически и экспериментально. Ими мы и ограничимся в настоящей статье.

Перечислим величины, с которыми мы будем иметь дело в дальнейшем.

Во-первых, это — механические деформации:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6.$$

Первые три из них относятся к расширениям (положительным и отрицательным) по трем осям координат, избранных нами подходящим образом в рассматриваемом кристалле; три последние обозначают сдвиговые деформации; обычное обозначение тех и других дается соотношениями:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_x; \quad x_2 = y_y; \quad x_3 = z_z; \\ x_4 &= y_x = z_y; \quad x_5 = x_z = z_x; \quad x_6 = x_y = y_x. \end{aligned}$$

Во-вторых, это механические напряжения:

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6;$$

в обычном обозначении их пишут:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_x; \quad X_2 = Y_y; \quad X_3 = Z_z; \\ X_4 &= Y_z = Z_y; \quad X_5 = X_z = Z_x; \quad X_6 = X_y = Y_x. \end{aligned}$$

Здесь требуется, однако, некоторая оговорка относительно законности последних трех формул, и к этому вопросу мы вернемся несколько ниже.

В-третьих, это — компоненты вектора электрического поля:

$$E_1, E_2, E_3.$$

И, наконец, в четвертых, это — компоненты вектора диэлектрической поляризации:

$$P_1, P_2, P_3.$$

Везде, где имеется переменное электрическое поле, возникает и магнитное поле. Однако, до сих пор мы имели в практике дело только с такими электрическими полями в пьезоэлектрических кристаллах, при наличии которых можно пренебрегать магнитными полями и считать явления в пьезоэлектрическом кристалле электростатическими. В настоящее время мы близки уже к случаям, когда, может быть, придется принимать во внимание и магнитные поля.

**Основные теории пьезоэлектрических кристаллов.** Ранее, чем мы перейдем к формулировке основных пьезоэлектрических соотношений,

дадим представление о природе пьезоэлектричества. Такую теорию дал Борн [Л. 3]; но основная мысль, лежащая в объяснении пьезоэлектрических явлений из структуры атомной решетки кристалла, имеется уже у Кельвина [Л. 4].

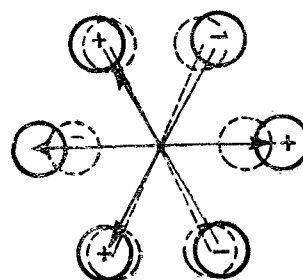


Рис. 1. Схема молекулы кварца по Кельвину.

Кельвин предполагает, что молекула кварца состоит из трех атомов Si и трех двойных атомов O<sub>2</sub>, расположенных по углам правильного шестиугольника; знаки зарядов их — положительный для Si и отрицательный для O<sub>2</sub>. Как видно из рисунка, их взаимное расположение таково, что сумма трех диэлектрических моментов, показанных на рисунке стрелками, равна нулю. Но стоит произвести деформацию молекулы в направлении оси  $x$ , как условие это нарушится и суммарный момент в направлении оси  $x$ ,  $P_x$  окажется отличным от нуля. Сумма всех элементарных моментов в единице объема при отсутствии деформации и есть введенный нами пьезоэлектрический момент:

$$P_1 = \Sigma p_x.$$

Рис. 1 показывает, что явление не изменится, если повернуть «молекулу» кварца около центра на  $1/3$  окружности, что соответствует симметрии кристалла и подтверждается экспериментом.

В турмалине явления несколько иные: в нем имеется диэлектрический момент, отличный от нуля и при отсутствии деформации.

Выделим теперь массу, находящуюся в единице объема недеформированного кристалла; прилагая к ней поверхностные силы и объемные электрические поля, мы вызовем в ней деформации и электризацию; кроме того, предположим, что вводим и некоторое количество тепла (или это тепло образуется внутри кристалла за счет адиабатического сжатия, трения и т. п.). В этом случае внутренняя энергия единицы недеформированного объема есть

$$d\varepsilon = d'\alpha + d'\omega;$$

здесь  $d'\alpha$  — малое приращение, но не дифференциал  $d\alpha$ . Приращение энергии  $d'\alpha$  обусловлено двумя причинами: работой механических сил и работой сил электрических. Если мы допустим отсутствие сил трения и будем обозначать растяжения внутри кристалла, как это принято, через положительные величины, то эта часть приращения энергии выразится через

$$-\sum X_i dx_i \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

В дальнейшем мы будем отбрасывать знак суммы и выписывать только типичный член

$$-X_i dx_i,$$

подразумевая суммирование по значкам, встречающимся дважды. Работа электрических сил в той же массе тела, относящейся к недеформированному объему, есть

$$E_m dP_m \quad m = 1, 2, 3.$$

Наконец, введя предположение об обратимости явлений (для линейных кристаллов практически всегда верное), можем положить для количества тепла  $d'\omega$ :

$$d'\omega = \vartheta d\eta,$$

где  $\vartheta$  — абсолютная температура, а  $\eta$  — энтропия рассматриваемой массы. Таким образом, имеем:

$$d\varepsilon = -X_i dx_i + E_m dP_m + \vartheta d\eta. \quad (1)$$

Внутреннюю энергию  $\varepsilon$  мы можем выразить через разные величины. Фохт [Л. 5] выбирает величины несколько неудобно, причем оказывается, например, что определение диэлектрической постоянной отнесено к недеформированному телу; автор настоящей статьи [Л. 6] избирает гораздо более удобную систему; именно, независимыми переменными принимаются механическое и электрическое поле  $X_i$ ,  $E_m$  и температура. Поэтому вместо внутренней энергии становится необходимым ввести другой термодинамический потенциал, который определяется:

$$d\zeta = d\varepsilon + d(X_i x_i) - d(P_m E_m) - d(\vartheta \eta) = x_i dX_i - P_m dE_m - \eta d\vartheta, \quad (2)$$

причем  $x_i$ ,  $P_m$ ,  $\eta$  являются функциями  $X_i E_m$ ,  $\vartheta$ .

Отсюда вытекают важные соотношения:

$$x_i = \frac{\partial \zeta}{\partial X_i}; \quad P_m = -\frac{\partial \zeta}{\partial E_m}; \quad \eta = -\frac{\partial \zeta}{\partial \vartheta}. \quad (3)$$

Форма зависимости  $\zeta$  от наших независимых переменных может быть весьма сложной для нелинейных кристаллов; но если кристалл линеен, то это означает, что термодинамический потенциал есть функция не выше второго порядка. Положим, что

$$\zeta = -\frac{1}{2} S_{ih} X_i X_h + d_{mh} E_m E_h - \frac{1}{2} \gamma_{mn} E_m E_n - \frac{1}{2} r \vartheta^2 - r_m E_m \vartheta + q_i X_i \vartheta + \text{линейные члены}. \quad (4)$$

Тогда, применяя (3), находим:

$$\begin{aligned} x_i &= -S_{ih} X_h + d_{mi} E_m + \vartheta q_i + \text{const}, \\ P_m &= -d_{mh} X_h + \gamma_{mn} E_n + \vartheta r_m + \text{const}, \\ \eta &= r \vartheta + r_m E_m - q_i X_i + \text{const}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$S_{ih}$ ,  $d_{mi}$ ,  $\gamma_{mn}$ ,  $r_m$ ,  $r$ ,  $q_i$  — постоянные коэффициенты.

Эти соотношения можно было бы постулировать и непосредственно, исходя из предположения линейности пьезоэлектрических явлений; но тогда не было бы оснований утверждать, что

$$S_{ih} = S_{hi}; \quad \gamma_{mn} = \gamma_{nm}. \quad (6)$$

Теперь же это получается из (3) при дифференцировании.

Чтобы сознательно применять формулы (5), необходимо условиться, какое состояние нашего кристалла мы считаем начальным. Обычно кристалл в „свободном от воздействия сил состоянии“ (сила тяжести имеется всегда) все же находится в температурном постоянном поле  $\vartheta_0$  и под действием силы тяжести, называемой в нем механические поля  $X_i$ . Если под  $x_i$ ,  $P_m$ ,  $\eta$  подразумевать отклонения от этого свободного состояния, а под  $X_i$ ,  $\vartheta$  подразумевать отклонения от полей, определяющих свободное состояние, то формулы (5) сохраняют свой вид, но  $\text{const} = 0$  во всех трех уравнениях.

Это замечание объясняет, почему для турмалина, который имеет диэлектрический момент и в отсутствии механического и электрического полей (подобно тому, как магнит имеет постоянный магнитный момент), можно сохранять (5).

Смысл введенных в (5) коэффициентов легко установить, рассматривая простейшие частные случаи. Например, полагая во втором уравнении  $X_i$  и  $\vartheta$  равными нулю, находим:

$$P_m = \gamma_{mn} E_n,$$

откуда следует, что  $\gamma_{mn}$  (а значит, и диэлектрическая постоянная  $\epsilon_{mn} = 1 + 4\pi\gamma_{mn}$ ) относится к опыту электризации в отсутствии давлений и при наличии постоянной температуры, равной избранной начальной. Поэтому, когда  $X_i$  и  $\vartheta$  не равны нулю, как, например, при колебаниях кристалла емкость его иная, чем при статических опытах.

Кроме уравнений (5), являющихся уравнениями связи между механическим, тепловым и электрическим полями, механическое поле определяется известными уравнениями упругого равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_1}{\partial x} + \frac{\partial X_6}{\partial y} + \frac{\partial X_5}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial X_6}{\partial x} + \frac{\partial X_2}{\partial y} + \frac{\partial X_4}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial X_5}{\partial x} + \frac{\partial X_4}{\partial y} + \frac{\partial X_3}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

причем предположено, что сдвиговые напряжения удовлетворяют обычно принимаемым в теории упругости соотношениям

$$X_y = Y_x \text{ и т. д.}$$

Электрическое поле определяется системой уравнений электростатики:

$$\begin{aligned} 4\pi\sigma &= D_{+\nu} - D_{-\nu}, \\ 0 &= \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}, \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial x} &= E_x, \quad -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = E_y, \quad -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = E_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $\nu$  — нормаль через границу двух сред;  $D_{+\nu}$  — зна-



чение смещения  $D$  с той стороны границы, куда направлена нормаль. В частном случае, когда среда с отрицательной стороны нормали есть пьезоэлектрический кристалл, а с другой стороны имеется металлическая обкладка, в которой  $D=0$ , имеем:

$$D_{-y} = 4\pi\sigma.$$

Отличие уравнений (8) от обычных уравнений электростатики только в том, что вектор  $D_m$  связан не только с полем  $E_m$ , но и с механическим полем  $X$ , а также с температурой  $\vartheta$ .

В самом деле, вектор  $D_i$  определяется уравнениями:

$$D_x = 1 + 4\pi P_x, D_y = 1 + 4\pi P_y, D_z = 1 + 4\pi P_z. \quad (9)$$

Но из второго уравнения (5) и из этого соотношения находим:

$$D_m = -4\pi d_{mh} X_h + (1 + 4\pi \eta_{mn}) E_n + 4\pi \vartheta r_m,$$

или, вводя, как обычно, диэлектрическую постоянную

$$D_m = -4\pi d_{mh} X_h + E_{mn} \epsilon_n + 4\pi r_m \vartheta. \quad (10)$$

Уравнение это есть обобщение обычного уравнения электростатики линейного не пьезоэлектрического кристалла.

**Приложение теории к случаю пьезоэлектрического приемника.** Система уравнений (5), (7), (8), (9), (10) позволяет решать все вопросы равновесия пьезоэлектрического кристалла, причем, конечно, приходится принимать во внимание граничные условия рассматриваемой задачи. Мы рассмотрим только один пример тонкой пьезоэлектрической пластинки с металлическими обкладками, находящейся под действием давления, нормального к ее поверхности; такая система есть не что иное, как пьезоэлектрический приемник давления—микрофон или гидрофон. Если даже давление переменное, но частота перемен невелика по сравнению с наименьшей частотой собственных колебаний пластинки, то к описанию явления применимы уравнения равновесия; вдобавок можно предположить независимость от координат  $X_i$ ,  $E_m$ . Вследствие малой чувствительности пьезоэлектрических кристаллов в состав приемника всегда входит усилительная схема, причем заряды от пьезокристалла подаются на сетку лампы; предполагая сеточное сопротивление равным бесконечности, имеем схему приемника (рис. 2).

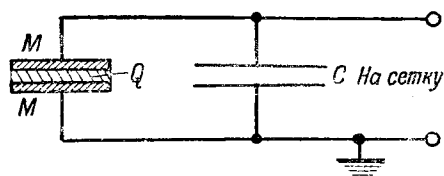


Рис. 2. Схема пьезоэлектрического приемника.

Здесь  $C$ —эквивалентная емкость проводов и других паразитных емкостей;  $M$ —металлические обкладки, наложенные непосредственно на пьезоэлектрический кристалл  $Q$ ; на эти же обкладки производится внешнее давление. Если сделать предположение, что толщина кристалла мала по сравнению с его продольными размерами, вышеуказанное предположение о малости частоты,

предположение о тонкости обкладок  $M$  и, наконец, предположение перпендикулярности сил внешнего давления к плоскости обкладок, то расчет приводит к формуле:

$$\frac{\varphi}{X} = \frac{dS}{\frac{\epsilon S}{4\pi l} + c} = \frac{dS}{C + c}, \quad (11)$$

где  $C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}$  есть емкость кварцевой пластинки;

$\varphi$  — потенциал, подаваемый кристаллом на сетку лампы;

$X$  — давление, подаваемое на кристалл в виде, например, звуковых волн;

$d$  — пьезоэлектрическая постоянная в направлении, перпендикулярном к пластинке;

$\epsilon$  — диэлектрическая постоянная в том же направлении;

$S$  — площадь кристалла;

$l$  — его толщина;

$c$  — емкость параллельно включенного эквивалентного конденсатора (емкость проводов до сетки).

Отношение  $\frac{\varphi}{X}$  может быть названо чувстви-

тельностью пьезоэлектрического приемника; формула (11) показывает, что, во-первых, приемник в целом должен быть сконструирован так, чтобы паразитные емкости были минимальны; во-вторых, чтобы были избраны максимальные толщина и площадь кристалла, допускаемые требованием малой частоты; и, наконец, если паразитная емкость достаточно мала, материал кристалла должен быть выбран так, чтобы отношение  $\frac{4\pi d}{\epsilon}$  было возможно больше.

Другая распространенная принципиальная схема пьезоэлектрического приемника отличается от вышеописанной тем, что давление прикладывается по торцам кристалла. Расчетная формула сохраняет в этом случае прежний вид, но изменяется значение  $d$ ; под ним надо понимать коэффициент, определяющий величину поляризации в направлении толщины  $l$ , но под действием внешнего давления, в направлении, параллельном поверхности  $S$ .

Наконец, третий тип приемника отличается от двух вышеуказанных тем, что давление на кристалл производится со всех сторон—пожалуй, наиболее привлекательная форма приемника для акустических целей; приемник, малый по сравнению с длиной звуковой волны, просто «погружается» в звуковое поле. В этом случае  $d$  определяет поляризацию в направлении  $l$ , возникающую под действием всестороннего давления; вид расчетной формулы прежний.

**Вырезы пластинок из пьезоэлектрических кристаллов.** Для приемника и для передатчика важен вопрос выбора в кристалле выреза пластинки. Если идет речь о приеме и передаче малых частот, то выбор выреза практически определяется только оптимальным отношением  $\frac{4\pi d}{\epsilon}$ .

для резонансных приемников, и в особенности для стабилизаторов и волноуказателей, которые работают на собственных частотах, выбор определяется значением упругих констант, причем, главным образом, их зависимостью от температуры. Вот почему для конструктора пьезоэлектрических приборов существенно знать методику нужных для такого выбора расчетов.

Выписывая таблицы коэффициентов, входящих в (5) и (10), получаем совокупность матриц:

Матрица коэффициентов упругости

$$\begin{matrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16}, \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26}, \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36}, \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46}, \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56}, \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{matrix} \quad (12)$$

[на основании (6) матрица эта симметрична относительно главной диагонали].

Матрица пьезоэлектрических коэффициентов

$$\begin{matrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16}, \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26}, \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36}. \end{matrix} \quad (13)$$

Матрица диэлектрических постоянных

$$\begin{matrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13}, \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23}, \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{matrix} \quad (14)$$

[эта матрица также симметрична на основании (6)].

Матрица коэффициентов расширения

$$\begin{matrix} q_1, \\ q_2, \\ q_3, \\ q_4, \\ q_5, \\ q_6. \end{matrix} \quad (15)$$

Матрица пирозлектрических коэффициентов

$$\begin{matrix} r_1, \\ r_2, \\ r_2. \end{matrix} \quad (16)$$

Название вышеприведенных таблиц матрицами не случайно, потому что те операции, которые мы производим с ними, например, при определении момента при заданных напряжениях, совершенно совпадают с операциями теории матриц, известной из высшей алгебры. В самом деле, рассмотрим, как пример, вторую из формул (5) при  $E_m = 0$ , т. е. чистый пьезоэлектрический эффект. Легко видеть, что в формуле

$$P_m = -d_{mh} X_h \quad (17)$$

связываются три матрицы: (13) и матрицы

$$\begin{matrix} P_1, \\ P_2, \\ P_3 \end{matrix} \quad \text{и} \quad \begin{matrix} X_1, \\ X_2, \\ X_3, \\ X_4, \\ X_5, \\ X_6. \end{matrix}$$

причем правая часть  $d_{mh} X_h$  есть не что иное, как произведение матрицы пьезоэлектрических коэффициентов на матрицу механических напряжений<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Правило составления произведения двух матриц таково: каждый элемент с номером  $mh$ , принадлежащий матрице произведения, есть сумма произведений  $m$ -той строки матрицы-множителя на  $h$ -тую строку матрицы-множителя. Заметим, что из такого определения, следует, что перестановка множителей меняет величину произведения так что существуют "правое" и "левое" произведения.

Поэтому, обозначив матрицу поляризаций через  $(P)$ , матрицу пьезоэлектрических коэффициентов через  $(d)$ , матрицу механических напряжений через  $(X)$ , можем написать как в матричной алгебре:

$$(P) = -(d) \cdot (X). \quad (18)$$

Далее, если к напряжению  $(X)$  присоединятся напряжение  $(Y)$ , то матрица из элементов:

$$\begin{matrix} X_1 + Y_1, \\ X_2 + Y_2, \\ X_3 + Y_3, \\ X_4 + Y_4, \\ X_5 + Y_5, \\ X_6 + Y_6 \end{matrix}$$

определяет новый момент  $P'$  согласно формуле:

$$\begin{aligned} (P') &= -(d)[(X) + (Y)] = \\ &= -(d)(X) - (d)(Y), \end{aligned}$$

т. е. известное правило сложения матриц является здесь адекватным математическим приемом для выражения физического факта.

Бонд [Л. 7] провел систематическое изложение инженерных расчетов с пьезоэлектрическими и другими свойствами кристаллов и убедительно показал, что язык матричного исчисления весьма удобен.

Чтобы описать расположение выреза пьезоэлектрической пластинки в кристалле, рассмотрим наиболее важный пример выреза пластинки из кристалла кварца. Такой кристалл — идеализированный по внешней его форме — изображен на рис. 3, причем

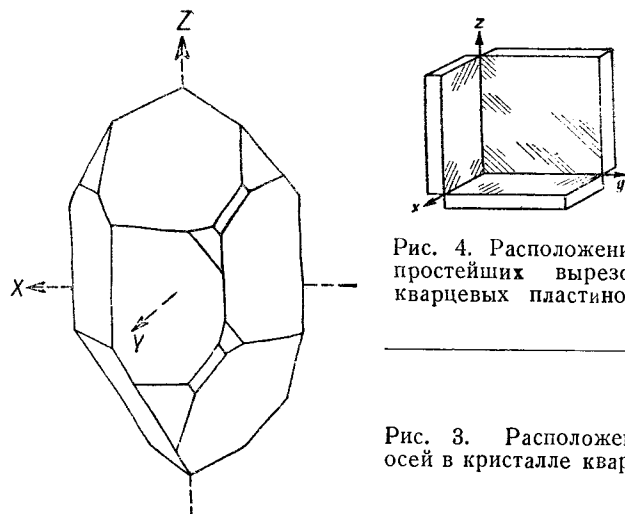


Рис. 3. Расположение осей в кристалле кварца.

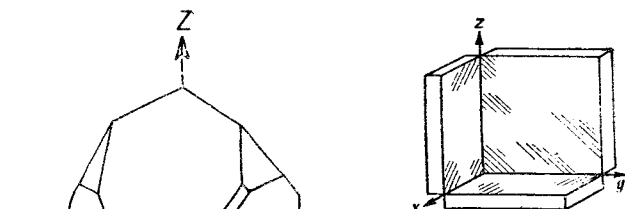


Рис. 4. Расположение простейших вырезов кварцевых пластинок.

указана система осей координат для описания расположения его граней. Выбор этот, по существу, произволен и диктуется только удобством кристаллографического описания; к нему относятся и значения всех входящих в вышенаписанные матрицы величин. Простейшими вырезами для пьезоэлектрических целей являются общеизвестные вырезы, изображенные на рис. 4.

Рис. 5 показывает, как принято определять согласно стандарту, разработанному в последние годы Американским институтом радиоинженеров, вырез в самом общем случае. Положение его определяется тремя углами  $\Phi$ ,  $\Theta$ ,  $\Psi$ , причем начальным положением считается изображенное на нижней части рисунка.

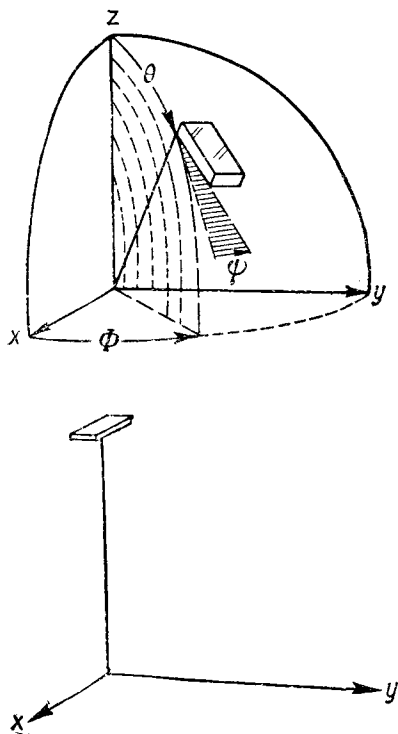


Рис. 5. Принятое Американским институтом радиоинженеров обозначение расположения выреза.

Для описания пьезоэлектрических и других свойств кристалла в трех направлениях, определяемых его ребрами, надо перевести матрицы его параметров в систему координат, совпадающую с этими ребрами, что делается снова через умножение соответственных матриц.

Следует заметить, что вопрос о выборе углов выреза для целей «статически работающих» приемников, расчетные формулы для которых даны выше, в литературе дискуссии не подвергался:

довольствовались выбором  $\frac{4\pi d}{\epsilon}$  по главным осям

кристалла и выбором кристалла с наибольшим этим отношением; следовало бы, однако, и в этом случае подойти к выбору выреза с вышеуказанной более широкой точки зрения.

**Новые пьезоэлектрические приемники.** Опишем теперь несколько новых пьезоэлектрических приемников. Надо заметить, что при небольшой, вообще говоря, чувствительности они имеют ряд достоинств, делающих их во многих случаях применения наиболее подходящими. Первое их достоинство — большая простота и устойчивость: пластинка пьезоэлектрического кристалла с нанесенными на его поверхности электродами — настолько простое и прочное сооружение, что даже грубое обращение с ним не меняет его свойств; проста и прочна и та оправа, в которую такую пластинку приходится помещать. Таким образом, в практических образцах только изменение чувствительности с температурой представляет некоторый, но вообще малый, недостаток, с которым вдобавок можно бороться либо выбором подходящего выреза, либо подбором подходящего материала кристалла. Впро-

чем, при современных требованиях к точности акустических измерений вопрос о влиянии температуры на чувствительность не представляется важным. Некоторое исключение представляют микрофоны и гидрофоны с сегнетовой солью: при наибольшей из всех пьезоэлектрических типов приемников чувствительности они гигроскопичны и показания их довольно сильно зависят от температуры. Тем не менее, даже они применяются в измерениях, например, в шумомерах.

Второе достоинство пьезоэлектрических приемников — большой диапазон принимаемых без амплитудного искажения давлений. Область линейности пьезоэлектрических кристаллов обычно очень велика, нередко до пределов прочности. Наконец, третье преимущество — большой диапазон принимаемых без искажения частот: начиная от весьма низких частот, порядка немногих герц, чувствительность собственно пьезокристалла не зависит от частоты и не столько проводимость кристалла, обычно весьма малая, сколько особенности усилительной схемы могут вносить искажения низких частот. При высоких частотах частотные искажения начинаются только по близости собственных периодов колебания кристалла. Хуже дело обстоит с искажениями частотной характеристики, обусловленными уже не размерами самого кристалла, а его оправы: последнюю нужно конструировать в возможно малых размерах, чтобы внесение микрофона в звуковое поле не искажало распределения давления в нем.

Наконец, заметим, что предел чувствительности пьезомикрофона определяется почти исключительно тепловыми шумами усилительной схемы и в меньшей степени экранировкой от радиопомех.

Опишем измерительный микрофон, недавно разработанный Массе [Л. 8]. В качестве пьезоэлектрического кристалла выбран кислый фосфорнокислый аммоний  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , подробно изученный Мэсоном [Л. 9]; кристалл этот относится по своим пьезоэлектрическим и диэлектрическим свойствам к сегнетоэлектрикам; однако, в интересующей акустику области температур от  $-30^\circ$  до  $+70^\circ\text{C}$  он линеен и весьма устойчив.

В своей статье Массе не дает указаний, как вырезан кристалл, но из работы Мэсона видно, что наибольшая пьезоэлектрическая постоянная есть  $d_{16}$ , притом она практически не зависит от температуры; значение ее в среднем  $150 \cdot 10^{-8}$ , т. е. более, чем в 20 раз, превышает наибольшую пьезоэлектрическую постоянную кварца  $d_{11}$ . Этим обстоятельством и определяется направление выреза. Конструкция микрофона изображена на рис. 6 и отличается чрезвычайной простотой: шесть пластинок, электроды 1 которых, соединенные параллельно, заключены в латунный цилиндрический корпус 2 (размеры его показаны на рисунке); к торцам пластинок примыкает крышка 3, воспринимающая давление, так что сжатие производится по длине и вызывает диэлектрический момент по толщине пластинки.

Чувствительность микрофона  $24 \mu\text{V}$  на бар, т. е. меньше, чем для аналогичных конструкций

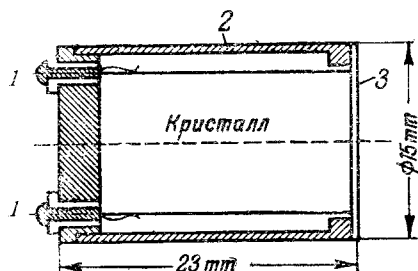


Рис. 6. Приемная часть микрофона Массы.

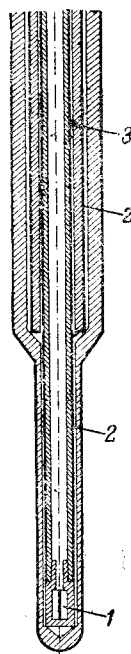


Рис. 7. Призматическая часть турмалинового гидрофона

с сегнетовой солью, но характеристики его прекрасны: вследствие малых размеров он работает без частотных искажений до частоты более 20 kHz, тогда как наименьший построенный конденсаторный микрофон начинает давать непрямолинейную характеристику уже с 5—6 kHz. Имеются и другие достоинства, о которых мы здесь распространяться не будем. Поскольку можно судить из описания, это — лучший из ныне существующих измерительных микрофонов; зависимость его чувствительности от температуры, правда, не дана.

Наиболее простым пьезоэлектрическим микрофоном явился бы кристалл, дающий пьезоэлектрический эффект при всестороннем сжатии. Для этого необходимо, чтобы в матрице пьезоэлектрических коэффициентов (13) хотя бы один из них в левой половине таблицы отличался от нуля. К таким кристаллам принадлежат турмалин и виннокислотная кислота. Последняя, в противоположность турмалину, недостаточно изучена, хотя и представляет известные перспективы в пьезоэлектрической технике. Но турмалин изучен всесторонне и применялся в приемниках не раз; описание разработанных конструкций, однако, не опубликовано. Мы сообщим сейчас некоторые сведения о построенном в Акустической лаборатории Физического института Академии наук измерительном гидрофоне. Приемник для помещения в воде должен по конструкции отличаться довольно значительно от приемника для помещения в воздухе: вода требует хорошей изоляции принимающего кристалла и проводов к усилителю и, кроме того, рискованно применять гигроскопические кристаллы, если только не делать к ним надежных оправ, больших и вызывающих поэтому значительные искажения звукового поля. Поэтому по предложению А. А. Харкевича в качестве кристалла был выбран турмалин, а в качестве оправы плексиглас (полимер метилметакрилата). У последнего вещества имеются два преимущества: оно имеет прекрасные электроизоляционные свойства и акустические его свойства довольно близки к свойствам воды, так что кусок плексигласа, погру-

женный в воду, искажения звукового поля почти не производит. Гидрофон имеет простой вид, изображенный на рис. 7.

Кристалл 1 (или пачка кристаллов) турмалина помещен в нижнем конце плексигласового стержня длиной около 1 м; такая большая длина предусмотрена для того, чтобы первая ступень усиления в медном цилиндре была настолько удалена от принимающего звук кристалла, чтобы она не искажала звукового поля. Один провод от турмалина идет по оси стержня, другой — по цилиндрической металлизированной поверхности 2. Система экранирования, разработанная В. С. Григорьевым, предусматривает обратную связь для компенсации емкости проводов от турмалина до первой ступени усилителя и использует металлизированную цилиндрическую поверхность 3.

**Механика пьезоэлектрического кристалла.** Перейдем теперь к вопросу о механике пьезоэлектрического кристалла; наиболее актуальный вопрос — колебания, причем, конечно, при этих колебаниях механическое поле (напряжения) не является независимым от электрического поля.

Основные уравнения механики пьезоэлектрического кристалла пишутся обычно, исходя из следующих соображений.

Между электрическим, механическим и температурным полями существуют соотношения (5), которые сохраняют свое значение не только в статическом, до сих пор рассматривавшемся нами случае, но и в случае динамическом — в предположении, что не принимается во внимание магнитное поле. Можно, однако, принять, что магнитное поле не сказывается при тех сравнительно медленных колебаниях, с которыми имеет дело пьезоэлектрическая техника; речь об этом была уже выше.

Если пренебречь магнитным полем, то уравнения электромагнитного поля обращаются в нашем случае в уравнения электростатики и при наличии переменных со временем полей, а потому мы можем сохранить для колебаний пьезокристаллов формулы (8).

Что касается, наконец, уравнений механического поля (7), то их пишут обычно так:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= - \left( \frac{\partial X_1}{\partial x} + \frac{\partial X_6}{\partial y} + \frac{\partial X_5}{\partial z} \right), \\ \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} &= - \left( \frac{\partial X_6}{\partial x} + \frac{\partial X_2}{\partial y} + \frac{\partial X_4}{\partial z} \right), \\ \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} &= - \left( \frac{\partial X_5}{\partial x} + \frac{\partial X_4}{\partial y} + \frac{\partial X_3}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

т. е. предполагают, что явления механического поля могут быть описываемы обычными уравнениями теории упругости; так, например, постулат Лауэ в первой по времени серьезной статье, относящейся к нашему вопросу [Л. 10].

Легко, однако, обнаружить, что обычная теория упругости должна несколько отличаться от теории упругости пьезоэлектрического (и вообще диэлектрического) кри-

сталла, так как в объеме такого кристалла действуют пондеромоторные силы, вызванные электрическим полем. В самом деле, электрическое поле вызывает в элементе объема кристалла диэлектрическую поляризацию, вектор которой, вообще говоря, направлен не по вектору поля. Действительно, еще Больцман обнаружил, что электрическое поле вызывает вращение шарика, вырезанного из кристалла; эта пондеромоторная сила действует вращательно на каждый элемент внутри объема нашего кристалла; иначе говоря, в нем действует объемный вращательный момент. Наличие его выразится в том, что обычно принимаемые в теории упругости соотношения вида

$$X_y = Y_x$$

здесь не сохраняются, т. е. в уравнения (19) должно входить не 6 компонентов напряжения, а 9. Не входя здесь в подробности<sup>2</sup>, заметим, однако, что для тех кристаллов, в которых не наблюдается пьезоэлектрического эффекта, соответствующие поправки — второго порядка малости, а потому могут быть отброшены, т. е. приближенно сохраняют силу уравнения (19).

Система уравнений (5), (8), (19) описывает колебания полностью, конечно, при соблюдении граничных и начальных условий, выписывать которые мы здесь не станем; при этом в ряде случаев, например, в таком важном практически случае, как кварц, адиабатические модули упругости совпадают с изотермическими [Л. 6], а потому, например, скорости распространения колебаний определяются последними.

Однако, в случае пьезоэлектрического тела скорость распространения определяется не только плотностью и модулями упругости, но еще и диэлектрическими и пьезоэлектрическими постоянными, так как они входят в уравнения (5), связывающие деформации и механические напряжения. Действительно, это и показывает точный расчет [Л. 6]. Не приводя здесь деталей вычисления, укажем, что в частном случае распространения вдоль оси  $x$ -ов в кварце мы находим для скорости распространения продольных волн выражение:

$$c = \sqrt{\frac{s_{11} - \frac{4\pi d_{11}^2}{\epsilon_{11}}}{\rho}}. \quad (20)$$

Для кварца эта поправка по сравнению с обычно применяемой формулой

$$c = \sqrt{\frac{s_{11}}{\rho}}$$

невелика, именно около 0,5%; но, например, для сегнетовой соли с ней уже нельзя не считаться при точной работе.

**Расчет пьезоэлектрических преобразователей.** Исходя из установленных уравнений, можем рассчитать любого вида пьезоэлектрический преобразователь. Как пример, приведем здесь резуль-

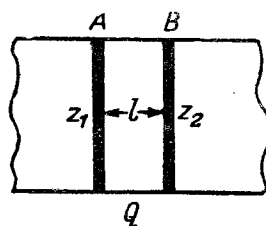


Рис. 8. Принципиальная схема пьезоэлектрического преобразователя.

тат точного расчета для колебаний по толщине кварцевой пластинки, толщина которой мала по сравнению с диаметром и с которой связаны нагрузки  $z_1$  и  $z_2$  (рис. 8). Расчет ведется так, как это сделано в работе автора.

Схема рис. 8 одинаково пригодна и для приемника, и для передатчика, и для волноуказателя, в зависимости от того, какие поля наложены на кварц — механические или электрические. Дадим как пример формулу электрического сопротивления кварца, работающего как передатчик на сопротивления  $z_1$ ,  $z_2$  и возбуждаемого наложенным на электроды A, B напряжением с частотой  $\omega$ .

Мы находим:

$$R = \frac{1}{j\omega C(1-\beta)} \left[ 1 - \frac{\beta}{kl} \frac{1}{j \sin kl} + \frac{1}{\frac{1}{z_1+a} + \frac{1}{z_2+a}} \right] \quad (21)$$

Здесь  $C$  — статическая емкость кварцевого конденсатора со свободными от нагрузок электродами

$$\beta = \frac{4\pi d_{11}^2}{\epsilon_{11} s_{11}},$$

т. е. относительная поправка к модулю упругости

$$a = j \frac{\text{tg } kl}{2},$$

$a$  — величина, определяемая только параметрами самого кварца и имеющая смысл, как это видно из (21), относительного механического сопротивления;  $z_1$ ,  $z_2$  — относительные механические сопротивления, т. е. обычные механические сопротивления, взятые в долях волнового сопротивления кварца.

Исследованием различных частных случаев устанавливается смысл этой формулы.

Так, при малых частотах и при отсутствии нагрузок находим сопротивление:

$$R = \frac{1}{j\omega C(1-\beta)}, \quad (22)$$

т. е. оно определяется не прямо емкостью кварца, но несколько уменьшенной емкостью:  $C(1-\beta)$ . Это — емкость кварцевого конденсатора при неподвижных обкладках, препятствующих пьезоэлектрическому сжатию.

Для случая свободного от нагрузки ( $z_1 = z_2 = 0$ ) кварца находим:

$$R = \frac{1}{j\omega C(1-\beta)} \left[ 1 - \frac{\beta}{kl} \cdot 2 \text{tg } \frac{kl}{2} \right]. \quad (23)$$

Вытекающее отсюда условие резонанса определяется уравнением:

$$\frac{kl}{2} = \beta \text{tg } \frac{kl}{2}. \quad (24)$$

Уравнение это показывает, что, строго говоря, собственные частоты в этом случае негар-

<sup>2</sup> Подробнее этот вопрос будет нами освещен в другой статье.

моничны, в противность общепринятому мнению; впрочем, так как для кварца  $\frac{1}{\beta} = 137$  эта негармоничность невелика.

Отметим еще один интересный результат, относящийся к этому случаю: при частотах, определяемых уравнением

$$\frac{kl}{2} = n\pi \quad (25)$$

( $n$  — целое число), пластинка кварца колеблется так, что поверхности электродов находятся в покое и игра деформаций происходит только внутри пластинки, причем сопротивление ее выражается той же формулой (22), как и в случае статических деформаций закрепленной пластинки. Этот на первый взгляд странный результат, невозможный при чисто механических колебаниях, имеет свое объяснение: именно наличие пьезоэлектрических свойств вызывает, кроме обычных напряжений типа стоячей волны, еще и напряжение, равномерное по всей толщине пластинки, как раз и компенсирующее перемещение границ.

Примером, где надлежит применять для расчета формулу (21), является передатчик ультразвука с кристаллом кварца. Мы не останавливаемся здесь на приближенных формулах, вытекающих из (21) и служащих для приближенных расчетов. Наиболее распространен передатчик типа Ланжевена, представляющий тонкую по сравнению с длиной волны в кварце пластинку, на которую наклеены толстые стальные пластины, одна из которых находится в соприкосновении с водой.

В этом случае можно ввести в расчетные формулы значительное упрощение, полагая  $\sin kl = kl$ .

Обычно утверждают, что пластинка кварца без нагрузок в виде вышеизображенных обкладок не излучает, если одна ее сторона находится в соприкосновении с водой; при этом исходят из представления, что пластинка при колебаниях «опирается» на воду, так что расширяется только в свободную от воды сторону. Что это не так, следует из формулы (21); А. А. Харкевич также указывает на это.

В наших рассуждениях мы не принимали в расчет внутренних потерь в кварце, вследствие чего единственным видом потерь являются потери на излучение.

Лауэ [Л. 10] дает расчет и для случая внутренних потерь; однако, как показал С. Э. Хайкин

[Л. 11], потери эти настолько малы по сравнению с другими видами потерь передатчика в целом, что усложнять формулы введением внутренних потерь вряд ли целесообразно. Потери в слое клея между кварцем и обкладками, в креплениях, на излучении полностью перекрывают внутренние потери. Иное дело — внутренние потери в обкладках: практика показывает, что с этими потерями нельзя не считаться, и для обкладок надлежит выбирать материал высокого качества.

Колебания кварцевой пластинки по длине, рассчитываются по той же формуле (21), только в нее входят не коэффициенты со значками, а другие. Этот расчет имеется у Лауэ [Л. 10], и Мэсона [Л. 12] в приближенном, однако, достаточном во многих случаях виде.

Нельзя под конец не упомянуть об успехах в получении пластинок кварца, имеющих малую зависимость собственной частоты от температуры, что весьма важно для волноуказателей. Последним достижением здесь является работа Мэсона, с которой можно ознакомиться по его статье [Л. 12]. Ему удалось найти такое расположение выреза пластинки из кристалла, при котором обеспечивается чрезвычайно высокая устойчивость частоты: в интервале температур от 0° до 90° С собственная частота изменяется приблизительно на  $10^{-6}$  своего значения, а в интервале от 15° до 25° С в несколько раз меньше.

### Литература

1. W. G. Cady. Piezoelectricity. N. Y. Mc Graw-Hill, p. 854, 1946.
2. W. L. Bond. A Mineral Survey for Piezoelectric Minerals. Bell. Syst. Techn. J., v. 22, p. 145, 1943.
3. М. Борн. Теория твердого тела. 1938.
4. Lord Kelvin. Phil. Mag., v. 36, p. 331, 1893.
5. W. Voigt. Lehrbuch der Kristallphysik, Leipzig, 1910.
6. Н. Н. Андреев. Равновесие и колебания пьезоэлектрического кристалла. ЖТФ, стр. 119—132, 1928.
7. W. L. Bond. The Mathematics of the Physical Properties of Crystals. Bell Syst. Techn. J., v. 22, p. 1—72, 1943.
8. F. Massa. A Working Standard for Sound Pressure Measurements. J. Ac. Soc. Am., v. 17, p. 29—34, 1945.
9. W. P. Mason. The Elastic, Piezoelectric and Dielectric Constants of Potassium, Dihydrogenphosphate and Ammonium. Dihydrogenphosphate. Phys. Rev., v. 69, p. 173—194, 1946.
10. M. Laue. Piezoelektrische erzeugene Schwingungen von Quarzstäben. Z. f. Phys. Bd. 34, p. 347—361, 1925.
11. С. Э. Хайкин. Затухание колебаний в пьезоэлектрических кристаллах кварца. Сообщения I и II. ЖПФ, т. 5, стр. 133 и 143, 1928.
12. W. P. Mason. Quarz Crystal Applications. Bell Syst. Techn. J., v. 22, p. 173—223, 1943.



# Селеновые выпрямители

Кандидат техн. наук В. Г. КОМАР

Московский энергетический институт им. Молотова

Селеновые выпрямители получили весьма широкое применение на заводах, электростанциях, радиостанциях, железных дорогах, самолетах, кораблях и во многих специальных установках. Быстрое развитие производства селеновых выпрямителей обусловлено их следующими важными преимуществами:

1. Большой срок службы и бесперебойная работа вследствие отсутствия изнашивающихся деталей.

2. Экономичность, высокий к. п. д. (до 85%), сравнительно малые габариты и вес, простота эксплуатации.

3. Большая механическая прочность; надежная работа при умеренных ударах, тряске и в наклонном положении, простота транспортировки.

4. Практически безинерционная работа, отсутствие пусковых устройств.

5. Работа при низких и высоких температурах (от  $-50^{\circ}$  до  $+75^{\circ}$  С).

Селеновые выпрямители просты в изготовлении и могут выполняться для токов и напряжений от десятых долей вольта и микроампера до сотен киловольт и десятков тысяч ампер.

Свойство нелинейности электрического сопротивления контакта селен — металл, обуславливающее выпрямление тока, впервые наблюдал Фриттс в 1883 г. [Л. 1]. Однако, промышленные типы селеновых выпрямителей были разработаны лишь в 1932—1933 гг. на основе патентов Прессером [Л. 2].

В СССР промышленные селеновые выпрямители впервые разработал И. Эрстов в 1937 г. [Л. 3]. Исследования и усовершенствования селеновых выпрямителей были произведены в Ленинградском физико-техническом институте АН СССР А. З. Левинзоном [Л. 13], в Научно-исследовательском кино-фотоинституте (НИКФИ) автором совместно с Н. Пениным и Л. Сажиним [Л. 4] и во Всесоюзном электротехническом институте С. Б. Юдицким. Массовое производство селеновых выпрямителей осуществлено на заводах электропромышленности.

Разработка теории селеновых вентилях, а

*Селеновые выпрямители — новая отрасль электротехники. Эти выпрямители нашли широкое промышленно-техническое применение. Дан обзор важнейших результатов по исследованию и разработке селеновых вентилях. Показан современный уровень, достигнутый мировой и советской наукой и техникой в данной области. Перечислены основные примечания и отмечены большие преимущества использования селеновых выпрямителей. Сформулированы основные научно-исследовательские и производственные задачи.*

также теории работы электрических цепей с селеновыми вентилями, выполненная на основе обширных экспериментальных исследований, позволила наметить правильные пути усовершенствования селеновых выпрямителей и достигнуть

существенных успехов в их производстве и эксплуатации.

Селеновый вентиль образует тонкий слой кристаллического селена, расположенный между двумя металлическими электродами: катодом, состоящим из сплава, содержащего кадмий, и контактным железным или алюминиевым электродом, покрытым никелем или висмутом (рис. 1). При прохождении тока от селена к катоду вентиль имеет малое сопротивление (прямое); при прохождении тока в противоположном направлении — большое сопротивление (обратное).

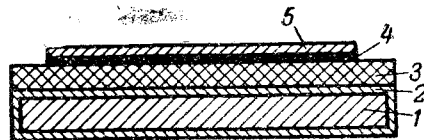


Рис. 1. Схематический разрез селенового вентиля.

1—контактный электрод—железный или алюминиевый диск; 2—слой никеля на железном или алюминиевом диске; 3—основной слой кристаллического селена; 4—запорный слой; 5—катод—сплав кадмия с висмутом.

**Теория работы селенового вентиля.** Выпрямительное действие селенового вентиля связано с большим изменением электрического сопротивления тонкой пограничной части селенового слоя — запорного слоя — при изменении направления прохождения тока через вентиль<sup>1</sup>.

Современную теорию выпрямительного действия селенового вентиля разработали в 1938 г. Б. Давыдов и затем Шоттки [Л. 5]. Согласно современной теории изменение сопротивления запорного слоя происходит благодаря замечательному свойству селена сильно менять свою электропроводность под действием объемного элек-

<sup>1</sup> Запорный слой селенового вентиля, имеющий высокое сопротивление при обратном токе, обнаруживается у катода измерением распределения напряжения в селеновом слое.



трического заряда. Положительный объемный заряд может увеличить, а отрицательный—уменьшить электропроводность селена на несколько порядков.

Зависимость электропроводности от объемного заряда объясняется тем, что проводимость селена является дырочной, т. е. носителями тока являются дырки (не занятые электронами места—свободные уровни энергии в нормальной энергетической зоне). Так как концентрация дырок в селене невелика (чем объясняются его полупроводящие свойства), то даже небольшой объемный заряд приводит к существенному изменению концентрации дырок и, следовательно, к значительному изменению электропроводности селена.

По теории Давыдова-Шоттки при прохождении через вентиль тока в пограничной части селенового слоя возникает объемный заряд вследствие неоднородности этого слоя (неравномерная концентрация дырок). При отсутствии тока концентрация дырок у катода значительно меньше, чем в основной толще селена. Поэтому прохождение тока от селена к катоду приводит к повышению концентрации дырок в запорном слое (прямой ток). При этом в первые моменты времени после включения вентиля количество дырок, приходящих к запорному слою, больше, чем количество, уходящих от запорного слоя. При противоположном направлении прохождения тока происходит снижение концентрации дырок в запорном слое (обратный ток).

Теория выпрямительного действия была уточнена и развита А. Ф. Иоффе, который предположил, что повышенное сопротивление пограничного слоя в селеновом венти́ле при отсутствии тока обусловлено, главным образом, не контактной разностью потенциалов, а переходом проводимости пограничного слоя от дырочной к электронной [Л. 6].

Исследования А. Ф. Иоффе электропроводности полупроводников в сильных электрических полях послужили основанием для объяснения процесса пробоя селеновых вентиля́ей.

Изложенная теория выпрямительного действия не является полной; она не объясняет такие важные процессы, как старение и формовка. Нами были сделаны предположения об ионном характере этих процессов. Старение (медленное необратимое повышение прямого сопротивления вентиля) объясняется диффузией и изменением концентрации ионов примеси или дефектов решетки, что приводит к уменьшению концентрации дырок и снижению электропроводности полупроводника. Формовка (медленное повышение обратного сопротивления вентиля под действием больших обратных токов) объясняется ионной проводимостью—перемещением ионов примеси в полупроводнике, что приводит к уменьшению концентрации дырок в пограничном слое полупроводника.

Многочисленные опытные данные подтвердили справедливость современной теории работы селенового вентиля и показали ошибочность старых теорий (теория холодной эмиссии электронов Ван-Галля и др.).

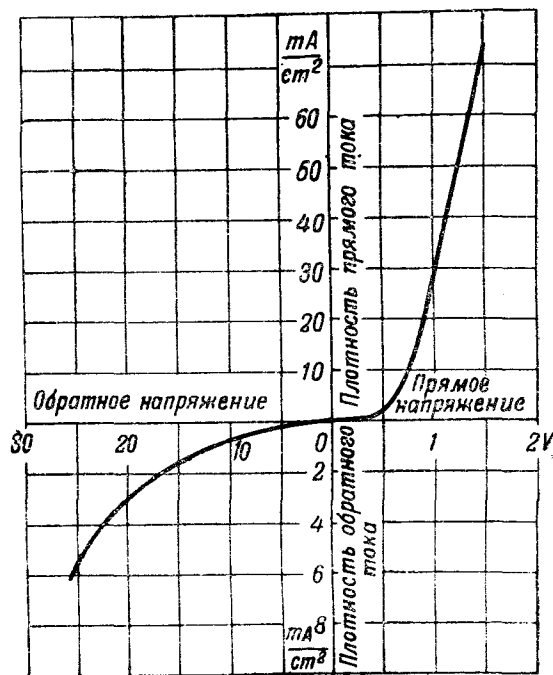


Рис. 2. Вольтамперная характеристика селенового вентиля среднего качества.

#### Основные свойства селеновых вентиля́ей.

Вольтамперная характеристика, зависимость между мгновенными значениями тока и напряжения вентиля, определяет важнейшие его свойства. Нелинейный характер вольтамперной характеристики (малое прямое и большое обратное сопротивление) и создает выпрямительное действие селенового вентиля.

На рис. 2 показана вольтамперная характеристика среднего по качеству отечественного вентиля, снятая при постоянном токе и комнатной температуре. При напряжениях до 0,01 V почти нет разницы между сопротивлениями вентиля для противоположных направлений прохождения тока (плотность тока — доли микроампера на квадратный сантиметр). Это объясняется, по-видимому, тем, что объемные заряды, возникающие в запорном слое при очень малых токах, незначительны и не могут существенно изменить имеющуюся концентрацию носителей тока.

При увеличении обратного напряжения сопротивление вентиля сначала увеличивается за счет уменьшения концентрации носителей тока. Однако, при возрастании напряжения свыше приблизительно 0,2 V сопротивление вентиля начинает уменьшаться за счет ионизирующего действия сильного электрического поля. При напряжениях свыше 25—35 V обратный ток вентиля достигает чрезмерно большой величины, и вентиль в значительной мере теряет свои выпрямительные свойства.

С возрастанием температуры прямое сопротивление селенового вентиля уменьшается (рис. 3). Для обычных рабочих температур 20—60° C увеличение температуры на 10° C дает при неизменном токе снижение прямого напряжения на 8—12%. Эта температурная зависимость объясняется увеличением электропровод



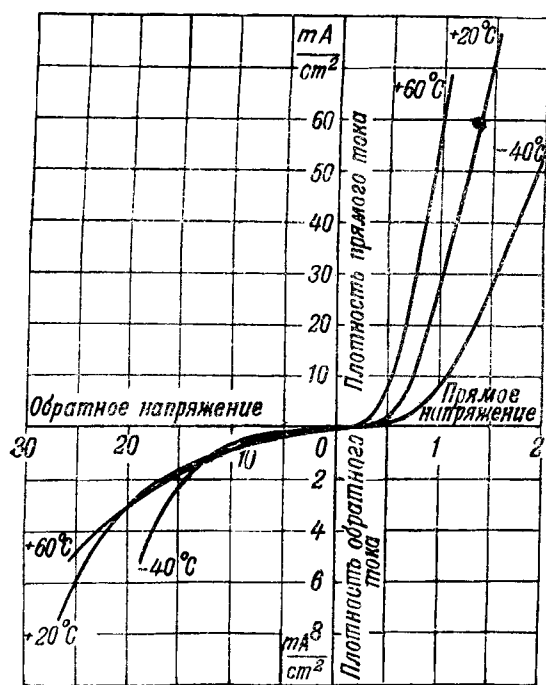


Рис. 3. Вольтамперные характеристики селенового вентиля при различных температурах.

ности селена при возрастании температуры за счет роста концентрации дырок.

При малых обратных напряжениях на вентиле (доли вольта) температурная зависимость сопротивления вентиля также отрицательна и имеет такой же порядок, как и при прямом токе. При неизменном напряжении относительное изменение тока при возрастании температуры, естественно, больше за счет нелинейной вольтамперной характеристики.

В области обычных рабочих температур и напряжений (10—20 В) температурная зависимость обратного сопротивления значительно меньше указанной выше, а при больших напряжениях и низких температурах температурная зависимость сопротивления становится даже положительной. Это объясняется ослаблением ионизирующего действия электрического поля при возрастании температуры.

Температурная зависимость сопротивления вентиля дает основание предполагать, что ионизирующее действие сильного поля в селене, приводящее к увеличению концентрации носителей тока, связано с длиной свободного пробега электрона, т. е. соответствует механизму ударной ионизации. При снижении температуры увеличение длины свободного пробега электрона повышает вероятность перехода электронов из нормальной энергетической зоны на локальные уровни или в зону проводимости. Таким образом, в селеновом вентиле, повидимому, не имеют места те механизмы повышения электропроводности в сильном поле, которые не дают возрастания электропроводности с понижением температуры или дают лишь относительное, а не абсолютное возрастание, как, например, туннельный эффект через запрещенную полосу или

снижение потенциального барьера для отдельного электрона (Френкель [Л. 7]).

Вольтамперные характеристики селеновых вентилях принято выражать приближенными эмпирическими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u_{an} \left( \frac{i_a}{i_{an}} \right)^{\alpha_1}, \\ i_r &= i_{rn} \left( \frac{u_r}{u_{rn}} \right)^{\alpha_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь:  $u_a$ ,  $i_a$  — мгновенные значения, соответственно, прямого напряжения и тока вентиля;  $u_r$ ,  $i_r$  — мгновенные значения, соответственно, обратного напряжения и тока вентиля;  $u_{an}$  — класс вентиля по прямому напряжению — напряжение на вентиле, соответствующее прямому току классификации ( $i_{an}$ ); при классификации плотность тока вентиля — 50 мА/см²;  $u_{rn}$  — класс вентиля по обратному напряжению — напряжение на вентиле, соответствующее обратному току классификации ( $i_{rn}$ ); для этого тока классификации плотность тока вентиля принята 4 мА/см²;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — параметры вентиля.

Уравнения (1) лишь приближенно выражают вольтамперную характеристику. Значения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  для данного вентиля несколько зависят от рабочего диапазона токов и напряжений.

Параметры  $u_{an}$ ,  $u_{rn}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  существенно зависят от технологии изготовления вентилях. Однако, и при одном и том же технологическом процессе параметры отдельных вентилях значительно отличаются друг от друга. Этот разброс объясняется значительным влиянием примесей на электропроводность селена. Для большей части отечественных промышленных вентилях  $u_{an} = 0,9 - 1,5$  В,  $u_{rn} = 15 - 30$  В,  $\alpha_1 = 0,25 - 0,5$ ,  $\alpha_2 = 2 - 4$ . Отдельные вентиля имеют лучшие данные.

Класс вентиля ( $u_{rn}/u_{an}$ ) является важной характеристикой его качества. Качество селенового вентиля иногда характеризуют коэффициентом выпрямления — отношением прямого тока к обратному при данных напряжениях. Например, при напряжении 2 В коэффициент выпрямления селенового вентиля обычно достигает нескольких тысяч.

Вольтамперная характеристика селенового вентиля не проходит через начало координат; вентиль имеет собственную э. д. с. порядка единиц или десятков, а иногда и сотен милливольт. Большая температурная зависимость собственной э. д. с. указывает на ее особый термический характер. Практическое значение собственной э. д. с. невелико, так как она обычно ничтожно мала по сравнению с внешними э. д. с.

Вольтамперная характеристика селенового вентиля практически не зависит от малых механических давлений (доли килограмма на квадратный сантиметр). При больших давлениях на катод обратное напряжение вентиля уменьшается,

но при снятии давления оно восстанавливается вновь. Дальнейшее повышение давления (порядка сотен килограммов на квадратный сантиметр) приводит к необратимому снижению обратного напряжения.

Падение обратного сопротивления от давления, повидимому, связано с деформациями и механическими повреждениями запорного слоя. Это явление не имеет существенного значения в эксплуатации. Конструкция выпрямителей выполняется таким образом, что выпрямители обладают высокой механической прочностью и мало чувствительны к ударам и тряске.

Вольтамперная характеристика селенового вентиля, снятая при переменном токе, как правило, мало отличается от характеристики, снятой при постоянном токе. Это небольшая обычно разница обусловлена влиянием формовки, усталости или емкости вентиля (см. ниже).

Пробой селеновых вентиляей (рис. 4) заключается в тепловом разрушении части селенового слоя и катода под действием больших обратных токов. Пробой происходит обычно при обратных напряжениях с амплитудой порядка 50—80 В. Пробой сопровождается

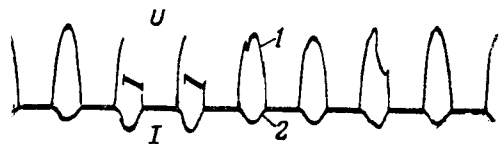


Рис. 4. Осциллограмма пробоя селенового вентиля.  
1—напряжение на вентиле; 2—ток вентиля.

искрой (с характерным треском) и приводит к расплавлению катода и к оплавлению селена. Вследствие образования стекловидного селена пробитое место обычно не проводит тока, и вентиль после пробоя продолжает работать. Иногда после пробоя (особенно при малой величине тока или при постоянном токе) селеновый вентиль оказывается закороченным.

Причиной пробоя селеновых вентиляей является чрезмерное увеличение обратного тока (в слабых местах с пониженным сопротивлением) вследствие возрастания электропроводности селена в сильном электрическом поле, обусловленном большим обратным напряжением.

Пробивное напряжение имеет большое значение для эксплуатации. Обычно для обеспечения надежной работы из соображений электрической прочности не допускают длительного обратного напряжения на селеновых вентилях с амплитудой свыше 25 В.

Старение селеновых вентиляей заключается в необратимом повышении их прямого сопротивления с течением времени (рис. 5). Старение сильно зависит от температуры [Л. 8]. Повышение прямого сопротивления происходит не только в работе, но и при комнатной температуре в обесточенном состоянии. Для различных вентиляей (в особенности изготовленных по разной технологии) старение происходит различно. Это объясняется, повидимому, большим влиянием на этот процесс ряда примесей даже в самых ничтожных количествах (см. ниже).

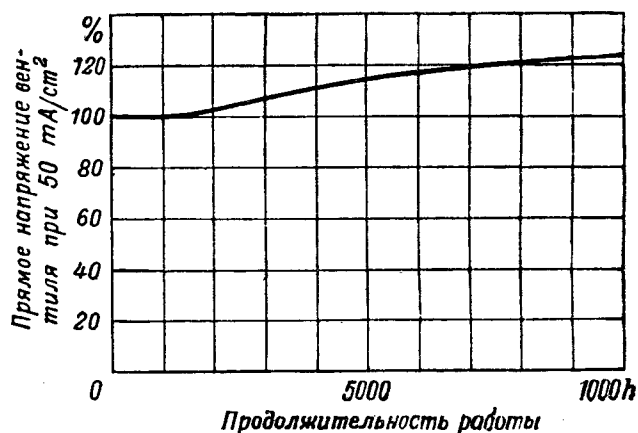


Рис. 5. Средняя кривая старения селеновых вентиляей.

Наибольшее изменение прямого сопротивления происходит обычно в первые тысячи часов работы. После 10 000—20 000 h работы в номинальном режиме прямое сопротивление вентиля может возрасти на 50% от первоначальной величины. Германские фирмы указывали условный срок службы своих селеновых выпрямителей 3 000—15 000 (SAF), 10 000 (SSW) и 25 000 h (AEG) для номинальной нагрузки при окружающей температуре  $+35^{\circ}\text{C}$ . Условным сроком службы называется продолжительность работы выпрямителя, в течение которой напряжение на выходе выпрямительного столба уменьшается на 10% для номинального напряжения на входе столба и номинального тока нагрузки. После истечения условного срока службы выпрямители еще могут длительно работать либо при пониженном выпрямленном напряжении, либо при номинальных выпрямленных токах и напряжениях, но с повышенным напряжением на входе столба (например, после переключения витков обмотки трансформатора). Отечественные селеновые выпрямители в среднем стареют так же, как иностранные. Старение селеновых вентиляей имеет, естественно, большое значение и ограничивает длительную максимально допустимую температуру значением  $75^{\circ}\text{C}$ .

**Формовка и расформовка.** Формовка селеновых вентиляей заключается в увеличении их обратного сопротивления при прохождении через вентиль обратного тока. Возрастание обратного сопротивления при формовке обычно ускоряется с увеличением тока и температуры.

Формовка имеет большое значение для улучшения качества селеновых вентиляей. Вновь изготовленные вентили формируются на заводах-изготовителях. Отформованные вентили сохраняют повышенное обратное сопротивление в течение длительной эксплуатации. При хранении селеновых вентиляей несколько месяцев в обесточенном состоянии их обратное напряжение медленно уменьшается до величины, близкой к первоначальной (до формовки).

Расформовка селеновых вентиляей не имеет большого значения, так как включенные в работу после длительного перерыва вентили быстро формируются и практически полностью вос-

становливают свое обратное сопротивление, обычно без каких-либо повреждений.

Усталость (ползучесть) селеновых вентилях (в отличие от меднозакисных), как правило, почти не наблюдается. Однако, при некоторых нарушениях технологического процесса, особенно после длительной работы, обнаруживается усталость селеновых вентилях — обратное возрастание обратных токов (не температурного характера) под действием обратного напряжения. Вследствие усталости вольтамперная характеристика, снятая при переменном или пульсирующем токе, отличается несколько меньшими значениями обратных токов от вольтамперной характеристики, снятой при постоянном токе.

Усталость имеет большое значение для работы вентилях в цепях постоянного тока, ограничивая длительное максимально-допустимое напряжение на вентилю величиной обычно 15 В.

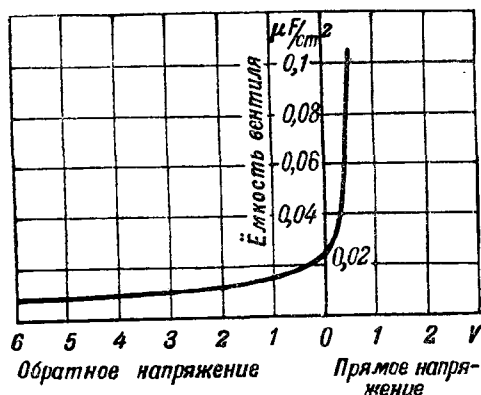


Рис. 6. Емкость селенового вентиля в зависимости от напряжения постоянного тока.

Емкость обыкновенных селеновых вентилях достигает 0,01—0,03 мкФ/см². Емкость зависит от величины напряжения на вентилю (рис. 6). Указанная зависимость подтверждает теорию выпрямления Давыдова-Шоттки, согласно которой повышение емкости при уменьшении обратного напряжения и при переходе к прямому напряжению связано с уменьшением толщины запиорного слоя.

Емкость селеновых вентилях имеет большое значение только для работы при повышенных частотах (тысячи герц и выше).

Влажность атмосферы и пары кислот могут неблагоприятно влиять на селеновые вентилях. Нами было показано, что комнатная влажность практически не влияет на свойства селеновых вентилях. Под воздействием атмосферы с влажностью 95% в течение тысяч часов незащищенные селеновые вентилях медленно уменьшают обратное сопротивление. При продолжительной работе в атмосфере с влажностью 100% или в парах концентрированной серной, азотной или соляной кислот селеновые вентилях выходят из строя.

Хорошую защиту дают асфальтовые лаки воздушной сушки и ряд масляных эмалей. Хуже защищают нитролаки. Защищенные лакокрасочным покрытием селеновые выпрямители допу-

скают продолжительную эксплуатацию в атмосфере с влажностью 95% [Л. 4]. Надежную защиту от атмосферных воздействий дает погружение селеновых выпрямителей в трансформаторное (бескислотное) масло.

**Технология изготовления селеновых выпрямителей.** При разработке технологии производства селеновых выпрямителей, предназначенных для силовых установок, решались следующие три основных задачи: 1) уменьшение прямого сопротивления (улучшение класса вентиля по прямому напряжению); 2) увеличение обратного сопротивления (улучшения класса вентиля по обратному напряжению и повышение пробивного напряжения); 3) получение долговечного вентиля (уменьшение старения и сохранение высокого пробивного напряжения).

Решение этих задач привело к созданию надежных выпрямителей с малыми весами, размерами и высоким к. п. д.

Прямое сопротивление селенового вентиля складывается из сопротивлений следующих трех основных частей (рис. 1): 1) толщина селенового слоя; 2) пограничный слой между селеном и катодом; 3) пограничный слой между селеном и контактным электродом.

Уменьшение сопротивления толщи селенового слоя было достигнуто следующими способами: 1) уменьшение толщины слоя селена; 2) очистка селена от металлических примесей для повышения его электропроводности; 3) внесение в селен примеси галоидов для повышения его электропроводности; 4) термическая обработка селенового слоя для повышения электропроводности селена.

Повышенное сопротивление пограничного слоя между селеном и контактным электродом было практически устранено путем никелирования железных или алюминиевых дисков для контактных электродов.

Сопротивление пограничного слоя между селеном и катодом снижалось до минимума лишь в той неактивной части, где практически не образуется объемного заряда при обратном токе. Сопротивление же активной части пограничного слоя селена (запорный слой) получалось оптимальным, обеспечивающим, с одной стороны, достаточно малое прямое сопротивление и, с другой, — достаточно большое обратное сопротивление.

Получение оптимального сопротивления пограничного слоя селена достигалось следующими способами: 1) выбор материала катода вентиля (применение сплавов кадмия); 2) термическая обработка для удаления галоидов из поверхностного слоя селена; 3) нанесение на поверхность селена различных веществ (применение обработки поверхности селена в парах серы).

Селен является основным материалом при изготовлении вентилях. Технология заводской очистки селена для выпрямителей была разработана в СССР Б. Леви (НИУИФ). Важные усовершенствования в технологию очистки селена были затем внесены С. Голянд (НИОГАЗ). Нами совместно с К. Астаховым, Б. Леви и Н. Пениным было исследовано влияние примесей

в селене на свойства селеновых вентилях [Л. 4]. Исследовалось влияние около двадцати различных элементов. Было установлено, что большая часть примесей в количестве порядка 0,1% и более неблагоприятно влияет на свойства вентилях, повышая прямое сопротивление, уменьшая обратное сопротивление и усиливая старение. К числу указанных вредных примесей относятся: цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, мышьяк, никель, железо, сера, теллур и кислород. Особенно вредны примеси меди, серебра и сурьмы, повышающие прямое сопротивление и усиливающие старение даже в количестве 0,001%.

Было установлено благоприятное влияние весьма малых количеств хлора, брома и йода (сотые доли процента) на снижение прямого сопротивления. Одновременно выяснили, что чрезмерно большое содержание галоидов приводит не только к уменьшению обратного сопротивления, но и к снижению пробивного напряжения.

Применяемый в СССР для выпрямителей селен содержит несколько сотых долей процента хлора; медь, серебро и сурьма в нем отсутствуют; сумма других металлических примесей не превышает 0,01% (нелетучий остаток).

Контактный электрод селенового вентиля изготавливается из листов железа или алюминия толщиной от 0,8 до 1,5 мм. Резка и штамповка этих листов производятся таким образом, что поверхность диска оказывается совершенно плоской, это необходимо для получения тонкого равномерного слоя селена.

Последующая пескоструйная обработка обеспечивает хорошее механическое сцепление и надлежащий электрический контакт селена с металлическим электродом. Никелирование отпескоструйных дисков или пластин производится с толщиной 1—2 м, что обеспечивает не только малое прямое сопротивление вновь изготовленных вентилях, но и уменьшает их последующее старение. Технологический процесс тонкого никелирования железных и алюминиевых дисков для контактных электродов был разработан нами вместе с А. Гопиус [Л. 4].

Нанесение селена на контактный электрод производится путем наплавления; контактный электрод нагревается приблизительно до 250°С, и селен плавится. Быстро охлажденные диски с наплавленным стекловидным селеном затем прессуются для получения тонкого равномерного слоя селена. Прессовка осуществляется при одновременном прогреве селена до 110—120°С и давлении в несколько десятков килограммов на квадратный сантиметр. Выдержка селена под давлением продолжается несколько минут, до кристаллизации поверхностной части селенового слоя. Селеновый слой после прессовки имеет толщину 0,07—0,1 мм.

Прессовка селена производится на специальных прессах, обеспечивающих постоянное равномерное давление. Применение хромированных матриц предохраняет селен от загрязнений.

Термическая обработка селенового слоя производится в печах при температуре около 215°С. Поверхность селена остается при

этом открытой. Из верхней части селенового слоя частично улетучивается хлор, что повышает обратное сопротивление вентиля. Электропроводность селена в толще значительно возрастает, что может быть объяснено увеличением числа дефектов кристаллической решетки в связи с тем, что температура при термообработке близка к температуре плавления селена (217°С). Г. Жданов и Ю. Шарвин с помощью рентгеновского анализа показали, что при термической обработке параметры решетки селена не меняются, так же как и во время старения вентилях [Л. 9].

Термическая обработка производится в специальных печах с автоматической и точной регулировкой температуры.

Нанесение серы на поверхность селена осуществляется после термической обработки. Диски выдерживаются в парах серы при температуре около 150°С в течение нескольких десятков минут. При этом сера растворяется в поверхностном слое селена и повышает его сопротивление.

Нанесение серы производят в специальных печах с автоматической, точной регулировкой температуры и с перемешиванием тяжелых паров серы.

Нанесение катода производится с помощью металлатора сжатым воздухом, напыливающим расплавленный металл на селен.

Для металлизации применяются сплавы технически чистых металлов: кадмия, олова и висмута. Наши исследования, выполненные вместе с А. Шпагиным и Н. Пениным, показали, что материал катода сильно влияет на прямое и обратное сопротивление вентилях, а также на старение и формовку [Л. 4]. Изменение содержания кадмия в катоде от 10 до 100% (остальное олово и висмут) практически не меняет характеристики вентилях. Применение химически активных по отношению к селену металлов (магний, кальций) приводит к чрезмерно большому прямому сопротивлению, а также к сильному старению вентилях. Селеновые вентиля с цинковым катодом весьма близки по своим свойствам к вентилям с кадмиевым катодом.

Наибольшее возрастание обратного сопротивления при формовке наблюдается для вентилях с таллиевыми катодами. Эти вентилях имеют также наивысшее отношение обратного напряжения к прямому напряжению классификации  $\frac{U_{rn}}{U_{cn}}$ , т. е. обеспечивают наибольший к. п. д. выпрямителя. Однако, вентилях с таллиевым катодом или с катодами, содержащими небольшую примесь таллия, стареют сильнее, чем обыкновенные вентилях.

Формовка на заводах-изготовителях производится после металлизации пропусканием через вентилях большого обратного тока (плотность тока несколько десятков миллиампер на квадратный сантиметр) в течение от десятков минут до нескольких часов. Класс вентилях по обратному напряжению повышается при этом в 1,5—2 раза.

Формовка производится на специальных пультах, которые автоматически поддерживают ток в необходимых пределах. Для ограничения прямого тока и во избежание излишнего нагрева вентили при формовке включаются встречно и присоединяются к цепи переменного тока через активное сопротивление.

Большое влияние материала катода, величины тока и температуры на процесс формовки указывают на большую роль в этом процессе ионов металла катода, проникающих под действием сильного электрического поля в запорный слой и изменяющих его электропроводность.

Испытание вентиля проводится после формовки. Все вновь изготовленные вентили испытывают на электрическую прочность и классифицируют по прямому и обратному напряжениям. Закороченные или сильно поврежденные вентили после испытания на электрическую прочность бракуются. В СССР принято классифицировать селеновые вентили при постоянном токе при плотности прямого тока  $50 \text{ mA/cm}^2$  (или  $40 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ ) и плотности обратного тока  $4 \text{ mA/cm}^2$  (или  $2 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$ ). Амплитуда испытательного напряжения на прочность составляет около  $50 \text{ V}$ .

Сборка выпрямительных столбов заключается во взаимном механическом креплении и электрическом соединении вентилях. Вентили в столбе соединяются с помощью металлических втулок и изоляционных шайб по различным схемам. При больших токах нагрузки отдельные вентили соединяются между собой параллельно. В случае повышенных напряжений применяют последовательное соединение вентилях. Последовательно и параллельно соединенные вентили образуют плечи выпрямительного столба. При большом количестве вентилях отдельные столбы вентилях устройства электрически соединяются между собой.

Применяются три основных конструкции столбов. При первой конструкции отдельные вентили располагаются в изоляционной трубке и сжимаются между собой пружиной. Таким образом, собираются только малые вентили диаметром 5 и 10 мм. При второй (наиболее распространенной) конструкции отдельные вентили располагаются на общей изолированной шпильке. Между вентилями размещаются соединительные или изоляционные шайбы для обеспечения надлежащих охлаждающих каналов. Указанным способом собираются вентили диаметром от 20 до 130 мм. Третья конструкция применяется при весьма больших токах. Вентили располагаются на общей металлической плите и соединяются этой плитой между собой параллельно.

Испытание выпрямительных столбов. Проверяется электрическая прочность и сопротивление изоляции между токоведущими частями и крепежными деталями столба.

Результирующий обратный ток вентилях в столбе проверяется измерением потерь мощности или тока на входе при опыте холостого хода столба. Результирующее прямое сопротивление вентилях в столбе проверяется измерением по-

тер мощности или напряжения на входе при опыте короткого замыкания столба.

Электрическая прочность вентилях в столбе проверяется при холостом ходе включением столба на повышенное напряжение (на 30—50% сверх номинала). Отдельные столбы из партий испытываются на старение.

Указанная выше технология изготовления селеновых выпрямителей была разработана в СССР и принята для заводского производства. По ряду технологических операций она оказалась более совершенной, чем германская технология [Л. 10]. Например, применение изоляционной шайбы под катодом отечественных вентилях дает преимущество более простой и надежной конструкции. Лакировка столба при этом осуществляется погружением в лак, что дает более совершенную защиту от атмосферных воздействий. Отсутствие пружинных контактных шайб, применяемых германскими фирмами, дает, кроме того, лучшее охлаждение вентилях. Важнейшие операции напрессовки селена и нанесения серы выполняются у нас лучше, чем на заводах фирмы Siemens.

В годы второй мировой войны фирма AEG начала крупное производство селеновых выпрямителей по новому — вакуумному способу изготовления. Большие алюминиевые листы после очистки и пескоструйной обработки (для получения шероховатой поверхности) покрываются в вакууме тонким слоем висмута для обеспечения надлежащего контакта селена с алюминием. Затем селен путем возгонки в вакууме осаждается на висмутированных алюминиевых листах. Листы после термической обработки селена разрезаются на пластины разных размеров. Затем на поверхность селена осаждаются пары двуокиси селена (повышающие обратное сопротивление) и на пластины с помощью металлатора набрызгивается катодный сплав.

Вакуумный способ изготовления, по которому велись работы также и в СССР, дает следующие преимущества: 1) малое прямое сопротивление за счет тонкого слоя селена (около  $0,04 \text{ mm}$ ); падение напряжения  $0,7\text{—}0,9 \text{ V}$  при  $50 \text{ mA/cm}^2$ ; 2) возможность изготовления выпрямительных пластин большого размера,  $200 \text{ mm}^2$  и более. Вакуумный способ изготовления селеновых выпрямителей требует громоздкого оборудования и он нуждается в дальнейшем усовершенствовании.

За границей применяют селеновые вентили со следующими диаметрами: 5, 10, 18, 25; 35, 67, 84, 112 мм. Вакуумным способом изготавливаются также квадратные пластины размером 32, 40, 60, 75, 100 мм. Имеется сообщение об изготовлении фирмой GEC (США) селеновых вентилях  $152 \times 185 \text{ mm}$  [Л. 11].

В СССР изготавливались промышленные селеновые вентили почти всех указанных размеров. НИКФИ был предложен новый сортамент селеновых вентилях с диаметрами 5, 10, 20, 30, 50, 80, 130 мм. Сортамент отличается меньшим количеством размеров. Параллельное соедине-

ние двух вентилях при этом не дублирует вентиля большего диаметра.

**Применение селеновых выпрямителей.** Селеновые выпрямители находят широкое и многообразное применение. Область их применения ограничена мощностями до нескольких десятков киловатт. При более высоких мощностях обычно целесообразно применять по соображениям стоимости или к. п. д. другие типы выпрямителей, например ртутные. Коэффициент полезного действия селеновых выпрямителей при выпрямленных напряжениях менее 80—100 В выше, чем к. п. д. ртутных или газотронных выпрямителей.

Селеновые выпрямители широко применяются для следующих целей.

**Зарядка аккумуляторов и буферная работа с аккумуляторами** часто осуществляется с помощью селеновых выпрямителей. Было разработано большое количество различных типов селеновых выпрямителей для зарядки аккумуляторных батарей на токи от десятых долей ампера до нескольких десятков ампер и на напряжение от нескольких вольт до сотен вольт. В СССР было изготовлено много селеновых зарядных выпрямителей с широкой регулировкой тока и напряжения с помощью трансформаторов с магнитным шунтом или с помощью дросселей насыщения [Л. 14].

Селеновые выпрямители используются в гаражах, на базах и аэродромах для зарядки стартерных батарей автомашин, самолетов и других машин с двигателями внутреннего сгорания.

**Питание электролизных ванн** от селеновых выпрямителей дает большие преимущества. Гальванические селеновые выпрямители изготавливаются на токи от десятков до тысяч ампер при напряжениях порядка 10 В. В СССР были разработаны селеновые выпрямители на ток до 1 000 А. За границей имеются исполнения на 15 000 А [Л. 15]. Регулирование тока часто осуществляется переключением витков обмотки трансформатора. Выпрямители, погруженные в масло, допускают длительную работу при установке непосредственно около ванны.

Селеновые выпрямители применяются в электролизных цехах заводов для меднения, цинкования, кадмирования, хромирования, никелирования и др. В НИКФИ были разработаны селеновые выпрямители для питания ванн регенерации серебра при кино-копировальных процессах.

**Питание электрических дуг** часто осуществляется от селеновых выпрямителей. В СССР было разработано несколько типов селеновых выпрямителей для питания электрических дуг на токи от 3 до 60 А при напряжении от 20 до 60 В. Был разработан селеновый выпрямитель с экономичной феррорезонансной стабилизацией тока дуговой кинолампы мощностью  $2 \times 2,5$  кВт, для кинотеатров [Л. 14]. Разработан, кроме того, стабилизированный селеновый выпрямитель для питания электрической дуги при спектральном анализе [Л. 16]. За границей селеновые выпрямители применяются для дуговой электросварки.

**Возбуждение электрических генераторов** может с большим успехом осуществляться от селеновых выпрямителей. С. Юдицкий (ВЭИ) разработал систему возбуждения и компаундирования синхронных машин с помощью селеновых выпрямителей без применения вращающихся возбудителей [Л. 17].

**Питание радиолокационных установок и устройств радиосвязи.** Известно применение селеновых выпрямителей для питания накальных, анодных и сеточных цепей генераторных ламп на радиостанциях (до 3 кВ). Несмотря на меньший к. п. д. селеновых выпрямителей (для анодных и сеточных цепей), они применяются вместо ионных приборов благодаря их преимуществу длительной и бесперебойной работы и большой механической прочности, что имеет особенно важное значение для передвижных сухопутных установок и кораблей.

Большие перспективы имеет применение селеновых выпрямителей для питания радиолокационных установок.

**Измерительные приборы.** Были разработаны (НИКФИ) специальные измерительные селеновые вентили с повышенной стабильностью сопротивления и уменьшенной емкостью для работы при частоте 10 000 Hz.

**За границей селеновые выпрямители** применяются в универсальных многопредельных приборах для измерения токов и напряжений в цепях переменного тока. При этом указанные приборы имеют небольшое потребление мощности и позволяют измерять весьма малые токи и напряжения.

**Питание электромагнитов аппаратов** часто осуществляется от селеновых выпрямителей. Применяются реле постоянного тока с селеновыми выпрямителями вместо реле переменного тока. Применяют селеновые выпрямители для питания электромагнитных плит к шлифовальным станкам. Селеновые выпрямители используются для питания приводных электромагнитов, например, масляных выключателей.

Были разработаны маломощные генераторы переменного тока с постоянными магнитами и селеновыми выпрямителями в главной цепи [Л. 14]. Несмотря на некоторое снижение к. п. д., новая система имеет преимущество более надежного и простого выполнения и нетребовательна в уходе.

Интересно применение синхронного генератора с селеновым выпрямителем на 800 А для питания бортовой сети самолета вместо ранее применявшегося генератора постоянного тока [Л. 11].

**Стабилизаторы и регуляторы напряжения и тока.** Известны различные типы стабилизаторов напряжения для питания отдельных потребителей от общей сети переменного тока. Автор разработал экономичный статический стабилизатор напряжения с селеновыми выпрямителями и магнитно-насыщенными катушками [Л. 18]. Большое количество стабилизаторов и регуляторов тока и напряжения с селеновыми выпрямителями разработала фирма ASEA [Л. 19].



**Магнитные усилители.** Селеновые выпрямители последнее время начинают применять в магнитных усилителях различных устройств автоматического управления. По сравнению с ламповыми магнитные усилители имеют то преимущество, что они работают бесперебойно и механически более прочны. Недостатком магнитных усилителей является большое искажение, вносимое ими в форму кривых токов и напряжений. Однако, этот недостаток не имеет большого значения для работы обычных систем управления.

**Сеточное управление** ионными преобразователями тока с помощью селеновых выпрямителей имеет большие перспективы. Селеновые выпрямители применяются для получения отрицательного смещения потенциала на сетках тиратронов или управляемых ртутных вентилей. Большие эксплуатационные преимущества имеют статические системы управления ионными приборами с селеновыми вентилями и магнито-насыщенными катушками. Указанные устройства дают регулируемые по фазе напряжения с крутым фронтом кривой, что обеспечивает точное зажигание ионных вентилей.

**И. Л. Каганов** разработал статические магнито-насыщенные регуляторы для сеточного управления мощными выпрямительными и инверторными установками.

**Сигнализация и автоблокировка** на железных дорогах с успехом осуществляется от селеновых выпрямителей [Л. 20].

Кроме указанных областей применения селеновые выпрямители используются для многих других целей: питание телефонных и телеграфных линий связи и последовательное включение вентилей в линии для удвоения их пропускной способности, использование в установках испытания изоляции кабелей, питание рентгеновских аппаратов, детектирование в цепях высокой частоты, электростатическая очистка газов, катодная антикоррозионная защита, телеконтроль, гашение искр в цепях постоянного тока и др.

**Заключение.** Селеновые выпрямители являются надежными и экономичными устройствами. Это подтверждается безаварийной продолжительной работой большого числа выпрямителей как отечественных, так и иностранных.

Во многих случаях селеновые выпрямители дают в работе большие технические и экономические преимущества по сравнению с выпрямителями другого рода.

Важнейшими задачами дальнейшей работы являются:

1. Развитие и углубление теории работы селенового вентиля. Изучение вентильного действия, старения, формовки и пробоя.

2. Развитие и углубление теории работы электрических цепей с селеновыми вентилями.

3. Усовершенствование технологии производства селеновых выпрямителей. Повышение класса вентилей и уменьшение их старения. Упро-

щение вакуумного способа изготовления селеновых вентилей.

4. Расширение производства селеновых выпрямителей. Разработка и изготовление селеновых выпрямителей новых типов.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что при составлении настоящего обзора он воспользовался рядом ценных указаний доктора техн. наук, проф. И. Л. Каганова.

### Литература

1. C. Fritts. Amer. J. Sci., v. 26, p. 465, 1883.
2. E. Presser. Der Selengleichrichter. ETZ, b. 53, 7 Ar., 1932.
3. И. Л. Эристов, А. И. Стефановский. Селеновые металлические выпрямители. ИЭСТ, № 11, 1938.
4. В. Г. Комар, Н. А. Пенин, Л. И. Сажин. Отчеты по исследованию и разработке селеновых выпрямителей. НИКФИ, 1938—1946.
5. Б. Давыдов. О выпрямляющем действии полупроводников. ЖТФ, т. VIII, стр. 3, 1938.
- W. Schottky. Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht und Spitzengleichrichter. Z. f. Phys., B. 113, № 5—6, S. 367, 1939.
6. А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение. Электричество, № 1, 1946.
7. Я. Френкель. К теории электрического пробоя в диэлектриках и полупроводниках. Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 8, стр. 1292, 1938.
- А. Ф. Иоффе. Полупроводники в сильных электрических полях. ЖЭТФ, т. 9, стр. 1428, 1939.
8. В. Г. Комар. Эксплуатационные характеристики селеновых выпрямителей. ЖЭТФ, т. X, стр. 1897, 1940.
9. Г. Жданов, Ю. Шарвин. Отчеты по исследованию кристаллизации селена с помощью рентгеновского анализа. Физико-химический институт им. Карпова, 1942—1943.
10. В. Г. Комар, Н. А. Пенин, Л. И. Сажин. Производство селеновых выпрямителей в Германии. НИКФИ, 1946.
11. A. Ambrey. Selenium Power Rectifier for A. C. Aircraft Systems. El. Eng., Aug. 1945.
12. K. Maier. Trockengleichrichter, 1938. T. Varmack. Selenium Rectifiers and their Design. El. Eng., July 1942.
13. А. З. Левинзон и Г. П. Павлов. Селеновые выпрямители. ЖТФ, т. X, в. 22, стр. 1887, 1940.
14. В. Г. Комар, И. Н. Осолоков, Л. И. Сажин, Ф. Ф. Соколов. Отчеты по разработке селеновых выпрямительных устройств. НИКФИ, 1939—1946.
15. Сообщение фирмы Westinghouse (Англия). Селеновые выпрямители. Брит. прох. техн. № 5, т. XX, 1945.
16. И. Беляков-Бодин, С. Л. Мандельштам. Стабилизация условий возбуждения спектра в столбе дуги. Известия Академии наук СССР, сер. физ., т. V, стр. 229, 1941.
17. С. Б. Юдицкий. Возбуждение синхронных машин от купроксных или селеновых выпрямителей. Вестник электропромышленности, № 10, 1940.
18. В. Г. Комар. Стабилизаторы напряжения и тока с феррорезонансным управлением дросселями насыщения. Электричество, № 11—12, 1944.
19. U. Lamm. Metal plate rectifiers. ASEA Journal, XVI, p. 114, 1939. S. Helbström, U. Kralbe. ASEA Tidning № 11—12, 1944.
20. А. Воронин, Н. Корчагин. Производство селеновых выпрямителей и перспективы их применения на железнодорожном транспорте. Техника железных дорог, № 8, 1944.
21. В. Г. Комар. Расчет селеновых выпрямителей. Электричество, № 9, 1946.



# Высоковольтные кабельные линии в энергетических системах

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН

Московский энергетический институт им. Молотова

В настоящее время передача электрической энергии на большие расстояния осуществляется преимущественно высоковольтными воздушными линиями, а распределение энергии по густонаселенным промышленным районам производится подземными кабельными сетями. Дальнейшее развитие электроэнергетики, несомненно, будет связано с значительным увеличением подземных кабельных сетей на напряжение до 35 кВ. Кроме того, при осуществлении глубокого ввода электроэнергии в крупные населенные пункты, несомненно, будут внедряться высоковольтные кабельные линии, преимущественно на городских участках с целью освобождения городских улиц от высоковольтных воздушных электропередач.

**Развитие высоковольтных кабельных линий.** Современное состояние кабельной техники позволяет изготавливать надежные в эксплуатации кабели на рабочее напряжение до 220 кВ включительно. Первые попытки осуществить подземную кабельную высоковольтную линию относятся еще к 1911 г., однако эксплуатация этой кабельной линии (на 60 кВ) была неудачна и непродолжительна. Удовлетворительно работающая подземная кабельная линия длиной 14 км на напряжение 50 кВ была осуществлена в Барселоне в 1914 г. Во Франции в 1922 г. была выполнена трехфазная линия из трех одножильных кабелей 60 кВ длиной 60 км. Все эти линии были еще не очень надежны в работе. Новым этапом в развитии высоковольтных подземных кабельных линий явился 1927 г., когда вступили в эксплуатацию подземные кабельные линии на напряжение 132 кВ в Чикаго и Нью-Йорке. Линия в Чикаго длиной 10 км была рассчитана на передаваемую мощность 100 000 кВА, а в Нью-Йорке при длине линии 19 км передаваемая мощность была 95 000 кВА. Обе эти линии работали без каких-либо аварий и перебоев, и в 1929 г. они были

*Рассматриваются условия, определяющие возможность использования высоковольтных кабельных линий в энергетических системах, и особенно для целей глубокого ввода линий повышенного напряжения к потребителям, что может обеспечить, наряду с экономией электроэнергии, более высокий уровень культуры электроснабжения. По этой своей целевой установке статья непосредственно связана с ранее опубликованными материалами, освещающими вопросы снижения потерь электроэнергии и повышения напряжений в сетях электросистем (Электричество, № 6 и 7, 1946). Даются основные технико-экономические показатели для принятых конструкций высоковольтных кабелей и намечаются области применения высоковольтного кабеля в электроснабжении. Приводятся характеристики электрической прочности кабельной изоляции и общие условия тепловой неустойчивости кабельных линий. В статье отражены основные положения доклада автора на научной сессии МЭИ 1946 г. Дискуссию по статье см. стр. 74—76.*

дублированы. Таким образом, практически была доказана полная возможность безаварийной эксплуатации современных высоковольтных подземных кабельных линий.

С этого времени начинается быстрый рост кабельных линий в Европе и Америке. В 1936 г. вступила в эксплуатацию первая в мире подземная кабельная линия напряжением 220 кВ, длиной 19 км, проложенная в окрестностях Парижа

(рис. 1). Линия работала бесперебойно. С помощью этой линии осуществлялось соединение пригородных станций с высоковольтной сетью, а в дальнейшем предполагалось убрать под землю все воздушные линии на пригородных участках Парижа.

В ряде случаев подводный высоковольтный кабель позволяет осуществить переход электропередачи через водные участки, когда обычный переход воздушной линией получился бы более дорогим и менее надежным. Примером такого

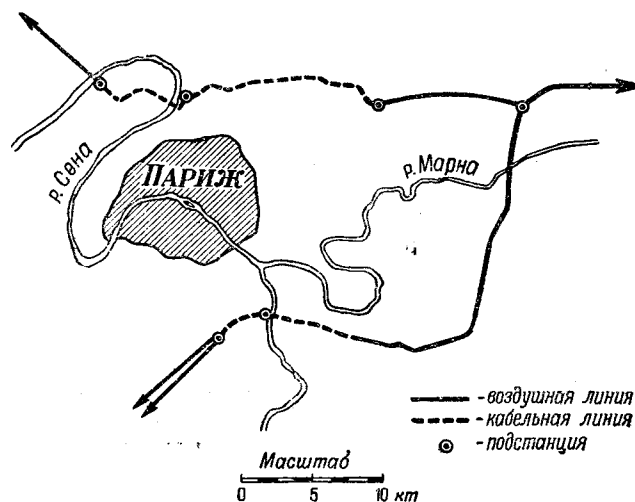


Рис. 1.



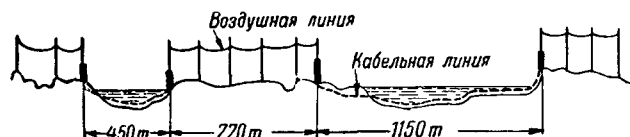


Рис. 2.

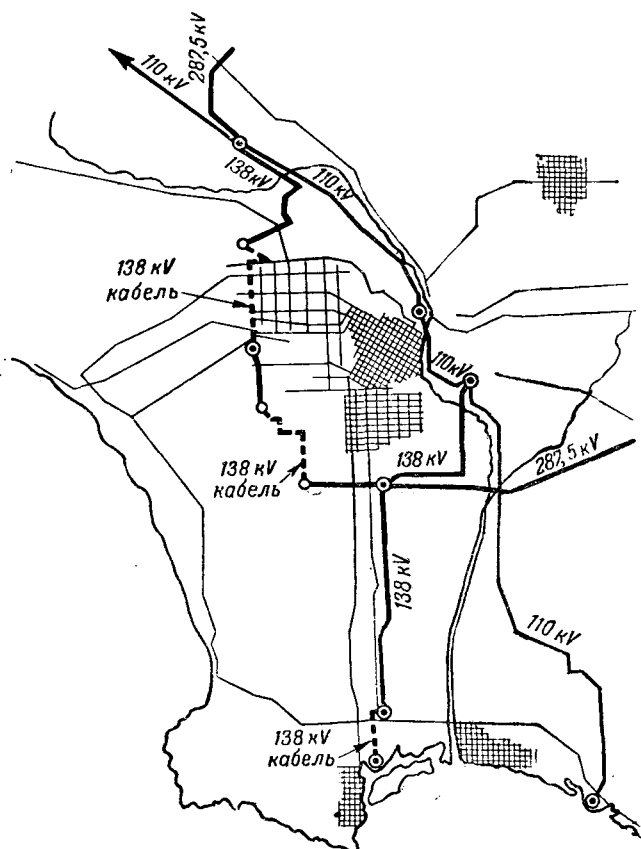


Рис. 3.

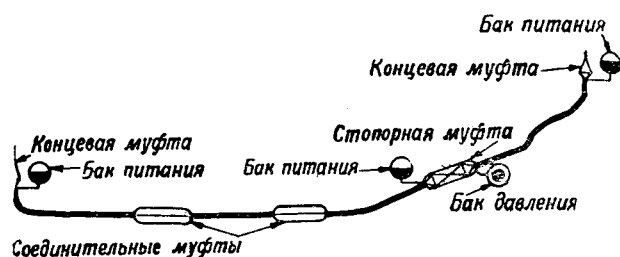


Рис. 4.

использования высоковольтного кабеля является осуществленный в Америке в 1932 г. переход через р. Колумбию севернее Портленда. В месте перехода река разделена островом на два рукава, через которые и сделаны два перехода подводным кабелем 110 кВ, соединенные воздушной линией на деревянных опорах длиной 770 м (рис. 2).

Из высоковольтных кабельных сооружений последнего времени следует указать на прокладку в Канаде в 1941 г. кабеля 120 кВ. Проложено около 40 км кабеля в 200 строительных длинах, соединенных 180 нормальными соединительными муфтами при 30 оконечных и 6 стопорных муфтах.

Интересный пример использования высоковольтного подземного кабеля для прокладки в городе представляет осуществленная в 1943 г. прокладка кабеля 138 кВ в Лос-Анжелосе — двойная подземная линия длиной 8 км и участки длиной 4 и 8,5 км, расположенные в разных местах города (рис. 3).

Из этих примеров следует, что высоковольтные кабельные линии используются в первую очередь для глубокого ввода электроэнергии в города, для прокладки коротких мощных линий через населенные пункты и для перехода через реки и озера.

В ряде случаев, например, на высоконапорных гидроэлектростанциях, когда повысительную подстанцию приходится относить на некоторое расстояние от станции, применение кабеля для соединения генераторов с трансформаторами большей частью дает решение более правильное с технической точки зрения и наиболее экономическое.

**Области применения высоковольтных кабелей.** Если учесть современное состояние кабельной техники и ориентироваться на проверенные в эксплуатации конструкции высоковольтных кабелей, можно сделать краткую сводку и наметить области применения различных конструкций (табл. 1).

**Основное преимущество в эксплуатации.** При сооружении кабельной линии нужно проложить по заданной трассе отдельные строительной дли-

Таблица 1

Тип кабеля и конструкция	Рабочее напряжение, кВ	Область применения
Кабель с вязкой пропиткой. Три свинцованные фазы скручены вместе в трехжильный кабель . . . . .	20—35	Высоковольтная питающая сеть и линии электропередачи
Маслонаполненный одножильный кабель с круглой полый жилой. Избыточное давление масла до 0,8 ат . . .	60—220	Глубокий ввод в населенные пункты, переход через реки. Головные участки высоковольтных линий
Газонаполненный трехжильный кабель в упрочненной свинцовой оболочке. Давление газа от 0,8 до 3 ат . . .	10—35	Прокладка по крутонаклоненной трассе. Распределительные и питающие сети
Газонаполненный одножильный кабель в упрочненной свинцовой оболочке. Давление газа до 14 ат . . . . .	120	Линии электропередачи по крутонаклонной трассе
С газом под давлением трехжильный кабель с вязкой пропиткой, проложенный в стальной трубе. Давление газа до 12 ат . . . . .	60—150	Прокладка по высокогорной трассе. Переход через железнодорожные линии и реки
С маслом под давлением трехжильный кабель без свинцовой оболочки (в трубе с маслом). Давление масла от 6 до 12 ат . . . . .	10—130	Прокладка на электростанциях (от генераторов к трансформаторам) и короткие участки мощных линий электропередачи

ны кабели и соединить их друг с другом посредством соединительных муфт обычного, полустопорного или стопорного типа. На концах линия должна иметь концевые муфты. Для поддержания определенного давления масла или газа кабельная линия должна быть снабжена специально рассчитанными устройствами, обеспечивающими подпитывание линии маслом (баки питания) или поддержание в ней определенного избыточного давления (баки давления). Схема маслonaполненной кабельной линии приведена на рис. 4. Каждая высоковольтная кабельная линия должна быть снабжена контрольной аппаратурой, обеспечивающей контроль давления в кабеле и сигнализирующей о предельном подъеме или падении давления. В кабельных линиях маслonaполненного или газонаполненного типов должно быть предусмотрено устройство для определения утечки масла или газа в линии. Современная высоковольтная кабельная линия с маслом или газом под давлением обладает тем несомненным преимуществом перед воздушной линией, что намечающееся место пробоя кабеля вследствие внешнего ухудшения или из-за постепенного местного ухудшения диэлектрических свойств изоляции кабеля может быть обнаружено соответствующими наблюдениями за утечкой масла или газа в линии. В кабеле с вязкой пропиткой соответствующими профилактическими испытаниями также можно заранее выделить ненадежный участок и заменить его заблаговременно другим. Таким образом, при правильно поставленной эксплуатации кабельных линий всякий ненадежный участок может быть выявлен до пробоя, что исключает возможность аварийного выключения линии. На воздушной линии, в противоположность кабельной, аварийное выключение всегда неожиданно и поэтому часто приводит к длительному расстройству всей системы электроснабжения.

**Пути удешевления высоковольтных кабельных линий.** Почему же при всех своих положительных качествах подземные высоковольтные кабельные линии до сих пор не заняли заметного положения в электроэнерготехнике?

За границей высоковольтные подземные и подводные кабельные линии разных типов получили некоторое распространение. Так, например, в зарубежных странах по настоящее время проложено несколько тысяч км одиночной жилы маслonaполненного кабеля на напряжение до 220 kV. Все же это количество нельзя считать достаточным.

Одной из основных причин, обуславливающих недостаточное использование высоковольтного кабеля для сооружения линий электропередач, являются большие первоначальные затраты и большой срок сооружения кабельной линии, по сравнению с воздушной линией, а также потребность в более квалифицированном персонале для прокладки кабеля и монтажа муфт. Первоначальные затраты на сооружение линии состояются из стоимости кабеля и арматуры и работ по прокладке и монтажу кабеля, включая и земляные работы.

Примерное распределение полной стоимости между этими элементами:

стоимость кабеля . . . . .	45%
стоимость арматуры . . . . .	15%
стоимость земляных работ . . . . .	30%
стоимость прокладки и монтажа . . . . .	10%
Всего . . . . .	100%

Отсюда видны и пути удешевления стоимости кабельной линии. В первую очередь должна быть снижена стоимость земляных работ и прокладки за счет механизации основных операций по рытью траншей и прокладки кабеля. Следует обратить также внимание на удешевление стоимости кабельной арматуры и монтажа ее на линии. Наконец, развитие производства высоковольтного кабеля, несомненно, приведет к снижению стоимости кабелям и уменьшению расхода материалов изолирующего слоя и защитных покрытий. Однако, такое снижение стоимости кабеля допустимо только при условии обеспечения полной надежности эксплуатации кабеля, т. е. за счет улучшения качества изолирующих материалов, усовершенствования конструкций и технологического процесса изготовления кабеля и арматуры на основе углубленного изучения процессов, протекающих в изолирующем слое кабеля и в особенности процесса пробоя твердых и жидких диэлектриков.

Из всех типов высоковольтного кабеля наиболее дешев кабель с вязкой пропиткой, однако применение его в настоящее время ограничивается напряжением 35 kV. Для более высоких напряжений используется маслonaполненный кабель и в последнее время кабель под давлением газа и газонаполненный. В настоящее время за границей получает большое распространение газонаполненный кабель низкого давления (до 1 ат) для напряжения от 10 до 35 kV. Имеются основания полагать, что этот тип кабеля при повышенном давлении газа может быть с успехом использован для напряжения до 70 и даже до 100 kV. Кабель этого типа дешевле маслonaполненного и эксплуатация его проще. Опыт использования кабеля этого типа в Америке показал, что газонаполненный кабель соединяет простоту монтажа и эксплуатации кабеля с вязкой пропиткой с высокой электрической прочностью изоляции маслonaполненного кабеля.

Особое внимание следует обратить на кабель, прокладываемый в стальной трубе, заполненной азотом или маслом под давлением до 12 ат. В этом случае нет свинцовой оболочки и, стало быть, достигается значительное снижение потерь в кабеле, экономия свинца и полная надежность в эксплуатации за счет стальной трубы, предохраняющей кабель от внешних повреждений, а также за счет повышения давления в кабеле.

Зависимость электрической прочности (в kV/mm) пропитанной маслоканифольным составом бумаги от давления (в ат) газа или масла приведена на рис. 5. Эта зависимость снята на

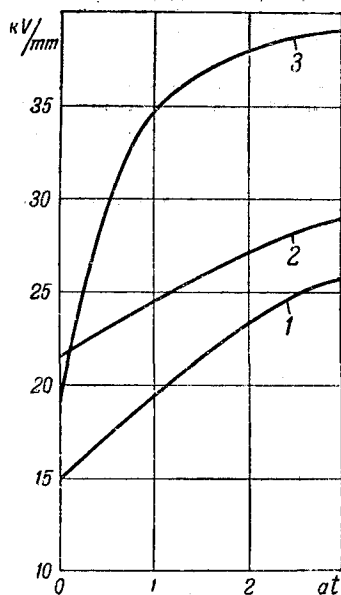


Рис. 5.

моделях кабеля с вязкой пропиткой, которые были испытаны по методике, разработанной в лаборатории кабельной техники МЭИ. В стальную трубу с фарфоровым изолятором на конце помещалась модель кабеля с толщиной изоляции 1 мм и подавались газ (азот) или же масло под давлением до 3 ат; напряжение (при частоте 50 Hz) постепенно повышалось до пробоя. Полученная зависимость пробивной напряженности от давления показана кривой 1. Кривая 2 относится к таким же моделям, но пропитанным маслосиликоновым составом, который предварительно насыщался азотом под давлением 1,5—2 ат по разработанному нами режиму. Эффективность такого метода введения в изоляцию кабеля газа под давлением очевидна, ибо по сравнению с обычным методом пропитки в этом случае полу-

чается увеличение электрической прочности при давлении около 1 ат (примерно на 30%). Применение минерального масла под давлением (кривая 3) дает увеличение электрической прочности при избыточном давлении 1 ат почти в два раза, а при 2 ат — примерно на 50% по сравнению с кабелем с обычной вязкой пропиткой (кривая 1). Отсюда следует, что применение минерального масла под давлением всего в 1—2 ат значительно повышает электрическую прочность и надежность работы кабеля, проложенного в трубе, и позволяет обойтись без автоматически работающих насосов маслостатической системы.

Схематические сечения, максимальные и средние градиенты в изоляции и расход (в  $t$  на км длины) основных материалов для различных типов высоковольтных кабелей даны на рис. 6. Характеристики, относящиеся к стоимости кабелей и передаваемой по ним мощности для принятых у нас типов высоковольтного кабеля, а именно, ОСБ 20 и 35 кВ и маслонаполненного на 110 кВ с сечением медной жилы 270  $mm^2$ , приведены в табл. 2.

**Вопросы тепловых потерь и тепловой устойчивости.** Из табл. 2 следует, что стоимость кабеля на 1 кВА передаваемой мощности падает с увеличением рабочего напряжения кабеля, в то время как передаваемая мощность в кВА на 1  $mm^2$  сечения жилы кабеля растет с повышением напряжения. Из рис. 7 (по данным табл. 2) видно, что при увеличении сечения жилы и при повышении напряжения увеличивается передаваемая мощность (в кВА — сплошные кривые) и поэтому снижается удельная стоимость кабеля на единицу передаваемой мощности (в руб./кВА — пунктирные линии). Однако, повышение напряжения вызывает ухудшение отвода тепла от жил кабеля и увеличение тепловых потерь за счет потерь в диэлектрике. Это сказывается прежде всего на уменьшении использования сечения токопроводящих

Кабель с маслом под давлением  
(в трубе) 110 кВ  
Сечение  $3 \times 250 mm^2$   
Толщина изоляции 10 мм



Кабель под давлением газа  
(в трубе) 110 кВ  
Сечение  $3 \times 270 mm^2$   
Толщина изоляции 13,5 мм



Газонаполненный кабель 110 кВ  
Сечение 270  $mm^2$   
Толщина изоляции 14 мм



Маслонаполненный кабель 110 кВ  
Сечение 270  $mm^2$   
Толщина изоляции 12 мм

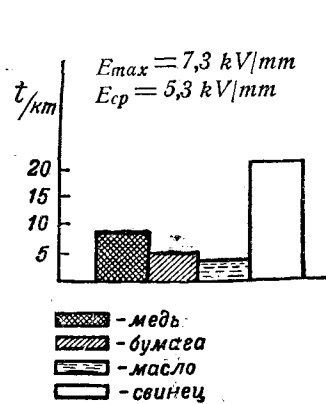
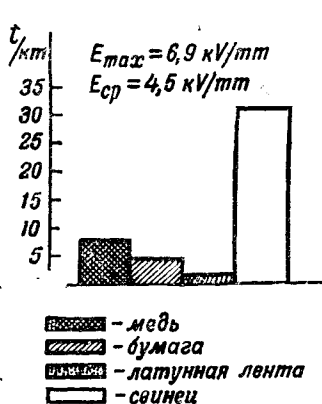
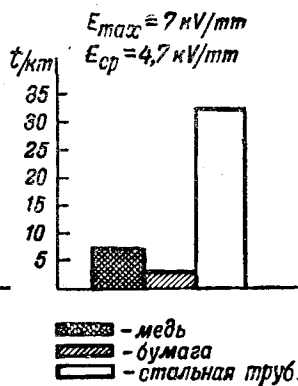
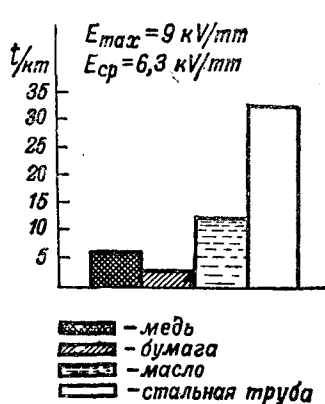


Рис. 6.

Таблица 2

Сечение, мм <sup>2</sup>	Тип кабеля	Напряжение, кВ	Передаваемая мощность, кВА	Стоимость кабеля в рублях:		Мощность на единицу у сечения, кВА/мм <sup>2</sup>
				на 1 км линии	на 1 кВА мощ- ности	
70	ОСБ трехжильный	20	7 000	25 050	3,6	33
		35	12 000	30 100	2,5	57
120	ОСБ трехжильный	20	9 500	31 750	3,34	26,4
		35	17 000	39 400	2,3	47
150	ОСБ трехжильный	20	11 000	35 950	3,27	24,5
		35	19 000	44 300	2,3	43,3
185	ОСБ трехжильный	20	12 300	40 250	3,28	22,2
		35	22 400	50 000	2,3	40
270	Маслонаполненный одножильный	110	115 000	128 000	1,1	142
				170 000*	1,48	

\* С учетом удорожания из-за повышенной стоимости арматуры маслонаполненного кабеля.

жил, т. е. на замедлении роста отношения мощности к сечению в кВА/мм<sup>2</sup>. Если, не считаясь с ухудшением использования меди в кабеле, все же идти на повышение напряжения, то рост потерь в изолирующем слое ограничит использование кабеля пределом его тепловой устойчивости. Тепло в кабеле генерируется, главным образом, за счет джоулевого тепла  $P_m$ , выделяющегося в жилах кабеля сопротивлением  $R$  в зависимости от нагрузки их током  $I$ . Кроме того, в материале изолирующего слоя кабеля выделяется тепло за счет диэлектрических потерь  $P_d$ , зависящих от напряжения  $U$ , частоты переменного тока  $f$ , емкости кабеля  $C$  и угла диэлектрических потерь изоляции  $\delta$ . Полное выделение тепла на единицу длины кабеля можно выразить так:

$$P = P_m + P_d = I^2 R + 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

Еще одна составляющая тепловых потерь — потери в свинцовых оболочках одножильных кабелей, проложенных в трехфазных сетях, может быть учтена повышением температуры свинцовой оболочки кабеля над окружающей средой, что эквивалентно повышению теплового сопротивления окружающей кабель среды. Отвод тепла от свинцовой оболочки будет пропорционален нагреву оболочки и поэтому соотношение между количествами (в Вт на 1 см длины) тепла,

генерируемого в кабеле и отводимого от него в окружающую среду, можно весьма наглядно изобразить графически (рис. 8).

Кривая выделения тепла в изолирующем слое кабеля за счет диэлектрических потерь ( $P_d$ ) выражает зависимость между выделяемым теплом в Вт/см и температурой оболочки кабеля в °C. Если потери в свинцовой оболочке, соответствующие тепловыделению в жиле  $P_a$  обозначить через  $P_{об}$ , то для учета этих потерь всю кривую  $P_d$  надо поднять на величину потерь  $P_{об}$ , чтобы получить кривую генерируемого тепла с учетом потерь в свинцовой оболочке кабеля  $P_d$ . При температуре окружающей среды, в нашем случае принятой 15°C, теплоотвод от кабеля выразится прямой линией  $a$  или  $b$  — в зависимости от величины удельного теплового сопротивления почвы (для подземного кабеля). Если теплоотвод будет соответствовать прямой  $a$ , то при нагреве оболочки кабеля до 66°C тепловое равновесие нарушится, и кабель будет

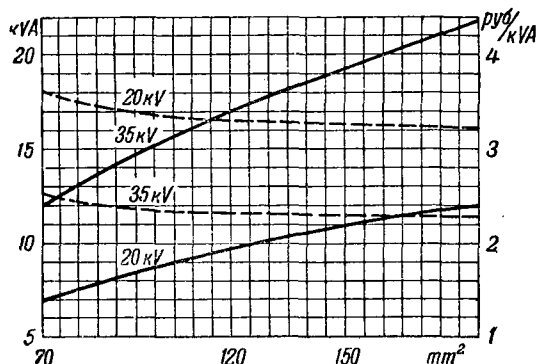


Рис. 7.

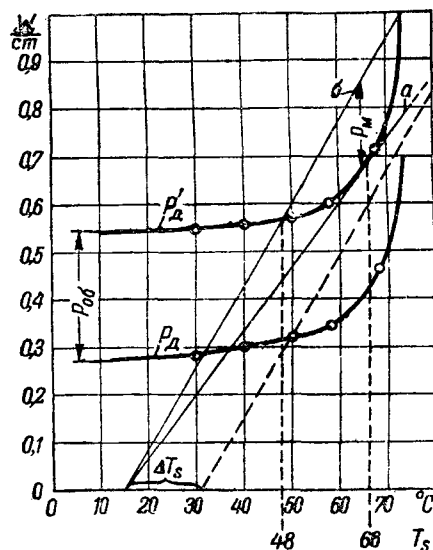


Рис. 8.

пробит из-за сильного перегрева изолирующего слоя (тепловой пробой). Если же теплоотвод возрастет и будет выражаться прямой  $b$ , температура свинцовой оболочки кабеля в условиях холостого режима будет соответствовать точке пересечения  $P_d$  с прямой  $b$ , т. е. в нашем случае  $47^\circ\text{C}$ . Следовательно, температура оболочки возрастет на  $16^\circ\text{C}$ , что эквивалентно повышению температуры окружающей среды на  $\Delta T_s$ , равной в нашем случае  $16^\circ\text{C}$ . В этом случае полезная нагрузка кабеля изобразится вертикальным отрезком  $P_m$  между кривой  $P_d$  и прямой  $b$ .

С повышением температуры свинцовой оболочки, а стало быть и жилы, полезная нагрузка кабеля сначала увеличивается, достигает максимума, и затем снижается (рис. 9; по оси абсцисс отложена температура оболочки в  $^\circ\text{C}$ , по оси ординат — ток в А). Очевидно, что для достижения устойчивой работы кабеля надо держать нагрузку несколько меньше максимально возможной при данном тепловом сопротивлении окружающей кабель среды.

При современном состоянии кабельной техники и контроля кабельных линий в эксплуатации единственной реальной угрозой для высоковольтного кабеля является именно тепловая неустойчивость, которая ограничивает величину передаваемой по кабельной линии мощности и в некоторых случаях может повести к тепловому пробое кабеля.

Улучшение качества кабельной изоляции с целью уменьшения роста диэлектрических потерь при повышении температуры является одной из основных задач кабельного производства, а повышение теплоотвода от кабеля в окружающую среду и снижение потерь в свинцовых оболочках за счет улучшения прокладки и монтажа кабеля даст возможность значительно улучшить условия эксплуатации кабельной линии.

На рис. 10 [Л. 1] дана зависимость передаваемой по кабелю мощности от сечения жилы кабеля в  $\text{mm}^2$  при разных толщинах изолирующего слоя (в  $\text{mm}$ ) и при разных значениях влажности (10; 6 и 2,5%) окружающей кабель почвы, т. е. при разных значениях внешнего теплового сопро-

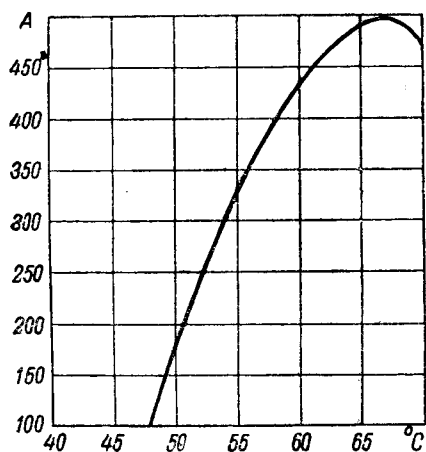


Рис. 9.

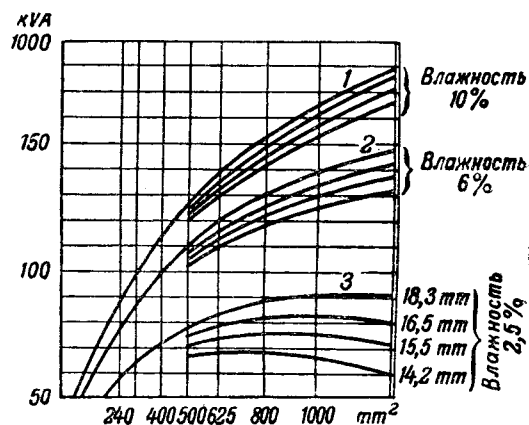


Рис. 10.

тивления. Передаваемая мощность растет с увеличением сечения жилы кабеля, однако при повышении внешнего теплового сопротивления передаваемая мощность возрастает с увеличением сечения все менее и менее и, наконец, начинает даже уменьшаться. Это обстоятельство особенно заметно при малой влажности почвы (2,5%) и малой толщине (14,2  $\text{mm}$ ) изолирующего слоя кабеля. В этом случае появляется «предельная» передаваемая мощность, характеризующая кабельную линию безотносительно к сечению жилы кабеля. Рассмотрим зависимость передаваемой по кабельной линии мощности от диэлектрических потерь и внешнего теплового сопротивления.

При установившемся тепловом режиме тепло, генерируемое в кабеле, должно быть равно теплу, отводимому от кабеля, т. е. сумма потерь в жиле кабеля и в диэлектрике изолирующего слоя должна быть равна нагреву оболочки кабеля над окружающей средой, деленному на тепловое сопротивление окружающей среды. Ток нагрузки выделяет в жиле кабеля тепловые потери, величина которых (в  $\text{W}$  на 1  $\text{cm}$  длины) может быть выражена общеизвестным уравнением:

$$P_m = \frac{I^2}{q} \rho_{20} (1 + \alpha \tau_m), \quad (2)$$

где  $q$  — сечение жилы кабеля в  $\text{cm}^2$ ;

$\rho_{20}$  — удельное сопротивление токопроводящей жилы при  $20^\circ\text{C}$  в  $\Omega \text{ cm}$ ;

$\tau_m$  — максимальный нагрев жилы кабеля в  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления (для меди  $\alpha \sim 0,004$ ).

Выделяющееся в изолирующем слое кабеля тепло диэлектрических потерь  $P_d$  приближенно можно выразить

$$P_d = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = 2\pi \gamma_d \frac{U^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (3)$$

где через  $r_1$  и  $r_2$  обозначены внутренний и внешний радиусы изоляции, а через  $\gamma_d$  эквивалентная проводимость диэлектрика

$$\gamma_d = \frac{f \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12}}{1,8} \approx \gamma_0 e^{\alpha \tau}. \quad (4)$$

Здесь через  $\tau$  обозначен средний нагрев изолирующего слоя кабеля, равный полусумме нагревов жилы  $\tau_m$  и оболочки кабеля  $\tau_s$ :

$$\tau = \frac{\tau_m + \tau_s}{2}, \quad (5)$$

а через  $a$  — температурный коэффициент.

Сумма тепловых потерь в кабеле должна быть равна теплу, отдаваемому в окружающую среду, т. е.

$$I^2 \rho_{20} \frac{(1 + a\tau_m)}{q} + 2\pi\gamma_0 U^2 \frac{e^{\frac{\tau}{2}}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\tau_s}{S_0}, \quad (6)$$

где  $S_0$  — тепловое сопротивление окружающей кабель среды. Обозначив

$$A = \rho_{20} \cdot (1 + a\tau_m),$$

получим следующее выражение для тока нагрузки кабельной линии:

$$I = \sqrt{\frac{q}{A}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\tau_s}{S_0} - 2\pi\gamma_0 U^2 e^{\frac{a\tau_m}{2}}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}}. \quad (7)$$

Положив  $r_2 = r_1 + \Delta$ , где  $\Delta$  — толщина изолирующего слоя кабеля, и приняв во внимание (5), получим:

$$I = \sqrt{\frac{q}{A} \cdot \left[ \frac{\tau_s}{S_0} - B \frac{e^{\frac{a\tau_s}{2}}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]}, \quad (8)$$

где

$$B = 2\pi\gamma_0 U^2 e^{\frac{a\tau_m}{2}}. \quad (9)$$

Для маслонаполненного кабеля можно принять  $\tau_m = 50^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 3,5$  и  $a = 0,06$ ; задаваясь  $f = 50 \text{ Hz}$  и  $U = \frac{110\,000}{\sqrt{3}} \text{ V}$ , получим

$$I = 68,5 \sqrt{q} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\tau_s}{S_0} - 1,12 \cdot \text{tg } \delta \frac{e^{0,06\tau_s}}{\ln \frac{r_1 + \Delta}{r_1}}}{}}. \quad (10)$$

Из общего уравнения (10) ясно видно, как влияют сечение жилы, толщина изолирующего слоя и тепловое сопротивление окружающей кабель среды на ток нагрузки кабеля; из этого уравнения могут быть получены все кривые, приведенные на рис. 10.

**Заключение.** В заключение надо обратить внимание Министерства электропромышленности и Министерства электростанций на необходимость внедрения высоковольтного кабеля и, в первую очередь кабеля 35 kV, как вполне освоенного у нас в производстве и проверенного в эксплуатации в течение 20 лет (Ленинградское кабельное кольцо), а затем и маслонаполненного кабеля 110 kV, освоенного также в СССР еще в 1931 г. Следовало бы поставить вопрос о введении в СССР напряжения 60 kV, ибо подземный кабель на это напряжение может быть выполнен по системе газонаполненного кабеля низкого давления, т. е. дешевым и удобным в эксплуатации. Кабельная промышленность должна уделить особое внимание производству высоковольтного кабеля, надежного в эксплуатации и допускающего механизированную прокладку. Особенно необходимо наладить выпуск усовершенствованной арматуры и разработать улучшенные методы монтажа высоковольтных кабельных линий.

Для обеспечения должного развития производства высоковольтного кабеля и арматуры к нему необходимо обеспечить систематическое проведение научно-исследовательской работы по следующим основным направлениям: а) увеличение электрической прочности кабельной изоляции; б) разработка надежных защитных и антикоррозийных покрытий; в) усовершенствование арматуры и упрощение монтажа муфт; г) механизация прокладки кабеля; д) разработка усовершенствованных методов контроля состояния изоляции кабельных линий.

#### Литература

1. C. G. Mansfield. New 138 kV Cable Lines in Los Angeles. El. Eng., 1241 (Tr), т. 63, 1944.



# Геометрическая теория электрических цепей

Доктор техн. наук, проф. Э. А. МЕЕРОВИЧ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

С наибольшей последовательностью геометрические методы используются в работах Г. Крона [Л. 1, 2, 3]. Теория электрических цепей построена им как теория преобразования координат. Центральное место в ней занимает вводимая Кроном матрица соединения  $S$ . Метод, с помощью которого Крон вводит эту матрицу, не является безупречным и нуждается в более строгом обосновании. Строгое обоснование преобразования, предложенного Кроном, дал недавно Инграм<sup>1</sup> [Л. 4] с помощью некоторых теорем топологического характера. В начале настоящей работы мы вводим читателя в круг относящихся к рассматриваемому вопросу идей. Терминология применена, близкая электротехнике, при одновременном сохранении для большей связи обозначений, принятых в упомянутых работах. Дальше показано, что возможно строить теорию, идя путем, несколько отличным от выбранного Кроном. В этом случае отпадает необходимость в дополнительном обосновании, в котором нуждается метод Крона. Вместе с тем получают преобразования более общего вида, не охватываемые матрицей соединения  $S$ . Мы будем вводить наименьшее число геометрических представлений и только те из них, которые используются в теории цепей. При этом учитывается, что использование более подробных математических определений заставило бы нас расширить изложение, вводя дополнительный материал, не являющийся с точки зрения электротехнических приложений необходимым.

**1. Определения, относящиеся к геометрии электрической цепи.** Геометрические свойства цепи полностью определяются *схемой* соединения элементов<sup>2</sup>. На рис. 1 показана схема соединений некоторой электрической цепи. Геомет-

Развитие общей теории электрических цепей за последние годы тесно связано с введением новых для нее геометрических представлений. Привлечение геометрии оказало плодотворное влияние и привело к весьма четкому построению теории электрических цепей в ее современном виде. Рассматриваются геометрические свойства электрических цепей. Показано, что применяемое Г. Кроном преобразование с помощью матрицы соединения  $S$  соответствует переходу от токов ветвей к контурным токам той же схемы. Дан общий способ перехода от уравнений одной какой-либо цепи к уравнениям другой цепи, составленной из тех же сопротивлений. Статья является приложением к выходящему в ближайшее время в свет под редакцией автора русскому переводу книги Г. Крона.

рическими элементами схемы являются ветви  $AB$ ,  $AD$ ,  $DC$  и т. д., соединяющие узловые точки  $A$ ,  $B$ ,  $D$  и т. д., которые представляют собой границы ветвей. Узловые точки обозначаются в дальнейшем через  $V_m$ , где  $m$  — индекс узловой точки. Ветви, сходящиеся в одной узловой точке, образуют *узел ветвей*. Так, ветви  $AD$ ,  $BD$ ,  $CD$

образуют узел ветвей. Ветвям можно приписать определенное, показанное на рисунке (рис. 1) стрелкой, положительное направление. Будем также обозначать ветви через  $\pm B_n$ , где  $n$  — индекс ветви, а знак показывает, в каком направлении берется ветвь — в положительном или отрицательном (например,  $AD = -DA$ ). Схема называется *связанной*, если из любой ветви можно попасть в любую другую ветвь путем непрерывного перехода через узловые точки, соединяющие некоторую последовательность ветвей.

Схема называется *разделимой*, если в ней существуют узловые точки (такие, например, как точка  $B$  на рис. 1), осуществляющие *единственную* связь между какими-либо двумя ветвями схемы, т. е. если переход от первой ко второй ветви нельзя произвести, минуя эту точку. Будем рассматривать только *связанные* и *неразделимые* схемы. Если в схеме существуют узловые точки, в которых сходятся только две ветви, то эти точки назовем *устраняемыми*. Мы будем рассматривать схемы без *устраняемых* узловых точек. Совокупность ветвей и узловых точек, образующих непрерывный путь в схеме и притом такой, что при обходе этого пути каждая ветвь и каждая узловая точка встречаются один раз, называется *контуром*. Если при обходе контура мы вновь попадаем в исходную точку, то контур называется замкнутым. Так, ветви  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DA$  образуют замкнутый контур  $ABCD$ , который можем обозначить как  $C_\alpha$ , где  $\alpha$  — индекс, относящийся к данному контуру. Алгебраически это записывается так:

$$AB + BC + CD + DA = C_\alpha. \quad (1,1)$$

<sup>1</sup> Как будет видно из дальнейшего, матрица соединения Крона  $S$  осуществляет преобразование к главным контурам. См. также у В. Кауэр'а [Л. 7].

<sup>2</sup> Некоторые геометрические свойства электрических схем [см., например, Л. 5, 6].

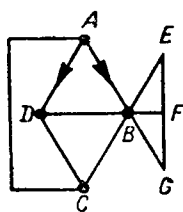


Рис. 1.

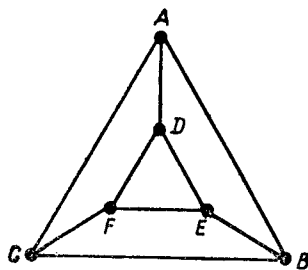


Рис. 2.

Если это не будет вызывать недоразумений, будем называть замкнутый контур  $C_a$  просто контур  $C_a$ . Так же как и ветвям, контуру можно приписать направление:

$$BA + CB + DC + AD = -C_a. \quad (1,2)$$

Порядок расположения слагаемых в написанной сумме значения не имеет.

Сумма нескольких контуров может образовывать один или несколько других контуров. Так, на рис. 2

$$\left. \begin{aligned} AB + BE + ED + DA &= C_1, \\ BC + CF + FE + EB &= C_2, \\ CA + AD + DF + FC &= C_3, \end{aligned} \right\} C_1 + C_2 + C_3 = C_4 + C_5, \quad (1,3)$$

где

$$C_4 = AB + BC + CA$$

и

$$C_5 = ED + DF + FE$$

или

$$C_1 + C_5 = C_6,$$

где

$$C_6 = AB + BE + EF + FD + DA. \quad (1,4)$$

Контур называется линейно зависимым, если между ними можно установить линейную связь вида:

$$a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3 + \dots + a_\omega C_\omega = 0, \quad (1,5)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_\omega$  — коэффициенты, не все равные нулю. В противном случае контуры линейно независимы. Известно следующее основное соотношение, вытекающее из геометрических свойств схемы:

$$N = Q - P, \quad (1,6)$$

где  $N$  — наибольшее число линейно независимых контуров в схеме,  $Q$  — число ветвей и  $P+1$  — число узловых точек.

Можно показать, что в схеме с  $N$  независимыми контурами необходимо удалить не менее чем  $N$  ветвей для того, чтобы в ней не осталось ни одного замкнутого контура. Вместе с тем, всегда можно так выбрать  $N$  ветвей, чтобы после их удаления все контуры были разомкнуты.

Удаляемые ветви можно выбрать различным образом. Так, для схемы рис. 2 число линейно независимых замкнутых контуров  $N=4$ . Для того, чтобы в этой схеме не осталось замкнутых контуров, в ней можно, например, удалить ветви  $AB, DE, EF$  и  $CF$ . В этом случае схема (рис. 2) принимает вид рис. 3,а. Если удалить

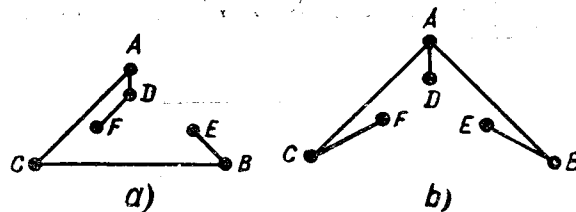


Рис. 3.

ветви  $DE, EF, FD$  и  $BC$ , то схема примет вид рис. 3,б, и т. д.

В оставшейся схеме, называемой *деревом*, сохранились все узловые точки исходной схемы, а число ветвей  $Q-N=P$ . Каждая из удаленных ветвей, если ее одну вернуть на старое место, замыкает некоторый контур. Так как в каждой из определенных таким образом  $N$ -замкнутых контуров входит по крайней мере одна ветвь, не входящая в другие контуры, то все они линейно независимы. Таким образом, деревом схемы является связанная схема, в которой сохранились все узловые точки исходной схемы, но не осталось ни одного контура.

Каждому дереву схемы соответствует  $N$ -замыкающих ветвей. Каждой замыкающей ветви мы привели в соответствие один контур. Эти контуры вместе образуют совокупность линейно независимых контуров. Будем называть эти замыкающие ветви *главными* ветвями схемы, относящимися к данному дереву.  $N$  контуров, образуемых так, как было указано выше, будем называть *главными контурами*, относящимися к данному дереву. Для данного дерева каждая главная ветвь входит только в один из главных контуров.

Следует сразу же отметить, что не всякая совокупность независимых контуров в схеме представляет собой совокупность главных контуров. Так, контуры  $ABEDA, EBCFE, FCADF$  и  $DEFD$  представляют собой совокупность линейно независимых контуров схемы рис. 2. Однако, эта совокупность не образована главными контурами, относящимися к какому-либо дереву. Так, в контуре  $DEFD$  нет ни одной ветви, которая не относилась бы также к другому контуру той же совокупности. Однако, можно показать, и это является существенным, что любая совокупность  $N$  линейно независимых контуров в схеме может быть получена как линейная комбинация  $N$  главных контуров.

Геометрическая структура схемы может быть очень удобно описана с помощью таблицы инцидентности  $\Gamma$ , которую составляем так, чтобы ее столбцы соответствовали выбранным  $N$  независимым контурам, а строки — ветвям схемы. На пересечении столбца и строки ставится  $\pm 1$  или 0 в зависимости от того, входит или не входит данная ветвь в данный контур. Положительный знак ставится, если направление ветви совпадает с направлением контура. В противном случае ставится отрицательный знак.

Для схемы рис. 4, а при выборе в качестве независимых контуров  $N$  главных контуров, от-



носящихся к дереву рис. 4, *b*, матрица инциденции имеет вид:

$$\Gamma = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ 0 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1,7)$$

Контурсы перенумерованы так, что индексы соответствуют и индексам их главных ветвей, направление же контуров выбрано в соответствии с направлением этих ветвей. Нумерация ветвей выбрана такая, что вначале расположены все главные ветви, относящиеся к дереву рис. 4, *b*. Линейная комбинация столбцов такой матрицы может привести, как было уже указано выше, к получению любой другой системы из  $N$  независимых контуров. Иначе говоря, в зависимости от выбора базисных независимых контуров  $C_\alpha$  можно получить различный вид матрицы  $\Gamma$ , но все эти преобразованные матрицы получаются одна из другой заменой столбцов их линейной комбинацией.

Другая таблица инциденции  $\Pi$  показывает инцидентность узловых точек и ветвей.

Таблица  $\Pi$  составляется так, чтобы ее столбцы соответствовали ветвям схемы, а строки — узловым точкам. На пересечении столбца и строки ставится  $\pm 1$  или 0, в зависимости от того, находится данная ветвь в совокупности, образующей соответствующий узел, или нет. Положительный знак выбирается, если ветвь направлена от данной узловой точки, отрицательный знак выбирается, если ветвь направлена к узловой точке.

Матрица  $\Pi$  для каждой схемы после нумерации узловых точек и ветвей записывается совершенно однозначно. Так, для схемы рис. 4 матрица  $\Pi$  имеет вид:

$$\Pi = \begin{matrix} & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 \\ \begin{matrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & -1 & +1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1,8)$$

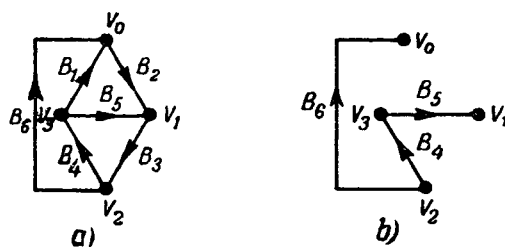


Рис. 4.

Легко заметить, что матрица  $\Pi$  полностью определяет схему соединения цепи и может рассматриваться как ее алгебраическое отображение.

**2. Физические величины, связанные с электрической цепью, и их геометрическое представление.** Электромагнитные процессы в цепи определяются соотношениями между рядом поддающихся измерению физических величин. Величины как бы накладываются на схему соединения цепи.

Эти физические величины удобно рассматривать как *векторы* в некотором *векториальном* пространстве. Векториальное пространство с некоторой заданной в нем системой координатных осей отличается от привычного нам пространства тем, что в нем не определено понятие длины вектора. В таком пространстве не имеет смысла сравнение длин отдельных компонент вектора между собой. Так, длина вектора

$$A = a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3 + \dots + a_\mu t_\mu \quad (2,1)$$

(где  $t_k$  — единичные векторы в направлении каждой из осей;  $a, b, c$  — коэффициенты) не может быть определена, если не имеет смысла сравнение длины единичных векторов между собой с помощью общего эталона длины. Понятие длины вектора в данной работе не является необходимым и мы его не вводим. Несомненно, каждый вывод тем более прозрачен, чем меньше исходных понятий положено в его основу<sup>3</sup>.

*Число измерений* векториального пространства — *наибольшее количество линейно-независимых векторов*, которое может быть в нем задано. Так, если пространство имеет  $P$  измерений, то мы можем выбрать в нем  $P$  линейно независимых векторов  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_P$ , которые и будут служить единицами измерений вдоль каждой из координатных осей. Любой другой вектор  $A$  в этом пространстве является по определению линейно зависимым, т. е. может быть выражен с помощью формулы вида (2,1) как линейная комбинация векторов  $t_k$ . Таким образом, эти последние представляют собой *базисную систему* единичных векторов для определения всех векторов в указанном пространстве  $P$  измерений.

Выбор базисной системы единичных векторов может быть произведен различным образом.

<sup>3</sup> При дальнейшем развитии теории оказывается полезным введение метрики. Введение ее производится, как и в задачах динамики, в связи с представлением об инвариантности энергии при преобразованиях.

Должны быть определены правила преобразования физических величин при переходе от одной системы координат к другой, с другими единичными векторами, и при том такие, чтобы уравнения, связывающие эти величины, при преобразованиях не нарушались. Основной задачей преобразований является переход к таким системам координат, при которых уравнения, связывающие между собой физические величины, приобретают удобный вид для расчетов.

Обозначим число узловых точек в схеме соединений через  $P+1$  и перенумеруем все эти точки в некоторой последовательности  $V_0, V_1, V_2, \dots, V_P$ . Число ветвей примем равным  $Q$  и тоже перенумеруем их в некотором порядке  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_Q$ .

Будем рассматривать ветви схемы как координатные оси некоторого пространства, в котором определяются следующие величины, характеризующие электрический процесс:  $U$  — напряжение на зажимах ветвей;  $E$  — э. д. с., действующие в ветвях;  $I$  — токи ветвей. Компоненты этих векторов:  $U_n$  — разность напряжения между началом и концом  $n$ -й ветви,  $E_n$  и  $I_n$  — э. д. с. и ток в  $n$ -й ветви.

Кроме этих величин, в дальнейшем будут представлять интерес напряжения узловых точек. И эти величины можно также рассматривать как компоненты некоторого вектора. Таким образом,  $u_m$  — напряжение  $m$ -й узловой точки представляет собой компоненту вектора  $u$ . Так как абсолютное значение напряжения для точки определяется с точностью до произвольной постоянной, то в дальнейшем будем считать все напряжения относительно узловой точки  $V_0$ , в которой примем напряжение равным нулю.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline U_1 & U_2 & U_3 & U_4 & U_5 & U_6 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{c} C \\ B \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline +1 & -1 & 1 \\ \hline 0 & -1 & 1 \\ \hline -1 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline U_1+U_4-U_6=0 & U_2-U_4-U_5+U_6=0 & U_3+U_4+U_5=0 \\ \hline \end{array} \quad (2,4)
 \end{array}$$
  

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline u_1 & u_2 & u_3 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{c} B \\ V \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & -1 & 1 & 0 & -1 & \\ \hline & & -1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & & 0 & -1 & 1 & \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline +u_3 & -u_1 & -u_2+u_1 & -u_3+u_2 & -u_1+u_3 & +u_2 \\ \hline \end{array} = U. \quad (2,5)
 \end{array}$$

Компоненты введенных выше векторов не являются независимыми. На них накладываются связи, определяемые схемой соединения. Если компоненты векторов расположить в виде столбцовых или строчечных матриц и пользоваться правилами матричной алгебры, как мы это будем в дальнейшем делать, то связи, определяемые геометрией цепи, записываются в следующем виде:

$$U\Gamma=0, \quad (2,2)$$

$$\Pi I=0, \quad (2,3)$$

где  $\Gamma$  и  $\Pi$  — матрицы инцидентии, определенные в разделе 1.

Матричное уравнение (2,2) соответствует системе уравнений, связывающих между собой напряжения на зажимах ветвей и указывающих, что сумма этих напряжений, взятая для ветвей, образующих замкнутые контуры, равна нулю. Число этих уравнений равно  $N$  в соответствии с числом линейно независимых контуров. Поэтому число независимых компонент вектора  $U$  равняется  $Q-N=P$  и он определяется как вектор в пространстве  $P$  измерений. Это же обстоятельство может быть установлено и другим путем, если вспомнить, что напряжения на ветвях полностью определяются через  $P$  напряжений узловых точек. В матричной форме эта связь может быть записана так:

$$u\Pi'=U, \quad (2,2a)$$

где  $\Pi'$  матрица  $\Pi$  без строчки, относящейся к  $V_0$ . Для схемы рис. 4, для которой матрица  $\Gamma$  дается выражением (1,7), а матрица  $\Pi$  выражением (1,8), соотношение (2,2) при подробной записи получит следующий вид:

Соотношение (2,2a) для той же схемы в раскрытой форме записывается так:

Матричное уравнение (2,3) соответствует  $P+1$  уравнениям закона Кирхгофа для узловых точек. Левая часть представляет собой строчечную матрицу, элементы которой равны сумме токов узлов. Однако, только  $P$  уравнений являются независимыми. Поэтому вместо (2,3) достаточно пользоваться уравнением

$$\Pi' I = 0, \quad (2,3a)$$

где  $\Pi'$  означает ту же матрицу, что и  $\Pi$ , но без строчки, относящейся к  $V_0$ . Матричное уравнение (2,3a) для схемы рис. 4 в раскрытой форме записывается так:

$$\begin{bmatrix} & -1 & 1 & & -1 & \\ & & & -1 & 1 & \\ & & & & & 1 \\ 1 & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_2 + I_3 - I_5 \\ -I_3 + I_4 + I_6 \\ I_1 - I_4 + I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2,6)$$

На  $Q$  значений токов в ветвях условиями соединения накладывается  $P$  связей и, таким образом, вектор  $I$  может быть полностью представлен своими  $Q - P = N$  линейно независимыми компонентами.

**3. II-й закон Кирхгофа и матрица полных сопротивлений.** Для каждой ветви схемы справедливо соотношение

$$U_n + E_n = \sum_{k=1}^{k=Q} I_k Z_{nk}. \quad (3,1)$$

Это уравнение справедливо для постоянного тока. В этом случае в правой части равны нулю все слагаемые, кроме того, для которого  $n=k$  и  $Z_{nn}=R_n$  представляет собой активное сопротивление ветви. Это же уравнение справедливо и для переменного тока, если рассматривать все величины как комплексы и  $Z_{nk}$  — взаимное полное сопротивление ветвей  $n$  и  $k$ . Наконец, в случае неустановившегося режима все члены в (3,1) представляют собой функции параметра  $p$  и, кроме того, в левой части величина  $E_n$  складывается из двух слагаемых, первое из них представляет лапласово изображение э. д. с., действующей в  $n$ -й ветви, а второе — некоторую функцию начальных условий.

Уравнение (3,1) можно записать в матричной форме, учитывая все  $Q$  ветвей схемы:

$$U + E = ZI, \quad (3,1a)$$

где  $U$ ,  $E$  — векторы напряжения и э. д. с., записанные в виде столбцовой матрицы;  $I$  — вектор тока, записанный в виде столбцовой матрицы и  $Z$  — квадратная матрица, диагональные члены которой представляют собой собственные полные сопротивления ветвей, а по обеим сто-

ронам диагонали расположены взаимные полные сопротивления ветвей, т. е.

$$Z = \begin{matrix} & \begin{matrix} B_1 & B_2 & \dots & B_a \end{matrix} \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_Q \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & - & - & - & Z_{1Q} \\ Z_{21} & Z_{22} & - & - & - & Z_{2Q} \\ - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - \\ Z_{Q1} & Z_{Q2} & - & - & - & Z_{QQ} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3,2)$$

Уравнение (3,1) связывает компоненты векторов  $U$  и  $I$  с  $Q$  компонентами вектора  $E$ , которые обычно принимаются заданными. Этими уравнениями не учитываются связи, налагаемые схемой соединения ветвей и полностью определяемые матрицей  $\Pi$ . В зависимости от вида этой матрицы определяется число независимых компонент векторов, входящих в уравнение (3,1), т. е. число  $N$  для вектора тока  $I$  и число  $P$  для вектора напряжения  $U$ .

Естественный путь преобразования уравнений (3,1) — исключить из уравнений один из неизвестных векторов. Исключение вектора  $U$  соответствует преобразованию к контурным величинам токов и э. д. с. Исключение вектора  $I$  соответствует преобразованию к узловым величинам.

**4. Преобразования Крона.** Вектор тока в ветвях, как выяснено выше, определяется с помощью  $N$  компонент. Произведя замену:

$$I = \Gamma i, \quad (4,1)$$

мы выражаем токи в ветвях  $I_\alpha$  ( $\alpha=1,2\dots Q$ ) через токи  $i_\alpha$  ( $\alpha=1,2\dots N$ ) в главных ветвях. Это и есть то преобразование, которое производит Крон с помощью вводимой им матрицы соединения  $\Gamma$ . При этом  $i_1=I_1$ ,  $i_2=I_2\dots i_N=I_N$ , т. е. принята нумерация новых токов, соответствующая нумерации токов главных ветвей. При соответствующем выборе главных контуров матрица  $\Gamma$  тождественна с матрицей  $\Pi$ , которую мы рассматривали до сих пор.

Токи главных ветвей обладают контурными свойствами. Это непосредственно вытекает из рассмотрения матрицы  $\Gamma$ . Через  $i_\alpha$  выражаются токи всех тех ветвей, которые входят в контур  $C_\alpha$  и только токи этих ветвей. Таким образом, преобразование к токам главных ветвей одновременно является преобразованием к контурным токам, протекающим в главных контурах<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Крон сам не отмечает этого обстоятельства.

Строгое доказательство этого предложения и является основным результатом работы, цитированной выше [Л. 4].

Свойства матрицы  $\Gamma$  позволяют непосредственно показать законность и пределы применимости преобразования вектора  $E$  и матрицы  $Z$ , производимого Кронем. Действительно, умножив (3,1a) слева на  $\Gamma$ , мы переходим от уравнения для ветвей к уравнениям для контуров, при этом напряжения на ветвях из уравнения исключаются, так как

$$\Gamma_i U = U \Gamma = 0.$$

После замены (4,1) получаем из (3,1a)

$$\Gamma_i E = \Gamma_i Z \Gamma i \quad (4,2)$$

или

$$e = z i. \quad (4,2a)$$

где

$$e = \Gamma_i E \quad (4,2b)$$

и

$$z = \Gamma_i Z \Gamma. \quad (4,2c)$$

Величина  $e_a$  представляет собой э. д. с., действующую в контуре  $C_a$ ,  $z$  — матрица полных сопротивлений, связывающая между собой контурные токи и контурные э. д. с.

В выражении (4,2) отсутствует слагаемое, содержащее вектор  $U$ . Поэтому его возможно получить из (3,1), как это делает Крон, если в (3,1) также не учитывать вектор  $U$  в левой части. Однако, такое преобразование было бы невозможным, если бы умножение на  $\Gamma$  не означало перехода к контурным величинам.

При преобразованиях (4,1), (4,2b) и (4,2c) мощность остается инвариантной<sup>5</sup>, т. е.

$$EI = ei. \quad (4,3)$$

В самом деле, из (4,3) вытекает, при указанных выше преобразованиях тождество  $E \Gamma i = \Gamma_i E i$ . Отсюда возникает представление о ковариантности и контравариантности векторов э. д. с. и токов при вышеуказанных преобразованиях.

В простой формулировке противоположная вариантность векторов  $E$  и  $I$  формулируется так: если при переходе к новым переменным формула преобразования для  $I$  имеет вид

$$I = C i, \quad (4,4)$$

то для  $E$  формула преобразования к новым переменным имеет вид

$$e = E C, \quad (4,5)$$

где  $C$  — матрица преобразования.

**5. Общий вид преобразования к контурным величинам.** Предыдущее рассмотрение показывает, что преобразование возможно производить различно. Если даже сохранить требование, что

<sup>5</sup> Крон постулирует при своих преобразованиях инвариантность мощности. Как вытекает из вышеуказанного, инвариантность мощности является следствием того, что эти преобразования соответствуют переходу от токов ветвей к токам контуров одной и той же цепи.

от системы  $Q$  уравнений (3,1a) надо перейти к системе  $N$  уравнений, не содержащих  $U$ , то и в этом случае преобразование можно произвести различным образом. В частности, можно преобразовать э. д. с. и токи с помощью различных матриц инцидентности  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , относящихся к различным системам главных контуров, т. е. можно принять новые э. д. с.  $e$  равными:

$$e_1 = \Gamma_{1i} E \quad (5,1)$$

и токи при этом преобразовать с помощью

$$I = \Gamma_2 i. \quad (5,2)$$

При этом (3,1a) примет вид:

$$e_1 = z i_1, \quad (5,3)$$

где

$$z_1 = \Gamma_{1i} Z \Gamma_2. \quad (5,4)$$

Формула (5,4) связывает э. д. с., действующие в одной системе  $N$  контуров, с контурными токами другой системы  $N$  контуров. Мы предполагаем, что нумерация ветвей при составлении матриц  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  одинакова.

Наконец, вместо матриц  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , определяющих некоторые системы главных контуров, можно воспользоваться для преобразования некоторыми матрицами

$$\begin{aligned} C_1 &= \Gamma_1 A_1, \\ C_2 &= \Gamma_2 A_2, \end{aligned} \quad (5,5)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  произвольные квадратные матрицы с  $N^2$  элементов и с детерминантом, не равным нулю. При этом

$$\begin{aligned} e_2 &= z_2 i_2, \\ e_2 &= C_{1i} E, \\ I &= C_2 i_2, \\ z_2 &= C_{1i} Z C_2. \end{aligned} \quad (5,6)$$

Здесь  $e_2$  и  $i_2$  — матрицы, элементами которых являются линейные комбинации контурных э. д. с. и токов.

Для иллюстрации предыдущих формул рассмотрим простой пример цепи, состоящей из трех ветвей (рис. 5). Для этой цепи  $N=2$ ,  $Q=3$ ,  $P=1$ . Выберем две матрицы инцидентности, относящиеся каждая к своей системе главных контуров:

$$\Gamma_1 = \begin{array}{c|cc} & C_1 & C_2 \\ \hline B_1 & 1 & \\ \hline B_2 & & 1 \\ \hline B_3 & -1 & -1 \end{array} \quad \Gamma_2 = \begin{array}{c|cc} & C_1 & C_2 \\ \hline B_1 & 1 & \\ \hline B_2 & -1 & -1 \\ \hline B_3 & & 1 \end{array} \quad (5,7)$$

Если обозначить матрицу сопротивлений через

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}, \quad (5,8)$$

то (5,4) примет для данного случая вид:

$$\begin{matrix} C_1' & C_2' \\ C_1 & C_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} E_1 - E_3 \\ F_2 - E_3 \end{bmatrix} = \begin{matrix} C_1 & C_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{11} - Z_{13} - Z_{31} + Z_{33} & -Z_{12} + Z_{23} + Z_{32} - Z_{33} \\ Z_{21} - Z_{22} - Z_{31} + Z_{32} & -Z_{22} + Z_{23} + Z_{32} - Z_{33} \end{bmatrix} = \begin{matrix} C_1 & C_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} i_1' \\ i_1'' \end{bmatrix}, \quad (5,9)$$

где  $i_1'$  и  $i_1''$  — контурные токи, показанные на рис. 5а сплошной стрелкой. Электродвижущие силы, стоящие в левой части уравнения (5,9), относятся к другой системе контуров, определяемой матрицей  $\Gamma_1$  и показанной на рис. 5а пунктиром.

В расчетах, производимых выше, инвариантность мощности при преобразованиях не соблюдается. Единственное требование, которое налагается на матрицы  $C_1$  и  $C_2$  в формулах (5,6), заключается в том, чтобы новые переменные  $e_2$  и  $i_2$  представляли собой линейную комбинацию контурных величин. Только в этом случае из уравнения исключается  $U$  и автоматически удовлетворяется уравнение Кирхгофа для токов.

Так как основной целью преобразования является приведение расчетов к наиболее простому виду (например, приведение матрицы полных сопротивлений к диагональной форме), то условие противоположной варианности токов и э. д. с. при расчетах неподвижных цепей не является обязательным. Обращаем внимание на то обстоятельство, что в (5,9) элементы векторов тока и э. д. с. представляют собой величины, доступные измерению, а матрица полных сопротивлений является несимметричной.

**6. Преобразование к узловым величинам.** Вместо того, чтобы исключить из (3, 1а) вектор  $U$ , можно перейти к уравнениям, в которых отсутствует вектор тока  $I$ . Для этого достаточно умножить (3, 1а) слева на  $Z^{-1}$  (причем  $Z^{-1}Z=1$ ) и затем воспользоваться уравнением (2,3).

Получим:

$$\Pi' Z^{-1} (U + E) = 0. \quad (6,1)$$

Вводя преобразование (2,2а), находим уравнения для компонент вектора  $U$ :

$$\Pi' Z^{-1} \Pi' u = -\Pi' Z^{-1} E \quad (6,2)$$

или, заменяя  $\Pi' Z^{-1} \Pi' u = y$ , получаем:

$$y u = -\Pi' Z^{-1} E. \quad (6,3)$$

Как видно из (6,2), уравнения для узловых напряжений имеют в общем случае более сложный характер, чем уравнения для контурных токов, которые могут быть составлены из непосредственного рассмотрения цепи. Правая часть уравнения (6,2) зависит не только от э. д. с., но и от матрицы полных сопротивлений. Однако, эта форма преобразования оказывается весьма

целесообразной в том случае, когда рассматриваемая схема является подсхемой по отношению к другой схеме, с которой она связана в узловых точках. Если токи, притекающие к узлам рассматриваемой подсхемы, обозначить через  $I_m$ , где  $m$  — индекс узла, то вместо (2,3) уравнение закона Кирхгофа для узлов запишется в виде:

$$\Pi' I + I' = 0, \quad (6,3)$$

где  $I'$  — вектор тока, притекающего к узловым токам извне, определенный своими  $P$  компонентами. В этом случае вместо уравнения (6,3) получаем:

$$\Pi' Z^{-1} \Pi' u = y u = -\Pi' Z^{-1} E - I'. \quad (6,3а)$$

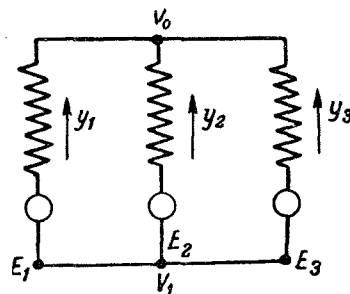


Рис. 5.

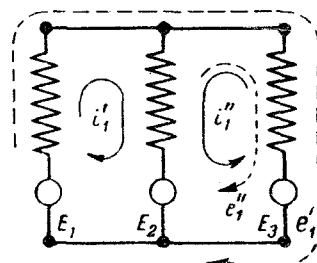


Рис. 5а.

В связи с выражениями (6,3) необходимо отметить, что при расчете переходных процессов величины  $E$  содержат не только изображения э. д. с., но и некоторые, легко определяемые из рассмотрения схемы — функции начальных условий.

**7. Ограничения, налагаемые на преобразование применением матрицы  $C$ .** Теория, изложенная выше, позволяет полностью обосновать способ преобразования уравнений электрической цепи с помощью матрицы соединения, применяемый Кроном. Матрица соединений составляется на основании уравнений Кирхгофа для токов в узлах. Вследствие идентичности матрицы соединений с соответствующим образом выбранной матрицей инцидентности  $\Gamma$ , преобразованию соответствует переход от токов ветвей к контурным токам. Однако, таким путем можно

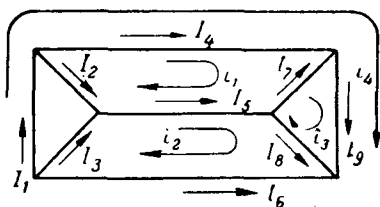


Рис. 6.

получить только уравнения для контуров, являющихся главными контурами относительно какого-либо дерева схемы. Например, для схемы трехфазной цепи, показанной на рис. 6, преобразование к контурным токам, показанным стрелками, не может быть произведено с помощью матрицы соединения, составленной на основании уравнения для токов в узловых точках. Контур 3 не имеет ни одной ветви, которая обтекалась бы только одним током  $i_3$ . Переход к уравнениям для контурных токов, показанных на рис. 6, может быть произведен только с помощью еще одного дополнительного преобразования от системы контуров, соответствующей матрице  $C$ , к другой системе контуров, показанной на рис. 6.

**8. Общая матрица инцидентности  $T$ .** В настоящем разделе введем матрицу инцидентности более общего вида, чем матрица инцидентности для главных контуров, которую мы рассматривали ранее. Мы обозначим через  $T$  более общую матрицу инцидентности для произвольной системы  $n$  независимых контуров некоторой рассматриваемой схемы. При этом мы предполагаем заданную некоторым определенным образом нумерацию ветвей и контуров.

Система уравнений, связывающая между собой э. д. с. и токи, действующие в ветвях, может быть получена непосредственно из рассмотрения схемы и записывается следующим образом в матричной форме с помощью матрицы  $T$ :

$$\left. \begin{aligned} T_i E &= Z I, \\ 0 &= \Pi' I, \end{aligned} \right\} \quad (8,1)$$

или, объединяя,

$$\begin{bmatrix} T_i E & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_i Z \\ \Pi \end{bmatrix} \times I. \quad (8,1a)$$

Замена

$$\left. \begin{aligned} T_i E &= e, \\ T i &= I \end{aligned} \right\} \quad (8,2)$$

приводит к контурным величинам э. д. с. и токов для некоторой произвольной системы независимых контуров данной схемы. Учитывая, что  $\Pi' I = 0$ , можно получить вместо (8,1a) с помощью (8,2)

$$\begin{bmatrix} e & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_i Z T_i \\ 0 \end{bmatrix} \times i \quad (8,3)$$

или

$$e = T_i Z T_i. \quad (8,3a)$$

В частности, для схемы рис. 6 и контуров, показанных стрелками, матрица  $T$  имеет вид:

$$T = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \\ B_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & 1 \\ -1 & & & \\ & -1 & & \\ 1 & & & 1 \\ -1 & 1 & & \\ & -1 & & -1 \\ -1 & & 1 & \\ & & 1 & 1 \\ & -1 & 1 & \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8,4)$$

**9. Матрица пересоединения цепи  $S$ .** До сих пор мы рассматривали преобразования, которые относились к одной, определенным образом заданной и остающейся неизменной, схеме и означали лишь переход от одной системы переменных к другой. Однако, можно эти и подобные им преобразования рассматривать и в другом смысле, именно, как преобразования перехода от одной схемы к другой.

Выясним, каким образом должны измениться уравнения закона Кирхгофа, если изменяется схема соединения элементов цепи.

Наложим на все преобразования схем единственное ограничение, заключающееся в том, что параметры ветвей и взаимные полные сопротивления между ветвями сохраняются неизменными.

Заметим, что все возможные пересоединения цепей, состоящих из определенного количества ветвей, возможно произвести путем последовательного применения операции *соединения узловых точек* между собой и обратных операций *разделения узловых точек*. Если мы соединим в одну все узловые точки схемы, состоящей из  $Q$  ветвей, то мы придем к схеме, показанной на рис. 7, для случая че-

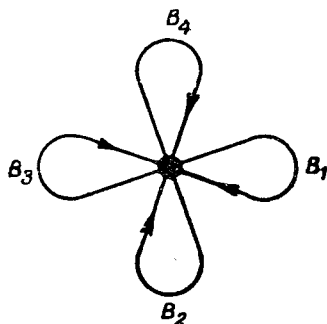


Рис. 7.

тырех ветвей. Схема рис. 7 соответствует *элементарной схеме* Крона.

Легко установить, что если из произвольной схемы путем соединения всех узловых точек можно получить элементарную, то путем обратной операции *разделения узловых точек* можно получить из элементарной цепи произвольную. Таким образом, произвольная схема с любым числом узловых точек может быть получена из элементарной цепи путем единообразной последовательно проводимой операции *разделения узловых точек*.

На рис. 8 показано получение схемы моста Витстона путем последовательного *разделения узловых точек*. Каждое увеличение числа узловых точек на единицу при неизменном числе ветвей означает уменьшение числа независимых контуров на единицу. Если увеличение узловых точек происходит путем их *разделения*, то можно легко показать, что контуры схемы после *разделения узловых точек* могут быть выражены с помощью линейной комбинации независимых контуров той же схемы до *разделения* ее узловых точек. Так, система независимых контуров схемы рис. 8, *d* выражается следующим образом через контуры схемы рис. 8, *c*:

$$\begin{aligned} C'_{123} &= C_{123}, \\ C'_{145} &= C_{15} \pm C_4, \\ C'_{234} &= C_{23} \pm C_4. \end{aligned} \quad (9,1)$$

Штрих обозначает контуры схемы после *разделения* узловых точек. Плюс или минус в правой части выбирается в зависимости от ориентировки ветвей.

В матричной форме переход от контуров схемы до

разделения узловых точек к контурам схемы после их *разделения* можно записать так:

$$C_{\alpha'} = S^c C_{\alpha} \quad (9,2)$$

где  $C_{\alpha'}$  — столбцовая матрица независимых контуров схемы с увеличенным числом узловых точек;  $C_{\alpha}$  — столбцовая матрица независимых контуров первоначальной схемы;  $S^c$  — особая матрица, характеризующая изменения, происшедшие в схеме после *разделения узловых точек*. Строчки матрицы  $S^c$  соответствуют независимым контурам новой схемы, столбцы соответствуют независимым контурам исходной схемы преобразования.

Переходя к матрицам инцидентности новой и старой схем, соотношение (9,2) можем записать в виде:

$$T_2 = T_1 S^c_i. \quad (9,3)$$

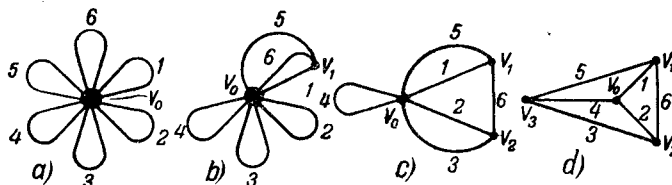


Рис. 8.

Если соотношение (9,3) соответствует преобразованию элементарной схемы к некоторой заданной схеме, то матрица  $S^c$  представляет собой матрицу инцидентности  $T$  преобразованной схемы, так как каждый контур элементарной схемы состоит из одной ветви и  $T=1$ . Таким образом, общая матрица инцидентности предыдущего раздела может быть рассматриваема как частный случай матрицы  $S^c_i$ .

Разделение узловых точек можно рассматривать так же, как связи, налагаемые на бывшие до *разделения* независимыми контурные токи. Уравнения связи легко выводятся. До *разделения узловых точек* токи в ветвях определялись из соотношения  $T_{1i} E = T_{1i} Z T_1 i_1$ .

После *разделения узловых точек*  $T'_{i1} E = T'_{i1} Z T'_{i1} i_2$  или

$$\left. \begin{aligned} S^c T_{1i} E &= S^c T_{1i} Z T_1 S^c_i i_2, \\ e_2 &= S^c e; \quad z_2 = S^c z_1 S^c_i \quad \text{и} \quad i = S^c_i i_2. \end{aligned} \right\} \quad (9,4)$$

Особенное преобразование (9,4) характеризует связи, налагаемые на контурные токи, *разделением узловых точек*. С помощью этой формулы можно непосредственно переходить от уравнения одной цепи к другой, минуя переход к элементарной цепи.

Если до *разделения узловых точек* уравнение цепи имело вид  $e_1 = z_1 i_1$ , то после *разделения* уравнение приобретает вид:

$$e_2 = z_2 i_2. \quad (9,5)$$

Матрица  $S^c$  играет в излагаемой теории по отношению к преобразованию произвольной системы контурных токов ту же роль, что и матрица *соединения*  $C$  по отношению к преобразованию тока в ветвях к токам в главных контурах.

Заметим, что в случае, когда при *разделении узловых точек* какая-либо ветвь оказывается разомкнутой, все предыдущие соотношения остаются справедливыми. Однако, во всех случаях схема должна оставаться связанной, так как только в этом случае сохраняется приведенная выше зависимость между числом ветвей узловых точек и независимых контуров. Для случая не связанной схемы необходимо учитывать число отдельных частей, на которые она распадается.

Операции, обратной разделению узловых точек,—соединению узловых точек—соответствует преобразование уравнений с помощью матрицы пересоединения  $S^v$ .

Если через  $V_1$  и  $V_2$  обозначить столбцовые матрицы узловых точек до и после соединения узловых точек, то матрица  $S^v$  показывает, из каких узловых точек старой схемы получены точки новой схемы:

$$V_2 = S^v V_1. \quad (9,6)$$

Например, при переходе от схемы  $d$  к схеме  $b$  (рис. 8) соотношение (9,6) принимает вид:

$$\begin{aligned} V_b^0 &= V_d^0 + V_d^2 + V_d^3, \\ V_b^1 &= V_d^1, \end{aligned}$$

т. е. для этого случая матрица

$$S^v = \begin{array}{c} V_b^0 \\ V_b^1 \end{array} = \begin{array}{c} V_d^0 \quad V_d^1 \quad V_d^2 \quad V_d^3 \\ \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & & 1 & 1 \\ \hline & 1 & & \\ \hline \end{array} \end{array}$$

Легко установить связь между матрицами инцидентности  $\Pi$  для старой и новой схемы:

$$\Pi_2 = S^v \Pi_1. \quad (9,7)$$

Преобразование уравнений при переходе от схемы до соединения узловых точек к схеме после соединения узловых точек может быть произведено следующим образом.

Для старой и новой схем действительны следующие уравнения:

для старой схемы

$$\Pi_1 Z^{-1} \Pi_{1t} u_1 = -\Pi_1 Z^{-1} E; \quad (9,8)$$

для новой схемы после соединения узловых точек

$$\Pi_2 Z^{-1} \Pi_{2t} u_2 = -\Pi_2 Z^{-1} E. \quad (9,9)$$

В уравнениях приняты равными нулю токи, притекающие извне.

Учитывая (9,7),

$$S^v \Pi_1 Z^{-1} \Pi_{1t} S_t^v u_2 = -S^v \Pi_1 Z^{-1} E. \quad (9,10)$$

Таким образом, переход от уравнений старой схемы (9,8) к уравнению новой схемы осуществляется заменой переменных:

$$u_1 = S_t^v u_2.$$

Если ввести обозначение

$$y_1 = \Pi_1 Z^{-1} \Pi_{1t}, \quad (9,12)$$

$$v_2 = \Pi_2 Z^{-1} \Pi_{2t}$$

то

$$v_2 = S y_1 S_t.$$

В предыдущих соотношениях мы пользуемся матрицей  $\Pi$  вместо  $\Pi'$  для того, чтобы не связывать нумерацию узлов старой схемы с нумерацией узлов новой схемы. Однако при этом в системах уравнений, представляемых матричными соотношениями (9,8) и (9,9), а следовательно, и (9,10), одно уравнение является избыточным, что легко учитывается при практическом проведении расчетов.

С помощью операции разделения и соединения узловых точек можно осуществить переход от любой схемы к любой с тем же числом ветвей. Переход через схему элементарной цепи не является при этом в общем случае обязательным. Следовательно, применение матрицы  $S^c$  и  $S^v$  дает возможность получить экономный с точки зрения затраты расчетного труда способ перехода от одной цепи к другой с теми же сопротивлениями.

#### Литература

1. G. Kron. The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electrical Machinery, GER, 1938.
2. G. Kron. Tensor Analysis of Networks. J. Wiley and Sons, 1939.
3. G. Kron. Short Course of Tensor Analysis. McGraw Hill, 1942.
4. W. H. Ingram and C. M. Cramlet. On the Foundations of Electric Network Theory. Journ. of Math. and Phys., v. XXIII, № 3, 1944.
5. Foster. Geometrical Circuits of Electrical Networks. Trans. AIEE, p. 303, 1932.
6. H. Whitney. Non Separable and Planar Graphs. Trans. Am. Math. Soc., 34, p. 339, 1932.
7. W. Cauer. Theorie der Wechselstromschaltungen. Verlag Becher u. Erler, Leipzig, 1941.





# Исследование заземлителей в плохо проводящих грунтах

*Кандидат техн. наук, доц. А. Л. ВАЙНЕР,  
кандидат техн. наук, доц. А. К. ПОТУЖНЫЙ,  
кандидат техн. наук, доц. С. М. ФЕРТИК*

*Харьковский электротехнический институт*

Предпринятые авторами в 1938—1939 гг. исследования импульсных характеристик единичных заземлителей [Л. 1] позволили установить некоторые положения, характерные для стекания импульсных токов в хорошо проводящих глинистых грунтах. Результаты этого исследования не могли быть надежно экстраполированы на грунты с низкой проводимостью.

В соответствии с намеченным в Харьковском электротехническом институте планом разрешения комплекса вопросов, относящихся к отводу импульсных токов, начатые ранее исследования были продолжены в 1940—1941 гг. на острове Хортица<sup>1</sup>.

На острове Хортица, в северной его части, был установлен передвижной импульсный генератор ХЭТИ на номинальное напряжение 3 тыс. kV, смонтирован отрезок (1,2 km) экспериментальной линии на напряжение 35 kV и заложены опытные заземлители. Грунт на острове Хортица характерен небольшим покровным слоем растительной почвы и следующим за ним мощным песчаным слоем, покоящимся на скалистом основании, и отвечал условиям намеченного расширения диапазона исследований.

Методика проведения опытов и регистрации была несколько усовершенствована на основе опыта прошлых исследований и специально поставленных в лабораторных и практических условиях экспериментов. Не останавливаясь подробнее на этих методических вопросах, следует здесь лишь отметить следующее:

1. Заземляющее устройство генератора импульсов было осуществлено таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить наибольшую электрическую связь с разрядным контуром,

*Приведены результаты опытов по стеканию импульсных токов с заземлителей, заложенных в плохо проводящих грунтах. Исследованы трубчатые, кольцевые и протяженные заземлители. Установлены величины импульсных коэффициентов заземлителей, а также коэффициенты использования единичных электродов в системе многократного заземления. Даны некоторые рекомендации целесообразных типов заземлений для плохо проводящих земель.*

смонтированным на наклонной деревянной конструкции, и с другой — обеспечить резкое падение потенциала в направлении экспериментальной площадки заземлителей. Низкое значение

импульсного сопротивления заземления генератора импульсов ( $Z_i = 1,2 \Omega$ ) было достигнуто с помощью искусственной обработки поваренной солью всего заземляющего устройства генератора.

2. Для измерительных цепей (от исследуемых заземлителей до осциллографической установки) был применен специально изготовленный концентрический воздушный кабель, состоящий из стальной трубы и коаксиально расположенного медного сплошного провода. С помощью этого кабеля (оболочка — стальная труба надежно заземлена) удалось передавать к катодному осциллографу в менее искаженном виде регистрируемые явления.

3. Для регистрации был применен четырехлучевой катодный осциллограф новой конструкции, сооруженный в отделе высоких напряжений ХЭТИ. Тщательная экранировка всего катодного осциллографа в целом и систем измерительных пластин друг по отношению к другу вместе с применением воздушного кабеля явились факторами, в существенной мере повысившими как чистоту, так и надежность записей импульсных волн.

4. Повторно произведенные измерения потенциалов поверхностных точек земли с помощью катодного осциллографа показали, что и применение воздушного кабеля для передачи к осциллографу измеряемых волн не может обеспечить надежную запись импульсных напряжений в поверхностных точках земли, даже при относительно пологих волнах. Это объясняется перераспределением напряжений, возникающим между сопротивлением, равным волновому (включенным в конце измерительного кабеля у пластин осциллографа), и зондом. Прибегли поэтому к реги-

<sup>1</sup> Исследования проводились по заданию технического отдела НКЭС и Днепроэнерго. В проведении опытов принимали участие, кроме авторов, научные сотрудники ХЭТИ Н. Г. Ковпак и Э. Виницкий, техник П. И. Татаренко, С. Н. Костюк и Д. Ожешко.

страции потенциалов поверхностных точек земли с помощью клидонографов и емкостных делителей, установленных непосредственно в точках измерения. Сопоставление результатов измерения напряжений в месте ввода импульса в заземлитель клидонографом и катодным осциллографом с омическим кабельным делителем<sup>2</sup> показало, что величины, определенные клидонографом, отличаются от показаний катодного осциллографа на 10—15%. Такая степень точности при отсутствии сомнений в правильности (в смысле методики) применения в данном случае клидонографа удовлетворяет поставленной задаче.

5. Снятие вольтамперных характеристик заземлителей производилось двумя способами: непосредственная запись характеристики лучом осциллографа<sup>3</sup> и регистрация отдельно волн тока и напряжения. В опытах 1941 г. запись волн тока и напряжения производилась на осциллографе одновременно двумя самостоятельными лучами.

6. Несмотря на более четкую запись явлений катодным осциллографом с омическим кабельным делителем новой конструкции, примененным в этих опытах, надежно проанализировать количественно процессы, возникающие в первые  $1 \div 1,5 \mu\text{sec}$  падения волны импульса на заземлитель, не удалось и в этой области поведение заземлителей продолжает оставаться неопределенной.

Анализ процессов, происходящих в соединительных проводах и измерительных цепях при осциллографировании заземлителей, отводящих импульсные токи, дает объяснение этому факту, который отнюдь не является случайным следствием несовершенства методики измерений, как мы это первоначально предполагали.

Действительно, измерение напряжения на заземлителе есть не что иное, как измерение разности напряжений между рассматриваемой точкой заземлителя и достаточно удаленной нулевой точкой земли, для которой можно полагать электромагнитное поле отсутствующим.

Расстояние между этой нулевой точкой и заземлителем составляет обычно несколько десятков метров (40—50 м и больше). До тех пор, пока в соединительных проводах, связывающих обе точки с катодным осциллографом, не закончатся переходные процессы (на что требуется в некоторых случаях до  $0,5 \div 1 \mu\text{sec}$  и даже больше), осциллограф будет неизбежно записывать эти переходные процессы, а вовсе не чистое напряжение на заземлителе, тем более, что для этого начального периода времени самое понятие напряжения на заземлителе не является определенным и однозначным. Оно зависит от длины, взаимного расположения и волновых параметров соединительных цепей, а также от параметров того объекта, к которому напряжение

прикладывается. Это утверждение, очевидно, справедливо как для случаев измерения импульсного напряжения, о которых здесь идет речь, так и для случаев, когда импульсное напряжение на заземлителе оказывается приложенным к какому-либо объекту (изоляция, живое существо).

«Гладкую» запись начальной части вольтамперной кривой и кривой напряжения на заземлителе можно, конечно, получить, применяя волны импульсов с очень пологим фронтом (не менее  $5 \div 10 \mu\text{sec}$ ), исключая тем самым из рассмотрения начальные стадии процесса.

Широко используемые в практике катодного осциллографирования меры борьбы с паразитными влияниями (экранирование, демпфирование сопротивлениями и емкостями) в рассматриваемом случае, очевидно, принципиально не могут обеспечить гладкую и правильную запись на фронте волны, поскольку колебания лежат в самой природе изучаемого явления.

Кратко перечисленные выше усовершенствования в методике проведения опытов повысили уверенность в надежности полученных результатов и позволили в значительно более широких пределах экстраполировать полученные количественные взаимозависимости.

Опыты были проведены при нескольких формах волн (положительной и отрицательной полярностей), но основные данные, приведенные ниже, относятся к апериодическим волнам типа  $3/25 \mu\text{sec}$ .

Ниже публикуются некоторые итоги той части экспериментальных работ, которые удалось закончить в 1940 г. и в начале лета 1941 г. на острове Хортица. В ближайшем будущем работы этого комплекса, прерванные в связи с войной, будут продолжены.

**Трубчатые заземлители.** Общая картина поведения трубчатых заземлителей в плохо проводящих грунтах совпадает с той, которая была установлена в результате предыдущих опытов с аналогичными заземлителями в глинистых (хорошо проводящих) грунтах. То же влияние величины тока, формы подающей волны, линейных размеров заземлителей не оставляет сомнений в справедливости установленных закономерностей. В более четком виде представилось изменение величины импульсного сопротивления заземлителя за время стекания импульсной волны.

Относительное действие искровых и дуговых процессов в плохо проводящих грунтах интенсивнее. Спадение импульсного сопротивления трубчатого заземлителя от начального значения, определяемого индуктивностью и емкостью электрода и земляного пути, до минимального значения, соответствующего области прохождения амплитуды тока, а также дальнейший подъем наблюдались в более резком виде во всех опытах.

Можно было предполагать, что величина удельного сопротивления земли должна сказываться на двух следующих факторах, в совокупности заметным образом влияющих на процесс стекания импульсного тока: на зоне проникновения импульсного тока в глубь земли, на зоне искрообразования у заземлителя.

<sup>2</sup> Катодный осциллограф при волнах с фронтом длиннее  $0,5 \div 1 \mu\text{sec}$  в этом случае дает надежные результаты.

<sup>3</sup> На одну пару измерительных пластин осциллографа подавался импульс напряжения с начальной части заземлителя, а другая пара пластин, расположенная перпендикулярно к первой, служила для измерения импульса тока.

При одной и той же форме и амплитуде падающей волны и других идентичных условиях напряженность поля в какой-либо глубинной точке земли примерно пропорциональна  $\sqrt{\rho}$ . Следовательно, по мере увеличения  $\rho$  возрастает толщина земли, участвующая в отводе импульсного тока, — процесс распространения импульсного тока несколько облегчается.

Несомненно, существенную роль, кроме того, играет увеличение зоны искрообразования у электродов, заложенных в песчаной земле. Объясняется это, с одной стороны, тем, что, как указано выше, напряженность поля в связи с увеличением  $\rho$  больше и пробивная напряженность песчаной земли меньше пробивной напряженности глинистых земель (для песка около 5, для глинистой земли около 7 kV/cm<sup>2</sup>).

Возрастание толщи земли, по которой течет импульсный ток, и расширение зоны, охваченной искровыми процессами, должны приводить к снижению отношения  $\frac{Z_i}{R} = \alpha_i$ .

Опыты подтвердили изложенное: импульсные коэффициенты трубчатых заземлителей, заложенных в песчаном грунте, ниже тех, которые наблюдались в глинистых грунтах. Опыты проводились на протяжении нескольких месяцев, в течение которых влажность земли, а следовательно, и  $\rho$  менялись. Это позволило определить изменение  $\alpha_i$  в некотором диапазоне  $\rho$ . Эти данные вместе с данными прошлых работ позволили экспериментально установить зависимость  $\alpha_i = f(\rho)$  в пределах от  $0,5 \cdot 10^4$  до  $2,5 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$  (рис. 1, 2) для нескольких значений импульсного тока. В диапазоне  $\rho = (1 \div 2) \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$  импульсный коэффициент заметно падает по мере возрастания  $\rho$ . Дальнейшее увеличение  $\rho$  и тока  $I_m$ , как показывает форма кривых, должно привести при  $\rho = 3 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$  и токах порядка 3—4 kA к значениям  $\alpha_i = 0,3 \div 0,4$ , т. е. к величинам  $\alpha_i$ , того порядка, которые были предсказаны в прошлой работе на основе экстраполяции полученных тогда данных [Л. 1].

Влияние величины стекающего с заземлителя тока на импульсный коэффициент заземлителя становится особенно заметным, начиная с плотности тока  $0,15 \text{ A/cm}^2$ . Это следует из графика рис. 2 и из того, при каких токах вольтамперная зависимость начинает отклоняться от прямолинейной (последнее связано с возникновением искровых процессов у электрода).

Таким образом, в песчаных грунтах влияние величины тока на импульсное сопротивление заземлителя начинает значительно раньше сказываться, чем в глинистых почвах ( $0,4 \text{ A/cm}^2$ ). Оно и понятно в свете изложенного о распределении напряженности поля в песчаных грунтах и о величине пробойного напряжения этих земель. Увеличение плотности тока на заземлителе свыше  $0,15 \text{ A/cm}^2$  приводит к весьма заметному снижению  $Z_i$ . Но по достижении  $\Delta i_m = 0,75 \text{ A/cm}^2$  эффект дальнейшего возрастания плотности тока практически исчезает, аналогично тому, как это происходит в глинистых грунтах при  $\Delta i_m = 4 \text{ A/cm}^2$ .

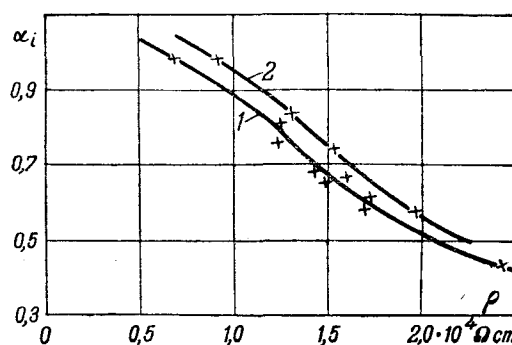


Рис. 1. Импульсный коэффициент  $\alpha_i$  трубчатых заземлителей в зависимости от удельного сопротивления земли. Длина труб 200 см, диаметр 6 см. Волны апериодические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ . 1— $I_m = 2700 \text{ A}$ ; 2— $I_m = 1000 \text{ A}$ .

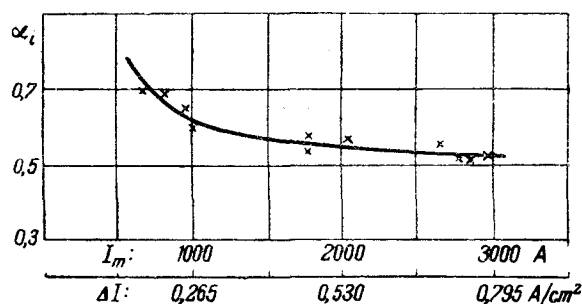


Рис. 2. Импульсный коэффициент  $\alpha_i$  трубчатых заземлителей в зависимости от величины стекающего с них тока. Длина труб 200 см, диаметр 6 см. Волны апериодические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ ,  $\rho = 1,9 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ .

**Протяженные заземлители.** Противовесы и лучевые заземлители занимают основное место среди других типов заземляющих устройств для отвода токов молнии на линиях передачи энергии в плохо проводящих грунтах. Исследования, которые были поставлены, имели своей целью установить основные положения, относящиеся к стеканию импульсных токов с протяженных заземлителей—импульсное сопротивление таких электродов различной длины, распределение напряжений вдоль них, влияние собственной проводимости электродов и т. п.

Серии опытов были произведены в условиях различной влажности земли и при величинах удельного сопротивления земли, достигавших значений  $9 \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ . Большинство опытов было выполнено при  $\rho = (4 \div 5) \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ . При таких значениях  $\rho$  явления, связанные с утечкой электродов (проводимостью растекания), перестают играть доминирующую роль, и в более ярком виде начинают вырисовываться волновые процессы.

Несмотря на более четкую запись явлений катодным осциллографом новой конструкции, примененным и в этих опытах, надежно проанализировать количественно процессы, возникающие в первый момент падения волны на заземлитель (0—1,5  $\mu\text{sec}$ ), не удалось. Эта область поведения заземлителей продолжает оставаться неопределенной.

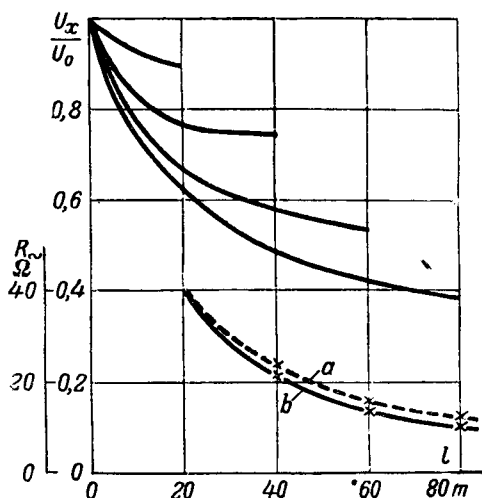


Рис. 3. Распределение потенциала вдоль протяженного заземлителя (стальной трос).

Волны апериодические типа  $3/25 \mu\text{sec}$ , отрицательной полярности.  $I_m = 2300 \text{ A}$ , глубина укладки электродов  $50 \text{ cm}$ ;  $a - R_{\sim} = f(l)$  рассчитано по  $\rho$ , измеренному на первых  $20 \text{ m}$  заземлителя;  $b - R_{\sim} = f(l)$  по измерению.

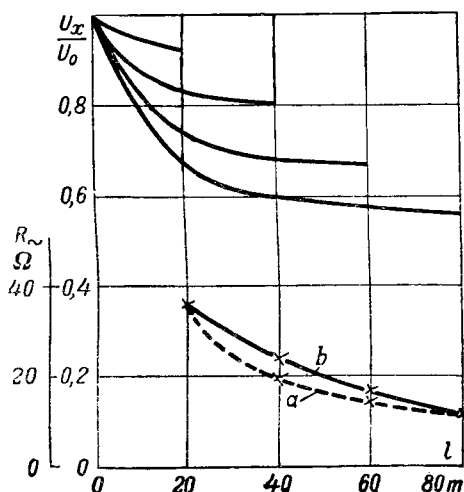


Рис. 4. Распределение потенциала вдоль протяженного заземлителя (медный трос).

Волны апериодические типа  $3/25 \mu\text{sec}$  отрицательной полярности;  $I_m = 2300 \text{ A}$ , глубина укладки электродов  $50 \text{ cm}$ ;  $a - R_{\sim} = f(l)$  рассчитано по  $\rho$ , измеренному на первых  $20 \text{ m}$  заземлителя;  $b - R_{\sim} = f(l)$  по измерению.

В то же время характер изменения  $Z_i$  во время стекания волны импульса в той части, которая с достаточной четкостью определялась из наших опытов, не оставляет сомнений в том, что начальное значение  $Z_i$  не связано с проводимостью растекания, а определяется волновыми параметрами заземлителя—его индуктивностью и емкостью. У нас нет достаточных непосредственных данных, чтобы судить о величине  $Z_i$  протяженного заземлителя при  $t=0$ . Однако, аллюр кривой  $Z_i = f(t)$ , дает основание полагать, что с уменьшением  $t$  волновое сопротивление протяженного заземлителя возрастает, достигая при  $t$ , близком нулю, значений  $Z_{i0} = 180 - 220 \Omega$ , т. е. приближаясь к тем величинам, которыми обычно оценивается волновое сопротивление тросового заземлителя.

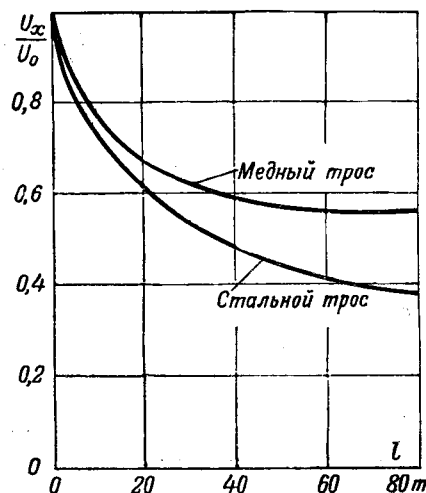


Рис. 5. Распределение потенциала вдоль протяженного заземлителя.

Волны апериодические типа  $3/25 \mu\text{sec}$  отрицательной полярности.  $I_m = 2300 \text{ A}$ , глубина укладки электродов  $50 \text{ cm}$ .

По теории Bewley длительность переходного процесса (промежутков времени, в течение которого  $Z_i$  изменяется от  $Z_0$  до  $R_{\sim}$ ) соответствует отрезку времени, необходимому для завершения явлений частичных отражений от распределенных по заземлителю сопротивлений растеканию, т. е.  $2l [\mu\text{sec}]$ , где  $l$ — в сотнях метров.

В тех сериях опытов, о которых идет речь, наибольшая длина заземлителей было  $80 \text{ m}$ , следовательно, по Bewley при  $t = 1,6 \mu\text{sec}$  импульсное сопротивление заземлителя должно стать равным  $R_{\sim}$ . Наши опыты не подтвердили этого. Судя по форме кривой  $Z_i f(t)$ , переходный период длился дольше, чем это следует по Bewley (табл. 1).

Таблица 1

Длина заземлителя, м	$t_{\text{пер}} \mu\text{sec}$		Отношение расчетного времени к фактическому
	Фактическое	Расчетное (по Bewley)	
20	2	0,4	0,2
40	3	0,8	0,267
60	$>3$	1,2	0,34
80	4	1,6	0,4

Из данных таблицы, следует, что пользование предложенным для определения  $Z$  выражением:

$$Z(t) = R_{\sim} + (Z - R_{\sim}) e^{-\frac{3t}{2l}},$$

основанным на переходном периоде в  $2l [\mu\text{sec}]$ , приводит к ошибкам, которые тем больше, чем короче заземлитель.

Значительный интерес представляют результаты измерений распределения напряжений вдоль протяженных заземлителей. Запись напряжений производилась катодным осциллографом. На рис. 3, 4, 5 приведено распределение напряжений (амплитудные значения) вдоль стального и медного протяженных заземлителей

различной длины, там же для установления степени однородности проводимости грунта вдоль заземлителя нанесены  $R_{\Sigma} = f(l)$  измеренное и  $R_{\Sigma} = f(l)$  построенное в предположении, что  $\rho$  вдоль заземлителя неизменное и равно его значению, измеренному вдоль первых 20 м электрода.

Рассмотрение полученного распределения напряжений и сопоставление его с опубликованными нами ранее данными, относящимися к протяженным заземлителям в глинистой почве, окончательно убеждают в том, что относительное падение напряжения в заземлителе при импульсах качественно следует известным законам, выведенным для случая стекания с заземлителей токов промышленной частоты.

При стекании токов промышленной частоты возрастание  $\rho$  приводит к снижению отношения  $\frac{r}{R}$ , вследствие чего уменьшается падение напряжения в электроде. Опыты в песчаной земле показали такую же закономерность и для импульсного тока. Видимо, этой закономерностью объясняется также и то, что падение напряжения в самом электроде (при импульсном токе) больше в стальном заземлителе, чем в медном.

Скин-эффект в стальном тросе в связи со значительной магнитной проницаемостью стали проявляется значительно резче, чем в медном. Собственное сопротивление стального электрода при импульсах возрастает значительно больше, поэтому значения  $\frac{r}{R}$  для стального заземлителя больше, чем для медного. У медного заземлителя отдаленные от места ввода тока элементы получают, следовательно, при импульсах относительно большие напряжения и лучше отводят ток.

Импульсное сопротивление заземлителя является основной величиной, определяющей при конкретных параметрах грозовых разрядов напряжение, лежащее на изоляции. Так как  $Z_i$  изменяется в процессе стекания волны импульса, то необходимо установить, какое значение  $Z_i$  следует принимать при расчетах.

Когда речь шла о трубчатых заземлителях, то сомнений в этом вопросе не возникало: амплитудные значения тока, стекавшего с заземлителя, практически совпадали по времени с амплитудным значением напряжения на заземлителе. Следовательно, расчетное  $Z_i$  естественно было принимать соответствующим этому моменту времени. У протяженных заземлителей, как показали наши опыты, в плохо проводящих грунтах наблюдается значительный сдвиг по времени между амплитудами тока и напряжения. Поэтому величина  $Z_i$ , принятая для момента прохождения амплитуды волны напряжения, не будет равна значению  $Z_i$ , соответствующему моменту прохождения амплитуды тока (рис. 6).

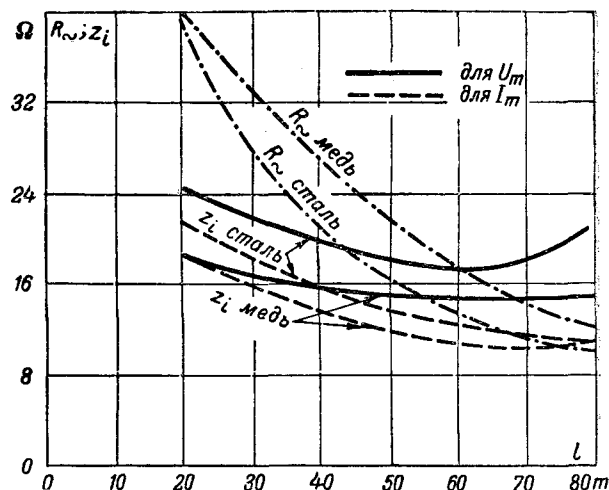


Рис. 6. Импульсное сопротивление протяженных заземлителей в зависимости от их длины.

Волны аperiodические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ ;  $I_m = 2\ 300\ \text{A}$ ;  $\rho = (3,9 - 4,4) \cdot 10^4$  (стальной трос) и  $(4,4 - 5,2) \cdot 10^4\ \Omega\ \text{cm}$  (медный трос).

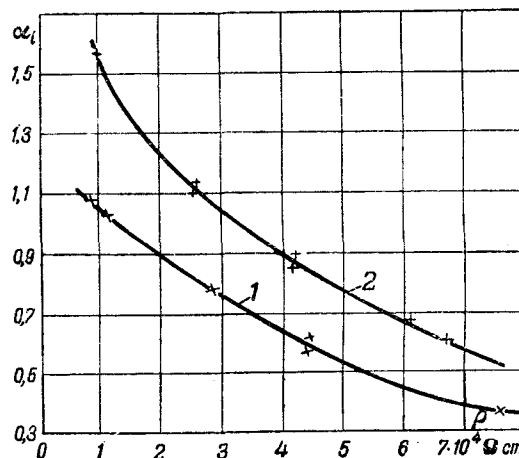


Рис. 7. Импульсный коэффициент  $\sigma_i$  протяженных заземлителей (стальной трос) в зависимости от удельного сопротивления земли.

Волны аperiodические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ . 1 —  $l=20\ \text{m}$ ;  $I_m = 2\ 100 - 2\ 700\ \text{A}$ . 2 —  $l=40\ \text{m}$ ;  $I_m = 1\ 700 - 2\ 000\ \text{A}$ .

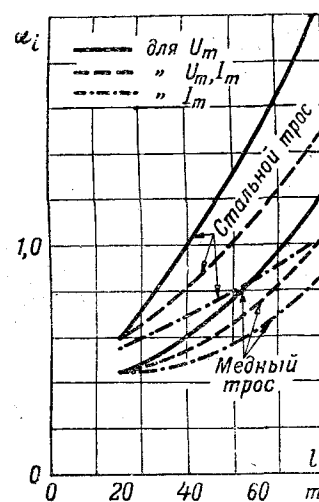


Рис. 7а. Импульсный коэффициент протяженных заземлителей в зависимости от их длины.

Волны аperiodические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ ;  $I_m = 2\ 300\ \text{A}$ ;  $\rho = (3,9 - 4,4) \cdot 10^4\ \Omega\ \text{cm}$ .

<sup>4</sup>  $r$  — собственное сопротивление заземлителя на единицу земли;  $R$  — величина, обратная проводимости растекания на единицу длины.

Наибольшее расхождение достигает 25%. При расчетах грозоустойчивости конечной величиной, подлежащей определению, является наибольшее значение напряжения, приходящегося на изоляцию. Следовательно,  $Z_i$  следует принимать таким, каким оно будет при прохождении амплитуды напряжения, несмотря на то, что в расчетах исходной величиной является величина импульса тока молнии. В таком случае произведение  $I_m Z_i$  даст напряжение, несколько большее, чем оно в действительности будет иметь место.

Искровые процессы у протяженных заземлителей возникают в начальной части электрода. Влияние величины  $\rho$  сказывается, с одной стороны, на интенсивности дуговых процессов и, с другой, — на величине зоны их распространения (на диаметр и длину зоны).

Интенсивность дуг и диаметр зоны, охваченной ими, возрастают по мере увеличения  $\rho$ , в связи с теми причинами, которые были приведены в разделе „Трубчатые заземлители“. Что касается длины дуговой зоны, то возрастание ее в плохо проводящих грунтах происходит потому, что область эффективного стекания тока увеличивается (изменяется отношение  $\frac{r}{R}$ ).

Эти факторы, вместе с теми, которые приводят к снижению падения напряжения в заземлителе, обуславливают уменьшение импульсных коэффициентов протяженных заземлителей в грунтах малой проводимости. Изображенная на рис. 7 зависимость  $\alpha_i = f(\rho)$ , полученная из наших опытов, свидетельствует, что снижение  $\alpha_i$  происходит на всем диапазоне исследованных  $\rho$ . Видимо, в области  $\rho > 10^5 \Omega \text{ см}$  дальнейшее снижение  $Z_i$  невелико.

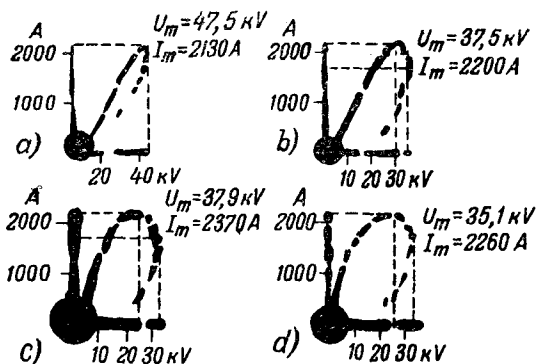


Рис. 8. Вольтамперные характеристики протяженных заземлителей (стальной трос).

Волны апериодические типа 3/25  $\mu\text{с}$ ;  $\rho = (3,9 - 4,4) \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ ;  $a$  — длина заземлителя равна 20 м,  $b$  — 40,  $c$  — 60,  $d$  — 80 м.

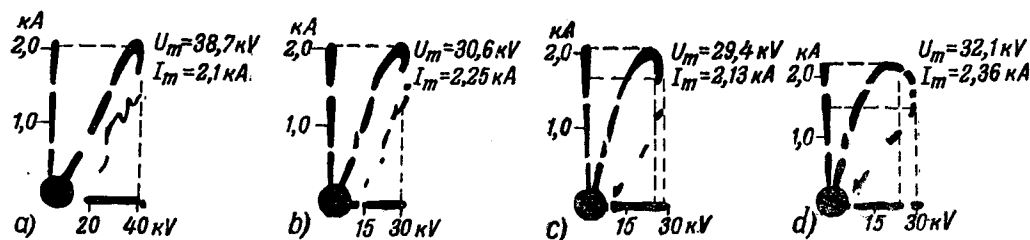


Рис. 9. Вольтамперные характеристики протяженных заземлителей (медный трос).

Волны апериодические типа 3/25  $\mu\text{с}$ ;  $\rho = (4,4 - 5,2) \cdot 10^4 \Omega \text{ см}$ ;  $a$  — длина заземлителя равна 20 м,  $b$  — 40,  $c$  — 60,  $d$  — 80 м.

Приведенные выше положения подтверждают заснятые непосредственно записью осциллографа вольтамперные характеристики (рис. 8, 9), кстати сказать, полностью совпадающие с кривыми, построенными на основе записей осциллографом волн тока и напряжения.

Ряд особенностей вольтамперных кривых сразу бросается в глаза и позволяет сделать некоторые выводы.

На всех заснятых вольтамперных характеристиках протяженных заземлителей аллюр кривой в ее восходящей части дает основание предполагать, что в начальной стадии процесса импульсный ток относительно мал,  $Z_i$  в это время достаточно велико. Петлеобразный характер вольтамперных характеристик подтверждает наличие дуговых явлений на заземлителе и спадающий аллюр графика  $Z_i = f(t)$ .

Вольтамперные характеристики не оставляют сомнений в том, что  $Z_i$  протяженного заземлителя — переменная величина и что по времени амплитудные значения волн тока и напряжения не совпадают. Этот сдвиг, видимо, связан с проявлениями индуктивности электрода. На это объяснение наталкивает, в частности, тот установленный в нашем исследовании факт, что сдвиг амплитуды тока относительно амплитуды напряжения тем более заметен, чем длиннее электрод.

В зарубежной практике широко распространено применение для противовесов медного троса. Вообще говоря, можно было заранее предполагать, что применение медных электродов должно привести к положительному результату, в основном в связи с относительно меньшим проявлением скин-эффекта в медных тросах. Опыты в достаточной мере это подтвердили. Так, из графиков распределения напряжения вдоль заземлителей (рис. 5) следует, что падение напряжения в медном заземлителе меньше, чем в стальном электроде, и что разница между значениями потенциалов увеличивается по мере удаления от места ввода импульса в электрод. Вольтамперные характеристики показывают, что сдвиг волны тока и напряжения относительно меньше у медного электрода и проводимость растекания этого заземлителя раньше сказывается. Все это приводит к тому, что импульсные коэффициенты протяженных медных заземлителей (рис. 7, а) меньше, чем для стальных. Чем длиннее заземлитель, тем в большей мере сказывается роль материала электрода.

Было бы, однако, ошибочно на основе этих известных преимуществ медных заземлителей сделать вывод о необходимости применения в плохо проводящих грунтах медных электродов.

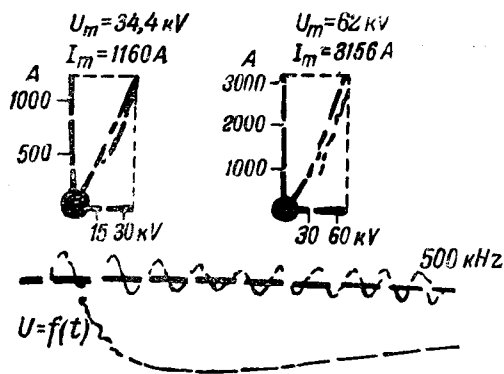


Рис. 10.  $U_i$  в функции времени и вольтамперные характеристики кольцевого заземлителя.

Волны аperiodические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ . Диаметр кольца 400 см;  
 $\rho = (11,3-12,0) \cdot 10^4 \Omega \text{ cm}$ .

Соображения экономического характера и дефицит меди являются противопоказанием для медных электродов, а главное, применение очень длинных заземлителей, при которых в основном сказываются преимущества меди, оправдывается в исключительных случаях. Обычно электродами длиной не более 40—60 м удается обеспечить необходимую импульсную проводимость заземления.

**Кольцевые заземлители.** Еще в первых опытах—при глинистом грунте—была установлена высокая эффективность кольцевых заземлителей в отводе импульсных токов. Результаты опытов были настолько неожиданными и разительными, что возникали сомнения в правильности примененной для исследования этого типа заземлителей методики и эта часть работы в свое время не была опубликована. В связи с этими обстоятельствами опыты с кольцевыми заземлителями в песчаной земле были проведены с особой тщательностью. Отдельные кольцевые электроды были расположены на значительном расстоянии друг от друга. Во время опытов с концентрически расположенными кольцевыми заземлителями велись специальные наблюдения с целью установить, не возникают ли искровые перекрытия по земле между двумя заземлителями. Были проведены опыты для определения влияния места подвода импульса и т. п. Было сделано, таким образом, все возможное в полевых условиях для обеспечения чистоты опытов.

Кольцевые заземлители совмещают в себе достоинства сосредоточенных и протяженных заземлителей. Расстояние от места ввода тока до наиболее удаленной части кольца невелико, и поэтому все части заземлителя эффективно отводят ток. Положительный эффект также обусловлен большим объемом земли, охваченным электродом; сечение земли, через которое стекает ток, относительно больше, чем у трубчатых и протяженных электродов. Облегчающим отвод тока также является то, что в заземлителе из-за сравнительно небольшого пути тока нет большого падения напряжения.

В связи с этими обстоятельствами почти не наблюдается смещение волны тока относительно волны напряжения, переходные процессы длятся

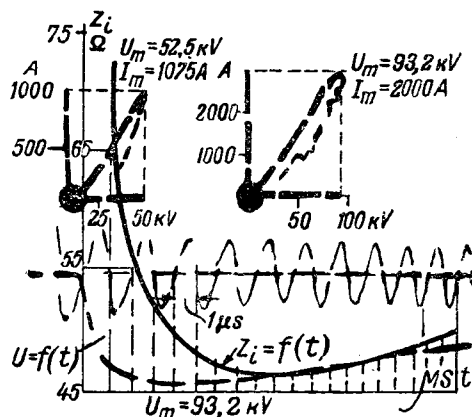


Рис. 11. Вольтамперные характеристики двух концентрично расположенных кольцевых заземлителей (включены параллельно).

Волны аperiodические типа 3/25  $\mu\text{sec}$ ;  $\rho = 11,5 \cdot 10^4 \Omega \text{ cm}$ . Диаметр одного кольца 400 см, другого 800 см.

весьма короткий промежуток времени, дугowymi явлениями охвачена земля вдоль всего электрода и импульсное сопротивление составляет величину, значительно меньшую, чем  $R_z$ . Например, из рис. 10, 11 видно, как быстро входит в действие проводимость растекания кольцевого заземлителя, возросшая вследствие возникновения дуг. Видно, что амплитуды тока и напряжения совпадают по времени, и импульсное сопротивление заземлителя в момент прохождения амплитуды волны низко.

Еще более показательными являются графики  $Z_i = f(I_m)$  и  $Z_i = f(\rho)$  — рис. 12, 13. Уже при токе в 1000 А дуговые процессы полностью охватывают заземлитель и импульсные коэффициенты заземлителей оказываются в пределах 0,3—0,4, имея тенденцию при увеличении тока свыше 3000 А снизиться до значений 0,2—0,3. Влияние удельного сопротивления земли имеет такой же характер, как и у других типов заземлителей.

**Коэффициент использования единичных электродов в системе многократного заземлителя.** Импульсные токи в результате оттеснения их к поверхности земли распространяются по сравнительно небольшой толще земли, и поэтому токовые потоки отдельных заземлителей взаимодействуют интенсивнее, чем в случае стекания токов промышленной частоты. Вследствие этого степень использования единичных заземлителей в системе меньше.

Другой фактор, играющий существенную роль в использовании проводимости единичных заземлителей,—удаленность заземлителя от места ввода тока. Как указывалось, по мере удаления от места ввода тока в заземлитель напряжение на заземлителе заметно снижается и в связи с этим уменьшается использование отдельных элементов заземления.

Таким образом, результирующее полное сопротивление сложного заземления и, следовательно, коэффициент использования являются функцией не только количества и взаиморасположения заземлителей, но и удаления каждого электрода от места ввода тока.



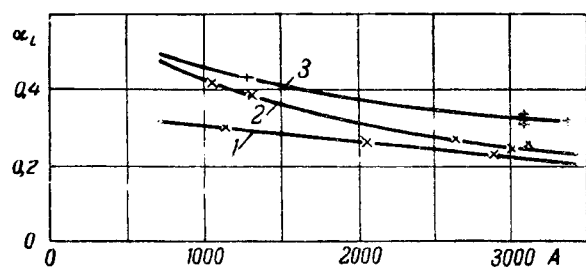


Рис. 12. Импульсный коэффициент кольцевого заземлителя в зависимости от величины стекающего с них тока.

Волны аperiodические типа  $3/25 \mu\text{с}$ . 1, 2— $D=400$  см и  $\rho$  соответственно  $12 \cdot 10^4$ ,  $7,8 \cdot 10^4 \Omega\text{см}$ ; 3— $D=800$  см;  $\rho=9,5 \cdot 10^4 \Omega\text{см}$ .

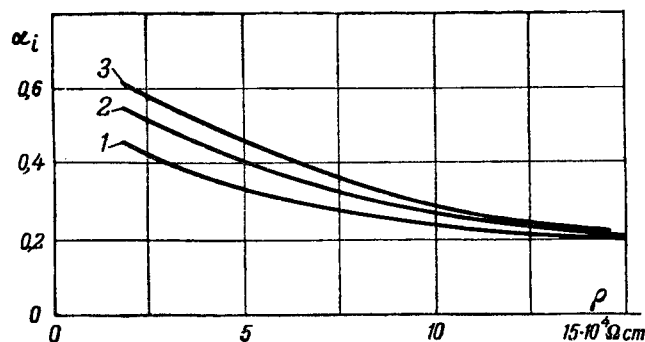


Рис. 13. Импульсный коэффициент кольцевых заземлителей в зависимости от удельного сопротивления земли.

Волны аperiodические типа  $3/25 \mu\text{с}$ . Опыты в глинистых грунтах при токах 4 000 и 8 000 А и в песчаных грунтах при токах 1 000, 2 000 и 3 200 А; 1— $D=400$  см; 2— $D=600$ ; 3— $D=800$  см.

Вопрос этот заслуживает специального освещения и поэтому здесь более подробно не затрагивается. Ориентиром для практики может служить табл. 2, составленная на основе наших опытов со сложными заземлителями, уложенными в глинистых и песчаных землях.

Таблица 2

Расположение заземлителей	$\frac{a}{r}$	$\eta_{\sim}$	$\eta_i$	$\frac{\eta_i}{\eta_{\sim}}$
	$\sim 3$	0,965	0,7	0,725
	2	0,725	0,59	0,815
	$\sim 3$	0,85	0,68	0,8
	—	0,85	0,67	0,79
	—	0,85	0,67	0,79
	—	0,89	0,65	0,73

**Выводы.** Приведенные результаты опытов освещают качественное и количественное влияние формы волны, величины стекающего тока и удельного сопротивления земли на импульсное сопротивление различных типов заземлителей.

Есть все основания сделать следующие рекомендации:

1. Констатированная в предыдущих статьях целесообразность применения сосредоточенных заземлителей для отвода импульсных токов еще в большей мере подкрепляется последующими

опытами в грунтах плохой проводимости и в особенности относится к кольцевым заземлителям.

Именно этот тип заземлений можно рекомендовать для линии передачи энергии, в частности кольцевые заземлители. На линиях передачи энергии заземления опор имеют назначение не только отводить импульсные токи, но и обеспечивать низкие значения напряжений прикосновения и шага. Выполнение обоих этих условий достижимо с помощью кольцевых заземлителей, либо комбинацией из трубчатых и кольцевых заземлителей.

2. Применение протяженных заземлителей может быть оправдано лишь в тех случаях, когда грунт не позволяет укладывать другого рода заземлители. Целесообразная длина протяженных заземлителей зависит от величины удельного сопротивления земли, чем больше  $\rho$ , тем большей длины заземлитель допустим (считая от места ввода тока до конца заземлителя). Ориентирами могут служить следующие данные: при  $\rho$ , равном 1,0; 3,0; 5 или  $10 \Omega\text{см} \cdot 10^4$ , допустимая длина протяженного заземлителя 20; 40; 60 и 80 м соответственно.

Таблица 3

Ток	До 5 000 А				Свыше 5 000 А			
	Удельное сопротивление $\Omega\text{см}$							
Заземлитель	1 · 10 <sup>4</sup>	3 · 10 <sup>4</sup>	5 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>4</sup>	3 · 10 <sup>4</sup>	5 · 10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
Труба длиной 2—3 м	0,8	0,6	0,4	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4
Кольцо диаметром (м)								
4 . . . . .	0,4	0,35	0,3	0,2	0,4	0,4	0,35	0,25
6 . . . . .	—	—	—	—	—	0,5	0,4	0,3
8 . . . . .	0,6	0,5	0,4	0,3	0,55	0,55	0,45	0,3
Протяженный заземлитель длиной (м)								
20 . . . . .	1,2	0,9	0,6	0,6	1,1	0,8	0,5	0,5
30 . . . . .	1,5	1,1	0,8	0,8	1,4	1,0	0,6	0,6
40 . . . . .	1,8	1,4	1,0	1,0	1,7	1,3	0,8	0,8
60 . . . . .	2,2	1,9	1,3	1,3	1,9	1,6	1,3	1,3
80 . . . . .	2,6	2,3	2,0	2,0	2,2	2,0	1,6	1,6

Стальной трос с успехом может применяться в качестве протяженного заземлителя. Использование в качестве протяженных заземлителей медного троса не оправдывается — степень снижения  $Z_i$ , достигаемая укладкой медного электрода, не компенсируется расходом дефицитного проводникового материала.

На основе проведенных опытов и экстраполяции полученных данных можно рекомендовать значения импульсных коэффициентов единичных заземлителей, приведенных в табл. 3.

#### Литература

1. Электрические станции, № 3 и 4, 1941.





# Некоторые вопросы теории дуговой электрической печи

Проф. С. И. ТЕЛЬНЫЙ

Уральский индустриальный институт им. Кирова

По масштабу использования дуговых электрических печей, достигнутому за годы сталинских пятилеток, советской металлургии принадлежит одно из первых мест в мире. Развитию промышленности СССР в текущей пятилетке должен сопутствовать дальнейший технический прогресс электрометаллургии.

В этих условиях вопросы теории дуговых печей приобретают особую актуальность. Целесообразно рассмотреть основные положения теории печи, успешно разрабатывавшейся перед войной кафедрой электрометаллургии Днепропетровского металлургического института, и наметить некоторые направления дальнейшего ее развития.

Теория дуговой печи базируется на представлении о несинусоидальном характере электрических явлений в цепи дуговой печи и методе теоретического построения кривых мгновенных значений тока и напряжения в отдельных частях цепи электрометаллургической установки и параллельной экспериментальной проверке формы этих кривых путем осциллографирования.

Отправной точкой в разработке этой теории, начатой автором еще в 1918 г., послужила термодинамическая теория дуги, основоположником которой является В. Ф. Миткевич. Дальнейшие исследования установили, что кроме высокой температуры кратера катода на ионизацию и высокую электропроводность газообразного столба дуги влияет ряд других факторов. Тем не менее, в условиях работы дуговых печей роль температурного фактора проявляется особенно ярко.

Уже работа первых промышленного масштаба установок дуговых печей для плавки стали (Stassano) показала, что при том же напряжении и токе длина дуги в конце плавки, когда печь сильно разогрета, больше, чем в начале плавки.

Попытки использовать формулу Ayrton (или аналогичные ей) для установления зависимости между длиной и напряжением дуги в дуговых печах приводят к чрезмерно высоким значениям

*Дан обзор состояния некоторых основных вопросов теории дуговой электрической печи преимущественно в том освещении, которое они получили в работах кафедры электрометаллургии Днепропетровского металлургического института, проводившихся до войны. Намечены направления дальнейшего развития теории дуговой печи и формулируются задачи по внедрению технически обоснованных методов контроля ее режимов.*

напряжения дуги. Более правильные результаты дает формула [Л. 1]

$$e_d = \alpha + (\beta - \sigma T)l, \quad (1)$$

где  $e_d$  — напряжение и  $l$  — длина дуги,  $T$  — температура

рабочего пространства печи,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты формулы Ayrton и  $\sigma \approx 0,45 \cdot 10^{-3}$  — температурный коэффициент.

Для проверки этой формулы в электрометаллургической лаборатории Днепропетровского металлургического института было поставлено экспериментальное исследование [Л. 2], которое привело к некоторым уточнениям ее и позволило установить числовые значения коэффициентов выражения (1) при различном характере процесса электроплавки стали.

**Влияние температуры и роль устойчивости теплового состояния кратеров дуги в дуговой электрической печи** проявляют себя также в том, что осциллограммы напряжения дуги переменного тока, горящей в печи между расплавленным металлом и угольным электродом, характеризуются наличием горизонтального участка, отвечающего интервалу времени горения дуги от момента ее возникновения  $\omega t_1$  до момента погасания  $\omega t_2$  в каждый полупериод переменного тока.

Различные факторы, не определяющие сущность процесса горения дуги (добавочные падения напряжения в электродах и контактах, выдувание дуги, перемещения кратеров и пр.), иногда искажают форму кривой напряжения дуги в условиях дуговой печи. Тем не менее, положение, что напряжение дуги в дуговой печи представляет постоянную величину

$$e_d = a = \text{const.} \quad (2)$$

во время горения ее ( $\omega t_2 - \omega t_1$ ) в каждый полупериод, может быть принято как основное при рассмотрении электрических явлений в цепи дуговой печи. Помимо осциллограмм, это находит подтверждение в ряде оправдавших себя выводов, к которым приводит это положение при

рассмотрении различных сторон работы дуговой печи. Многие из этих выводов имеют практическое значение и заслуживают более подробного рассмотрения.

**Индуктивное сопротивление и непрерывный процесс горения дуги.** Еще первые осциллограммы дуги переменного тока (Blondel) обнаружили ее прерывистый характер. В каждый полупериод существуют промежутки времени, когда напряжение недостаточно для нормального существования дуги. Ток в цепи в эти моменты обусловлен остаточной проводимостью газов, заполняющих пространство между электродами, и ничтожно мал по сравнению со значением тока при нормальном горении дуги. Во время перерывов горения кратеры охлаждаются и между длительностью этих перерывов (или длительностью периода горения дуги  $\omega t_2 - \omega t_1$ ) и устойчивостью дуги переменного тока существует, естественно, известная зависимость. Исследования Simon'a и других показали, что увеличение индуктивности цепи удлиняет период горения дуги. К этому же приводит и решение уравнения:

$$E_m \sin \omega t = R_a i + \omega L_a \frac{di}{d\omega t} + e_d, \quad (3)$$

которое можно рассматривать как основное уравнение цепи дуговой электрической печи. Решение его получается в такой форме:

$$i = \frac{E_m}{\sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2}} \left\{ C e^{-\omega t \operatorname{tg} \alpha} + \sin(\omega t - \alpha) - \frac{a}{E_m \cos \alpha} \right\}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L_a}{R_a}$ ,  $a = e_d$  — знакопеременная постоянная, изображающая величину напряжения дуги от момента ее возникновения  $\omega t_1$  до момента погасания  $\omega t_2$  в каждый полупериод;  $C$  — постоянная интегрирования, определяемая из условия, что в момент возникновения дуги ( $E_m \sin \omega t = a$ ) ток в цепи равен нулю ( $i = 0$ ).

Исследуя формулу (4), нетрудно прийти к заключению, что соотношения

$$\beta = \frac{a}{E_m} \text{ и } \gamma = \frac{\omega L_a}{R_a} \quad (5)$$

можно подобрать так, что дуга будет гореть непрерывно:

$$\omega t_2 - \omega t_1 = \pi. \quad (6)$$

Введение понятия о непрерывном процессе горения дуги имеет практическое значение при выборе параметров электрометаллургической установки ( $R_a$ ,  $X_a = \omega L_a$ ) и установлении нормального режима ее работы ( $E_m$ ,  $e_d = a$ ).

Непрерывный режим горения дуги не является непременным условием ее устойчивости. Например, во второй период плавки стали (период восстановления) горение дуги достаточно устойчиво и при отключенной дроссельной катушке. Тем не менее, в нормально работающих

установках дуговых печей соотношение между напряжением печного трансформатора  $E_m$ , напряжением печи  $a$ , активным сопротивлением  $R_a$  и индуктивным  $X_a$  цепи оказываются обычно подобранными так, что условие непрерывности горения дуги выполняется [Л. 3].

**Трехфазная печь.** Указанное выше (4) решение позволяет теоретически построить кривые мгновенных значений тока и напряжения дуги и выявить степень развития в них гармоник высшего порядка. Это имеет особенно большое значение для трехфазных дуговых печей.

Теоретическое и осциллографическое исследование [Л. 4] показали, что форма кривой тока в сильной степени зависит от того, имеет ли установка нулевой провод между нулевыми точками печи и печного трансформатора, или этот провод отсутствует.

В первом случае нулевой провод оказывается всегда нагруженным током — даже в том случае, когда нагрузка всех трех фаз одинакова. Ток нулевого провода содержит третьи и кратные ей гармоники, которые явно выражены также и в кривых тока каждой дуги.

При отсутствии нулевого провода между нулевыми точками печи и печного трансформатора существует напряжение, обусловленное третьей и кратными ей гармониками. Кривые тока дуги в этом случае характеризуются явно выраженными гармониками 5, 7 и 11... порядка. Третьи и кратные ей гармоники в кривых тока при этом отсутствуют.

Еще большее значение имеет то обстоятельство, что при прочих равных условиях длительность периода горения дуги ( $\omega t_2 - \omega t_1$ ) в трехфазных печах без нулевого провода больше, чем в однофазных и в трехфазных печах с нулевым проводом. Это обусловлено тем, что при обрыве дуги в одной из фаз печи последняя обращается в однофазного потребителя с двумя последовательно включенными дугами при напряжении на каждой, равном  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  фазового напряжения. Напряжение же между ванной металла и электродом, на котором возникает дуга, составляет  $\frac{3}{2}$  от фазового напряжения. Поэтому, если для установки с нулевым проводом момент возникновения дуги определяется условием

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{a}{E_m},$$

то для установки без нулевого провода

$$\omega t'_1 = \arcsin \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{E_m}.$$

Очевидно, что  $\omega t'_1 < \omega t_1$ , т. е. момент возникновения дуги в каждый полупериод наступает раньше. Из этого также следует, что для обеспечения условий непрерывного горения дуги в печах без нулевого провода требуется меньшая величина индуктивного сопротивления.

**Шунтированная дуга в печах ферросплавного типа.** В печах для выплавки ферросплавов дуга горит под слоем проводящих ток шихтовых материалов. Она оказывается шунтированной через шихтовую проводимость печи. Ток в электроде  $i$  равен сумме токов через дугую  $i_d$  и шихтовую  $i_{ш}$  проводимость

$$i = i_d + i_{ш}, \quad (7)$$

причем  $i_{ш} = \frac{e_d}{R_{ш}}$ , где  $R_{ш}$  — сопротивление шихтовых материалов в печи. Нетрудно видеть, что уравнение (3) легко привести к виду:

$$E_m \sin \omega t = R_u i_d + X_u \frac{di_d}{d\omega t} + e_d \left(1 + \frac{R_u}{R_{ш}}\right). \quad (8)$$

Уменьшение сопротивления  $R_{ш}$  равносильно увеличению напряжения дуги, что вызывает уменьшение тока в дуге и снижает длительность ее горения в каждый полупериод.

Изучение вопроса о распределении тока между дуговой и шихтовой проводимостями в печах ферросплавного типа [Л. 5] и влияния на это распределение различных факторов (сопротивления шихты, положения электродов, параметров цепи) с новой точки зрения освещает условия работы этих печей. Например, на основании осциллограмм тока, снятых на печах Миге Запорожского завода ферросплавов, удалось установить наличие мощного дугового разряда в этих печах [Л. 6, 7], работающих на очень низком напряжении (35—55 В), печах, которые изобретателями конструировались как печи сопротивления, а не как дуговые.

Разработка теории шунтированной дуги выдвинула весьма актуальный вопрос о распределении тока в шихтовых материалах ферросплавной печи и стимулировала проведение ряда работ [Л. 8, 9], имеющих большое теоретическое и практическое значение.

**Характеристики и параметры электрометаллургической установки.** Построение кривых мгновенных значений тока, напряжения и мощности позволяет определить эффективные значения тока и напряжения дуги ( $I$  и  $E_d$ ) и среднюю мощность ее. Несинусоидальная форма кривых приводит к тому, что коэффициент мощности дуги

$$\eta_d = \frac{P_{cp}}{IE_d} \quad (9)$$

получается всегда меньше единицы, хотя дуга по своей природе и представляет активное сопротивление. Можно построить кривые, показывающие изменение величины  $I$ ,  $E_d$ ,  $P_{cp}$  и  $\eta_d$  в функции от длины дуги  $l_d$ , ее напряжения

$$e_d = \alpha + (\beta - \sigma T) l_d \text{ или от величины отношения } \frac{e_d}{E_m}.$$

Построение этих кривых имеет практическое значение, так как изменение длины дуги путем

изменения положения электрода представляет основной способ регулирования электрического режима работы дуговой печи.

На практике чаще применяется построение электрических характеристик дуговых печей на основании круговых диаграмм. В качестве независимой переменной при этом принимают ток в электроде. Построение таких характеристик сыграло большую роль в развитии дуговых печей, хотя в основе этого метода лежит заведомо неверное для условий дуговой печи представление о синусоидальном характере электрических явлений в цепи электрометаллургической установки.

Wotschke [Л. 10] при построении круговых диаграмм пользуется понятием о токе теоретического короткого замыкания

$$I_{м. к. з} = \frac{E}{X_u} \quad (10)$$

и вводит также понятие о характеризующих печь числах

$$\frac{1}{\omega L} \text{ и } \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (11)$$

С точки зрения теории дуговой печи за характеризующую величину целесообразно принять отношение  $\gamma = \frac{X_u}{R_u}$ . Если в качестве масштабов при построении круговой диаграммы принять [Л. 11, 12]

$$\alpha = \frac{I}{I_{м. к. з}}, \quad \beta = \frac{E_d}{E_{mp}}, \quad \sigma = \frac{P}{P_{max}}, \quad (12)$$

то диаграмме можно придать универсальный характер.

При построении круговых диаграмм и электрических характеристик электрометаллургических установок часто возникают затруднения в определении параметров  $X_u$  и  $R_u$ . Кроме чисто технических трудностей (огромная сила тока, сложность конструкции короткой цепи и т. д.), при этом имеют место трудности и принципиального порядка — понятия „параметры“ к величинам  $X_u$  и  $R_u$  для электрометаллургической установки применимо только условно. Величина их зависит от положения электродов, распределения тока в печи и от формы кривых мгновенных значений тока [Л. 13, 14], т. е. от электрического режима работы печи.

Например, величина  $X_u = \omega L_u$ , установленная при коротком замыкании между электродами, когда кривая тока близка к синусоиде, может значительно отличаться от значения, определенного на основании замеров при режиме, близком к нормальному, т. е. при несинусоидальной форме кривой тока. Для построения круговой диаграммы работающей дуговой печи необходимо одновременно измерить активную мощность  $P$ , поглощаемую установкой, тока  $I$  и напряжения  $E$ . Учитывая сильно колеблющийся

характер показаний приборов, приходится производить серию замеров этих величин, вычислять величину  $X_u$  по схеме

$$\cos \varphi = \frac{P}{EI} \rightarrow \sin \varphi = X_u = \frac{E}{I} \sin \varphi. \quad (13)$$

и отбрасывать резко отклоняющиеся значения.

Обычно при выборе оптимального режима работы печи используются только электрические характеристики. Уравнение

$$P(T-t) = aG + P_m T + R_p(T-t), \quad (14)$$

в элементарной форме изображающее полный энергетический баланс установки, дает возможность построить в функции тока характеристики: а) длительность плавки  $T$ ; б) производительность печи  $g = \frac{G}{T}$ ; в) удельный расход электрической

энергии  $A = \frac{P(T-t)}{G}$  и некоторые другие. В этих характеристиках оказываются учтенными не только электрические параметры ( $E$ ,  $X_u$ ,  $R_u$ ), но также тепловые параметры печи (мощность тепловых потерь  $P_m$ ) и технологические условия работы ее (вес закладки  $G$ , длительность горячих простоев  $t$ , удельный полезный расход энергии на плавку  $a$ ).

**Трансформаторная цепь электрометаллургической установки.** При построении характеристик цепи электрометаллургической установки обычно рассматривается, как простая цепь с последовательно включенными с печью активным и индуктивным сопротивлениями. В действительности каждая дуговая печь питается энергией от индивидуального печного трансформатора, составляющего неотъемлемую часть электрометаллургической установки. Правильнее рассматривать ее как цепь трансформаторного типа. Используемый некоторыми авторами [Л. 15] при учете влияния трансформатора векторный метод не может отразить главной особенности установки — наличия стационарно существующего во вторичной цепи мощного дугового разряда и несинусоидального, благодаря этому, характера электрических явлений. Более правильным в этом отношении является метод решения системы уравнений [Л. 16]:

$$E_m \sin \omega t = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + n_1 \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}, \quad (15)$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + n_2 \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + e_\partial,$$

$$\Phi = BS_{\text{ж}}, B = f(H), H = \frac{0,4\pi}{L_{\text{ж}}} (i_1 n_1 + i_2 n_2).$$

Для случая, когда магнитная система печного трансформатора работает в условиях, далеких от магнитного насыщения железа ( $B = \mu H$ ,  $\mu = \text{const}$ ) и когда активным сопротивлением первичной цепи можно пренебречь ( $R_1 \approx 0$ ), эта система легко приводится к уравнению:

$$A \sin \omega t = a i_2 + b \frac{di_2}{dt} + c e_\partial, \quad (16)$$

т. е. уравнению для простой цепи, но с коэффициентом  $A$ ,  $a$ ,  $b$  и  $c$ , числовые значения которых зависят от распределения активного и реактивного сопротивлений между первичной и вторичной цепью ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ), коэффициента трансформации и от тока холостого хода печного трансформатора.

Решение уравнения (16) позволяет выявить влияние печного трансформатора и дроссельной катушки на форму кривых мгновенного значения тока в дуге, условия непрерывного горения дуги, на электрические характеристики установки и пр. С другой стороны, выясняется влияние дуги на форму кривых намагничивающего тока трансформатора и тока в первичной цепи при различном режиме работы печи. Это позволяет исследовать условия работы печного трансформатора и других элементов электрического оборудования дуговой печи. Например, при этом выявляется очень сложная форма кривой напряжения на дроссельной катушке и наличие в этой кривой гармоник высшего порядка очень большой амплитуды.

#### Автоматическое регулирование электродов.

Неустойчивый характер горения дуги и непрерывно возникающие резкие нарушения нормального режима работы дуговой печи требуют применения автоматического регулирования механизмов подъема и опускания электродов. Для этой цели используются автоматические регуляторы самых различных типов — от регулятора Тюри в старых установках дуговых печей до регуляторов амплитудного типа в новейших. Тем не менее, проблема автоматического регулирования дуговых печей не может считаться решенной и в настоящее время. При конструировании и использовании автоматических регуляторов не всегда учитываются своеобразие и сложность электрических явлений в цепи дуговой печи.

Основные положения теории дуговой печи и круговые диаграммы электрометаллургической установки позволяют установить [Л. 17] зависимость между чувствительностью автоматического регулятора и перемещением электрода, соответствующим этой чувствительности. Выявляется также влияние на работу автоматического регулятора параметров цепи, режима и условий работы дуговой печи.

Рассмотрение этого вопроса приводит также к заключению, что условия работы автоматического регулятора резко изменяются при переходе с одной ступени напряжения печного трансформатора на другую. Если одновременно с этим переходом соответствующим образом переключать и витки дроссельной катушки, то условия нормальной работы автоматического регулятора и устойчивого горения дуги могут быть сохранены на различных ступенях напряжения. Печные трансформаторы со встроенной дроссельной катушкой и общим для обоих секционному переключателем решают практически эту задачу.

Особого внимания заслуживает работа и выбор типа автоматического регулятора для трехфазной дуговой печи [Л. 18]. Характер сопряже-

ния фаз в трехфазной электрометаллургической установке, — соединение фаз потребителя на звезду с естественной нулевой точкой в ванне металла при отсутствии нулевого провода, — оказывает большое влияние на процесс автоматического регулирования. Нарушение нормального режима в одной из фаз вызывает перемещения электродов и в двух остальных фазах. Представление о независимом регулировании электродов отдельных фаз трехфазной дуговой печи весьма условно. Автоматические регуляторы различных типов обладают в этом отношении различными характеристиками. При построении их необходимо учитывать основное отличие вольтовой дуги от других проводников электрического тока, а именно — сопротивление дуги определенной длины обратно пропорционально силе тока.

Исследование характеристик регуляторов показывает преимущество новейших типов регуляторов (Regulex, Rototrol) [Л. 19]. Надлежащий подбор параметров этих регуляторов может обеспечить независимое регулирование электродов отдельных фаз и позволяет устранить влияние падения напряжения в короткой цепи (от трансформатора к печи) между точками присоединения к ней катушек напряжения регулятора.

Теория автоматического регулирования дуговых печей намечает пути к разработке рациональной схемы автоматического регулятора взамен устаревшего уже регулятора ХЭМЗ. Актуальность этого вопроса отмечена в резолюциях Конференции по электротермии и электропечам при Академии наук СССР, происходившей в Москве в 1940 г.

Теория дуговой печи, основанная на представлении о несинусоидальном характере электрических явлений, позволила выявить и произвести анализ ряда сторон работы этого мощного и своеобразного потребителя электрической энергии. В этом смысле эта теория себя вполне оправдала и заслуживает большего внимания, чем то, которое ей до сих пор уделялось. Дальнейшее ее развитие в направлении более детального изучения явлений в цепи трехфазной дуговой печи при различных схемах включения печного трансформатора приведет к еще более ясному представлению о работе печи и электрического оборудования при ней.

Дальнейшая разработка теории автоматического регулирования дуговых печей требует изучения нестационарных электрических явлений, возникающих при нарушении нормального режима работы печи и при восстановлении его путем перемещения электродов, с учетом характеристик печи и автоматического регулятора.

Изучение электрических свойств вольтовой дуги и разработка теории дуговой электрической печи вплотную подводит нас к изучению тепловых свойств дуги и коэффициентов передачи тепла, развиваемого в ней, ванне металла и различным частям кладки рабочего пространства печи в зависимости от электрического режима работы последней. Разработка этого вопроса, вероятно, заставит продолжить изучение

формы дуги и влияние на нее электромагнитных воздействий. Изучение тепловых свойств дуги даст возможность поставить и разрешить проблему об автоматическом регулировании не только электрического, но и теплового режима работы дуговой печи.

В области дуговых печей для выплавки ферросплавов поставлена, но не решена проблема управления распределением тока между дуговой и шихтовой проводимостью. При разработке этой проблемы должно быть уделено внимание изучению также электролитического характера проводимости расплавленных и полурасплавленных материалов и продуктов плавки. Все эти проводники второго класса в плавильном тигле ферросплавной печи оказываются включенными в цепь тока, поступающего через электрод. При электротермических процессах плотность тока на электродах выше, чем при электролитических процессах, поэтому можно ожидать, что в каждый полупериод переменного тока на электродах (ванна, угольный электрод) происходят выделение продуктов электролиза. Даже кратковременное их существование в течение каждого полупериода может оказать существенное влияние на протекание химических реакций в плавильном тигле и на качество выплавляемого продукта. Это обстоятельство заслуживает особого внимания при разработке технологического процесса выплавки электротермическим способом комплексных ферросплавов, — типа силико-кальция, — которым, повидимому, предстоит играть большую роль в производстве стали.

В заключение необходимо отметить, что возможности, которые открывает теория дуговой электрической печи в изучении физики явлений, при решении вопросов выбора параметров, характеристик и оптимальном режиме работы электрометаллургической установки, находятся в явном противоречии с реальными условиями эксплуатации дуговых печей в промышленных их установках.

Резкие, непрерывно возникающие и носящие в значительной мере случайный характер колебания тока в цепи работающей дуговой печи сталеплавильного типа чрезвычайно затрудняют определение величин, характеризующих электрический режим работы печи. В некоторые моменты плавки (например, период расплавления твердой завадки) колебания стрелок измерительных приборов, обычно используемых в промышленных установках, совершенно исключают возможность количественной оценки электрического режима. К тому же устанавливаемые для контроля электрического режима работы дуговой печи измерительные приборы обычно не дают возможности судить о форме кривых тока и напряжения печи, которые, как видно из всего изложенного выше, наиболее полно и ясно характеризуют условия горения дуг в печи.

Возникает острая необходимость в тщательной разработке вопросов о контрольно-измерительной аппаратуре для дуговых печей и о методах контроля и регламентации их электрического режима работы. Дуговая

печь столь мощный потребитель электрической энергии, и тщательный контроль и регламентация работы этого потребителя имеет столь важное значение с точки зрения экономии электрической энергии и улучшения всех технико-экономических показателей работы электрометаллургической установки, что даже разработка специальной контрольно-измерительной аппаратуры для дуговых печей себя вполне оправдывает. Основными направлениями в решении этой весьма актуальной задачи могут быть следующие:

1. Использование измерительных приборов, показывающих усредненные, за более или менее значительный промежуток времени, значения тока, напряжения и мощности. Наряду с другими способами решения может оказаться целесообразным применить для этой цели приборы, основанные на выпрямлении переменного тока. Такие приборы уже получают применение в электрометаллургии в установках индукционных печей высокой частоты.

2. Упрощенные конструкции катодных осциллографов (без контура настройки частоты), которые, вероятно, уже в ближайшее время могли бы найти применение в качестве пультных приборов, во всяком случае в установках дуговых печей большой мощности. Это позволит осуществить систематический контроль условий горения дуги.

3. Разработка сигнальной аппаратуры — вопрос, заслуживающий тщательного изучения. Подобная аппаратура будет фиксировать внимание обслуживающего печь персонала на отклонениях от нормального режима. Существует потребность также в аппаратуре, регламентирующей нормальный режим плавки. С точки зрения экономии электрической энергии, целесообразно при разработке технологических инструкций по проведению различных плавок устанавливать лимиты расхода электрической энергии не только на всю плавку, но и на отдельные ее периоды. Не представляет больших затруднений конструирование аппаратуры, сигнализирующей, что установленный лимит превзойден. Это, несомненно, послужит также стимулом к повышению стандартности плавков.

4. Приводившаяся уже схема определения полного реактивного сопротивления  $X_{\Sigma}$  электрометаллургической установки, значения тока теоретического короткого замыкания  $I_{м.к.з.}$

$$\cos \varphi = \frac{W}{EI} \rightarrow \sin \varphi \rightarrow X_{\Sigma} = \frac{E}{I} \sin \varphi \rightarrow I_{м.к.з.} = \frac{E}{X_{\Sigma}},$$

на основании замеров на вводе активной мощности  $P$  тока  $I$  первичной цепи и напряжения сети  $E$  может быть использована для конструирования прибора, непосредственно измеряющего величины  $X_{\Sigma}$  и  $I_{м.к.з.}$ . Наличие такого прибора

значительно облегчило бы для цехового инженерно-технического персонала построение круговых диаграмм и электрических характеристик и сделало бы использование последних методом повседневного контроля работы дуговых печей.

Оснащение установок дуговых печей тщательно разработанной контрольно-измерительной аппаратурой, несомненно, повысит общую культуру эксплуатации этих печей и послужит к планомерному сближению теории с практикой.

### Литература

1. С. И. Тельный. Теория вольтовой дуги в применении к дуговым электрическим печам. Наук. зап. катедры метал. граф. та термичної обробки металів, Днепропетровск, 1928.
2. Н. М. Чуйко и С. И. Хитрик. Зависимость между напряжением и длиной дуги переменного тока. Журнал ДОМЕЗ, № 10, 1939.
3. С. И. Тельный и И. Т. Жердев. Непрерывное горение трехфазной дуги. Теор. и практ. металлургии, № 8, 1937.
4. С. И. Тельный и И. Т. Жердев. Осциллограммы тока и напряжения дуговых электрических печей. Теор. и практ. металлургии, № 2, 1936.
5. С. И. Тельный и И. Т. Жердев. Шунтированная дуга в электрических ферросплавных печах. Теор. и практ. металлургии, № 9, 1937.
6. И. Т. Жердев, С. И. Хитрик и Я. Ф. Цыбакин. Работа печи Миге на повышенном напряжении. Теор. и практ. металлургии, 1938.
7. И. Т. Жердев. Влияние различных методов регулирования на мощность электрической дуги однофазной ферросплавной печи. Научн. труды Днепр. мет. инст., вып. VII. Электрометаллургия, 1940.
8. Я. Ф. Цыбакин. Распределение тока в однофазной ферросплавной печи. Теор. и практ. металлургии, № 1, 1938.
9. А. И. Микulinский и П. В. Гельд. Отчеты УНИХИМ, Свердловск.
10. Вочке. Электрическая плавильная печь (перевод) ОНТИ, стр. 40, 1936.
11. С. И. Тельный. К вопросу о методике построения круговых диаграмм и электрических характеристик электрометаллургических установок. Научн. труды Днепр. мет. инст., вып. VII. Электрометаллургия, 1940.
12. С. И. Тельный. Построение характеристик дуговой электрической печи. Труды Уральск. инд. инст. Сборник, 22, 1945. Изв. Отд. техн. наук Академии наук СССР, № 3, 1946.
13. И. Т. Жердев. Высшие гармоники в электрической цепи, содержащей вольтовую дугу. Научн. труды Днепр. мет. инст., 1940.
14. И. Т. Жердев. Исследование дугового режима ферросплавных печей (диссертация).
15. Вочке. Электрическая плавильная печь (перевод). ОНТИ, стр. 78, 1936.
16. С. И. Тельный. Трансформаторная цепь электрометаллургической установки. Труды Уральск. инд. инст. Сборник, 22, 1945. Изв. ОН Академии наук СССР, № 2, 1946.
17. С. И. Тельный. Регулирование электрического режима работы дуговой электрической печи на основании круговых диаграмм и теории вольтовой дуги. Изв. ОН Академии наук СССР, № 6, 1945.
18. С. И. Тельный. Автоматическое регулирование трехфазных дуговых печей. Электричество, № 5, 1946.
19. Montgomery. A Method for the Control of Electric Arc Furnaces. Blast Furnace and Steel Plant, № 4, 1942.



# «Краевой эффект» в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом

Доктор техн. наук, проф. Г. И. ШТУРМАН и доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ

Харьковский электротехнический институт

Описание дополнительных явлений, возникающих в асинхронных машинах при наличии дуговых или плоских статоров, привело к формулировке группы задач, обобщающихся теорией индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом<sup>1</sup>. Аналитическое и экспериментальное исследование условий возбуждения магнитных полей дало количественные соотношения, характеризующие режим холостого хода. Последнее может служить основанием для перехода ко второй кардинальной задаче теории, заключающейся в принципиальной оценке процессов, связанных с нагрузкой индукционных машин, обладающих разомкнутым магнитопроводом. Анализ основных количественных связей, характеризующих указанные режимы, в первом приближении намечается произвести при изложенных ниже условиях.

Рассматривается установившееся движение после окончания периода ускорения, т. е.  $v = \text{const}$ . Изображенное на эскизе рис. 1 железо статора и бегуна полагается обладающим бесконечно большой магнитной проницаемостью, что делает возможным отдельный учет магнитных полей, возбуждаемых токами первичных и вторичных цепей. Проводимость окружающей машину среды за исключением зоны междужелезного пространства принимается равной нулю. Пространственное и временное распределение токов первичной цепи при их симметрии в фазах обмотки статора и отсутствии учета высших гармонических определяется уравнением бегущей волны:

$$i_1 = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} y\right) \frac{A}{\text{см}}, \quad (1)$$

Произведена принципиальная оценка электромагнитных процессов, связанных с режимами работы асинхронных двигателей при дуговых и плоских статорах. Установлены закономерности, определяющие токи вторичной цепи машины. В результате анализа развиваемых системой механических усилий выявлены пульсирующие во времени силы взаимодействия полей междужелезного пространства с токами первичных и вторичных цепей. Изменения электромеханических свойств асинхронного двигателя, возникающие в результате размыкания магнитной цепи, иллюстрируются данными расчетного примера.

где  $A_1$  обозначает линейную нагрузку и принимается положительной в направлении, перпендикулярном от наблюдателя к плоскости чертежа;  $t$  — время в сек;  $\tau$  — полюсное деление в см;  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  соответ-

ствует частоте сети;  $y$  — абсцисса неподвижной

системы координат с началом в точке  $O_1$ , расположенной в середине активной зоны машины (рис. 1).

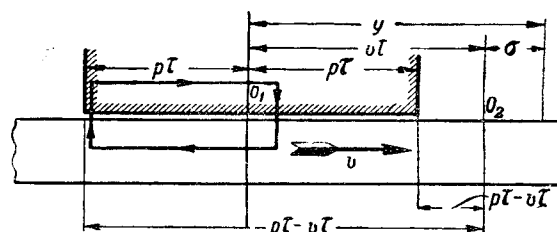


Рис. 1.

В соответствии с результатами исследования режима идеального холостого хода бегущая волна первичных токов возбуждает индукции междужелезного пространства:

$$B_1 = A_1 \frac{\Pi_0}{\delta} \frac{\tau}{\pi} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} y\right) \quad (2)$$

и потоки в сечениях ярма магнитной цепи:

$$\Phi_{\pi 1} = A_1 \frac{\Pi_0}{\delta} \frac{\tau^2}{\pi^2} \left[ \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} y\right) \mp \cos \omega t \right], \quad (3)$$

где  $\delta$  — воздушный промежуток в см;  $\Pi_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{\text{H}}{\text{см}} \right]$  — магнитная проводимость воздуха.

При этом положительные индукции зазора приняты направленными от бегуна к статору.

<sup>1</sup> Г. И. Штурман. Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом. Электричество, № 10, 1946.



Положительные значения индукций в сечениях ярма статора соответствуют положительному направлению оси абсцисс неподвижной системы координат; для сечений бегуна приняты обратные соотношения.

Тогда э. д. с. вторичных контуров машины при их движении со скоростью  $v = \frac{dy}{dt}$  в результате взаимной индукции с токами первичных цепей определяются выражением

$$e_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -\left(\frac{\partial\Phi_{21}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\Phi_{21}}{\partial t}\right) = A_1 x_0 \left[ s \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} y\right) \mp \sin \omega t \right] \frac{V}{\text{см}}, \quad (4)$$

где  $x_0 = \frac{\Pi_0}{\delta} \frac{\tau^2}{\pi^2} \omega \Omega$ ;  $v = \frac{dy}{dt} = (1-s) \frac{\tau}{\pi} \omega \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ ;

$s$  — скольжение. Верхний знак второго слагаемого соответствует четному числу пар полюсов, нижний — нечетному. Это примечание относится и ко всем последующим случаям применения двойных знаков. Для расчета токов и магнитной реакции вторичные цепи машины учитываются в виде самостоятельно замкнутых контуров, равномерно распределенных по всей длине бегуна. Последнее полностью справедливо в условиях цилиндрического конструктивного оформления асинхронных магнитофугальных двигателей с электролитическим покрытием поверхности бегуна слоем металла. В машинах с плоскими или дуговыми статорами подвижная часть может быть снабжена решеткой или нормальной беличьей клеткой. В этом случае независимая замкнутость контура тока для каждого из стержней клетки, находящихся в активной зоне машины, имеет место при бесконечно большой длине бегуна. Сопротивление всех параллельно включенных стержней, расположенных вне сферы влияния статора, оказывается тогда при отсутствии учета сопротивлений торцевых колец равным нулю; каждый же из „активных“ стержней с достаточным приближением может при этом рассматриваться замкнутым накоротко. Общие приемы приведения сопротивлений наряду с возможностями уточнений учета торцевых частей дают метод перехода от параметров обмотки, сконцентрированной в пазах, к эквивалентной ей равномерно распределенной на поверхности подвижной части машины.

Анализ процессов во вторичных цепях целесообразно ориентировать в расположенной на бегуне системе координат. Ее начало  $O_2$  (рис. 1) для  $t=0$  можно положить совпадающим с серединой активной зоны. Если обозначить через  $\sigma$  расстояние любой точки на поверхности бегуна от  $O_2$ , то можно воспользоваться следующим соотношением для перехода от  $O_1$  к  $O_2$ :

$$y = \sigma + vt = \sigma + (1-s) \frac{\tau}{\pi} \omega t. \quad (5)$$

Выражение (4) для э. д. с. взаимной индукции в новой системе координат:

$$e_{21} = A_1 x_0 \left[ s \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) \mp \sin \omega t \right]. \quad (6)$$

В любой момент времени для всех вторичных контуров, расположенных в промежутке от  $\sigma = p\tau - vt$  до  $\sigma = -p\tau - vt$ , имеет место уравнение Кирхгофа в следующем виде:

$$ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{-p\tau-vt}^{\sigma} B d\sigma = A_1 x_0 \left[ s \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) \mp \sin \omega t \right] \frac{V}{\text{см}}, \quad (7)$$

где  $i = f_1(\sigma, t)$  — подлежащие определению токи вторичных цепей;

$B = f_2(\sigma, t)$  — индукции поля реакции, возбужденные токами  $i$  в между-железном пространстве;

$r$  и  $L$  — омическое сопротивление и коэффициент самоиндукции на 1 см длины распределенных вторичных цепей.

Связь между  $i$  и  $B$  может быть установлена уравнением обхода по контуру, изображенному на рис. 1:

$$B_n \frac{\delta}{\Pi_0} - B \frac{\delta}{\Pi_0} = \int_{-p\tau-vt}^{\sigma} i d\sigma, \quad (8)$$

где  $B_n$  — индукция у левого края активной зоны. Искомое соотношение получаем из уравнения (8) путем дифференцирования по  $\sigma$ :

$$i = -\frac{\delta}{\Pi_0} \frac{\partial B}{\partial \sigma}. \quad (9)$$

Подстановка в уравнение (7) этого значения  $i$ , введение обозначений  $\frac{L}{r} = T \text{ сек}$  и  $\frac{\Pi_0}{\delta r} = P \frac{\text{сек}}{\text{см}^2}$  и дифференцирование по  $\sigma$  приводят уравнение к виду:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial \sigma^2} + T \frac{\partial^2 B}{\partial \sigma^2 \partial t} - P \frac{\partial B}{\partial t} = A_1 P \frac{\pi}{\tau} s \cdot x_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right). \quad (10)$$

Полный интеграл (10) равен:

$$B = -A_1 \frac{\Pi_0}{\delta} \cdot \frac{\tau}{\pi} \frac{s \cdot x_0}{\sqrt{r^2 + s^2(x+x_0)^2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma - \psi\right) + \sum_{k=1}^{k=n} (C_{k1} e^{\gamma_k \sigma} + C_{k2} e^{-\gamma_k \sigma}) e^{\lambda_k t}. \quad (11)$$

В (11) первый член представляет частный интеграл, а второй общий интеграл левой части (10), определенный методом Фурье; их сумма дает полный интеграл.



Постоянные  $\lambda_k$  и  $\gamma_k$  связаны соотношением

$$\frac{1}{\lambda_k} + T - \frac{P}{\gamma_k^2} = 0. \quad (12)$$

Подстановка частного интеграла в (10) определяет:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{s(x+x_0)}{r}. \quad (13)$$

Далее подлежат вычислению  $3n$  постоянных  $\lambda_k$ ,  $C_{k1}$ ,  $C_{k2}$ . Решение (11) может содержать сумму конечного или бесконечного числа произведений. Число их  $n$  зависит от характера связей. Число отличных друг от друга решений  $\lambda$  и  $\gamma$  определит величину  $n$ .

Подстановка решения (11) в исходное интегро-дифференциальное уравнение и условие получения тождества создает  $n$  связей; то же количество связей вытекает из условия равенства нулю потока реакции, просуммированного по всей длине воздушного зазора машины и, наконец, надо учесть, что при наличии самоиндукции ток во входящем контуре бегуна ( $\sigma = -p\tau - v\tau$ ) равен нулю. Третье условие также дает  $n$  связей и завершает определение системы.

Первая группа связей удовлетворяется при любом значении  $t$  лишь при соблюдении следующих условий

$$\lambda_k + v\gamma_k = \pm j\omega \text{ и } C_{k1} = 0 \quad (14)$$

или

$$\lambda_k - v\gamma_k = \pm j\omega \text{ и } C_{k2} = 0. \quad (15)$$

Исключение  $\lambda_k$  из (14) или (15) и (12) приводит к уравнению третьей степени относительно  $\gamma$  и дает три решения для знака  $+$  и три им сопряженные для знака  $-$  перед  $j$ . Таким образом, приходим к выражению для тока:

$$i = -\frac{\delta}{\Pi_0} \frac{\partial B}{\partial \sigma} = A_1 \frac{s x_0}{\sqrt{r^2 + s^2(x+x_0)^2}} \sin\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma - \psi\right) - \frac{\delta}{\Pi_0} \sum_{k=1}^{k=3} \gamma_k (C_{k1} e^{\gamma_k \sigma} - C_{k2} e^{-\gamma_k \sigma}) e^{\lambda_k t} = i_2 + i_0. \quad (16)$$

Первое слагаемое  $i_2$  в уравнении (16) представляет собой бегущую волну, определяемую обычным соотношением для нормальных асинхронных машин, а вторая часть, обозначенная  $i_0$ , обуславливается размыканием магнитной цепи и появляется в результате своеобразия условий возбуждения магнитных полей и переменного состава вторичных контуров, расположенных в активной зоне машины.

После доказательства этого положения представляется целесообразным ориентировать все подлежащие определению количественные связи по отношению к результирующему синусоидальному полю междужелезного пространства, возбуждаемому суммарным воздействием бегущих волн токов  $i_1$  и  $i_2$  [формулы (1) и (16)], или намагничивающей составляющей тока первичной цепи машины.

Так как поток одного полюса в междужелезном пространстве на 1 см длины, соответствующий синусоидальной волне индукций, равен:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_\delta \tau = 2 A_0 \frac{\Pi_0}{\delta} \frac{\tau^2}{\pi^2} = 2 A_0 \frac{x_0}{\omega}, \quad (17)$$

то намагничивающая составляющая тока первичной цепи машины выразится

$$i_0 = A_0 \cos\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) = \frac{\Phi}{2} \frac{\omega}{x_0} \cos\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) \quad (18)$$

и, соответственно, бегущая волна индукции:

$$B_\delta = A_0 \frac{\Pi_0}{\delta} \frac{\tau}{\pi} \sin\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) = \frac{\Phi}{2} \frac{\pi}{\tau} \sin\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right). \quad (19)$$

Ток первичной цепи определится как разность намагничивающего тока  $i_0$  и тока  $i_2$ :

$$i_1 = i_0 - i_2 = \frac{\Phi}{2} \frac{\omega}{x_0} \cos\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma\right) - \frac{\Phi}{2} \frac{s\omega}{\sqrt{r^2 + s^2 x^2}} \sin\left(s\omega t - \frac{\pi}{\tau} \sigma - \varphi\right), \quad (20)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{s\lambda}{r}$ .

В результате подстановки общего интеграла типа (11), но определенного при новых условиях, в исходное в интегро-дифференциальное уравнение приходим к связи, характеризующей дополнительные токи вторичной цепи и возбужденные ими индукции в междужелезном пространстве:

$$\sum_{k=1}^{k=3} \left[ C_{k1} \left( \frac{\lambda_k}{\gamma_k} - v \right) e^{-p\tau\gamma_k} e^{(\lambda_k - v\gamma_k)t} - C_{k2} \left( \frac{\lambda_k}{\gamma_k} + v \right) e^{p\tau\gamma_k} e^{(\lambda_k + v\gamma_k)t} \right] = \pm \frac{\Phi}{2} \omega \sin \omega t = \mp \frac{\Phi}{4} j \omega (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}). \quad (21)$$

Полученный результат позволяет представить выражение для дополнительной индукции междужелезного пространства и дополнительных токов во вторичных цепях суммами из шести слагаемых:

$$B_\delta = \sum_{k=1}^{k=3} \left[ C_k e^{-\gamma_k \sigma} e^{(j\omega - v\gamma_k)t} + \hat{C}_k e^{-\hat{\gamma}_k \sigma} e^{(-j\omega - v\gamma_k)t} \right], \quad (22)$$

$$i_g = -\frac{\delta}{\Pi_0} \frac{\partial B_g}{\partial \sigma} = \frac{\sigma}{\Pi_0} \sum_{k=1}^{k=3} \left[ \gamma_k C_k e^{-\gamma_k \sigma} e^{(j\omega - v\gamma_k)t} + \hat{\gamma}_k \hat{C}_k e^{-\hat{\gamma}_k \sigma} e^{(-j\omega - v\gamma_k)t} \right]. \quad (23)$$

Механические усилия в системе определяются в неподвижной системе координат  $O_1$ . Индукции междужелезного пространства согласно формулам (19) и (22), преобразованным по соотношению (5), характеризуются следующим выражением:

$$B_{\delta} + B_{\partial} = -\frac{\Phi}{4} \frac{\pi}{\tau} \left( j e^{-\frac{j\pi}{\tau} y} \cdot e^{j\omega t} - j e^{j\frac{\pi}{\tau} y} \cdot e^{-j\omega t} \right) + \sum_{k=1}^{k=3} \left[ C_k e^{-\gamma_k y} e^{j\omega t} + \hat{C}_k e^{-\hat{\gamma}_k y} e^{-j\omega t} \right]. \quad (24)$$

Токи вторичных цепей в соответствии с (20) и (23):

$$i_2 + i_{\partial} = -\frac{\Phi}{4} j\omega s \left( \frac{e^{-j\frac{\pi}{\tau} y}}{r + jxs} e^{j\omega t} - \frac{e^{j\frac{\pi}{\tau} y}}{r - jxs} e^{-j\omega t} \right) + \frac{\delta}{\Pi_0} \sum_{k=1}^{k=3} [\gamma_k C_k e^{-\gamma_k y} e^{j\omega t} + \hat{\gamma}_k \hat{C}_k e^{-\hat{\gamma}_k y} e^{-j\omega t}]. \quad (25)$$

Кроме того, подлежит учету величина, обратная намагничивающей составляющей тока первичной цепи машины:

$$-i_0 = \frac{\Phi}{4} \frac{\omega}{x_0} \left( e^{-j\frac{\pi}{\tau} y} e^{j\omega t} + e^{j\frac{\pi}{\tau} y} e^{-j\omega t} \right). \quad (18')$$

Суммарное усилие, образующееся взаимодействием индукций междужелезного пространства с токами первичных и вторичных цепей машины, выражается в синхронных ваттах следующим соотношением:

$$F = F_{\delta 2} + F_{\partial 0} + F_{\partial 2} + F_{\partial \partial} = \frac{\tau}{\pi} \omega \left[ \int_{-p\tau}^{p\tau} B_{\delta} i_2 dy + \int_{-p\tau}^{p\tau} B_{\partial} (i_2 + i_0 + i_{\partial}) dy \right]. \quad (26)$$

При этом можно отметить, что расчет усилий по дополнительным индукциям  $B_{\partial}$  и намагничивающим токам первичной цепи  $i_0$  [ $F_{\partial 0}$  в (26)] охватывает учет взаимодействия бегущего поля  $B_{\delta}$  с дополнительными токами  $i_{\partial}$  во вторичных контурах. Первое слагаемое правой части (26) после подстановки соответствующих

значений и интегрирования приводит к обычному для асинхронных машин соотношению.

Принципиально иной итог дают аналогичные операции с остальными слагаемыми (26). Каждая из рассматриваемых величин может быть представлена двумя составляющими. Одна из них характеризует независимое от времени постоянное усилие. Вторая показывает наличие пульсирующих сил, обладающих независимо от скорости движения двойным числом периодов (по сравнению с частотой первичной цепи машины). Суммируя результаты интегрирования, можно получить выражение для результирующего постоянного усилия:

$$F = F_{\delta 2} + F_{\partial 0} + F_{\partial 2} + F_{\partial \partial} = \frac{\Phi^2}{4} \frac{p \tau r s}{r^2 + x^2 s^2} \omega^2 \pm \pm \Phi \frac{\tau}{\pi} \omega^2 \text{Real} \left( \frac{js}{r - jxs} - \frac{1}{x_0} \right) \sum_{k=1}^{k=3} C_k \frac{\text{sh}(p \tau \gamma_k)}{\gamma_k - j\frac{\pi}{\tau}} + + \frac{\delta}{\Pi_0} \frac{\tau}{\pi} \omega \sum_{k=1}^{k=3} \sum_{h=1}^{h=3} C_k \hat{C}_h [e^{p \tau (\gamma_k + \hat{\gamma}_h)} - e^{-p \tau (\gamma_k + \hat{\gamma}_h)}] W/\text{cm}. \quad (27)$$

Одновременно амплитуду суммарного пульсирующего усилия представляется возможным учесть величиной модуля следующего соотношения:

$$F = \left| \frac{\delta}{\Pi_0} \frac{\tau}{\pi} \omega \left[ \left( \sum_{k=1}^{k=3} C_k e^{p \tau \gamma_k} \right)^2 - \left( \sum_{k=1}^{k=3} C_k e^{-p \tau \gamma_k} \right)^2 \right] \pm \Phi \frac{\tau}{\pi} \omega^2 \left( \frac{1}{x_0} + \frac{js}{r + jxs} \right) \sum_{k=1}^{k=3} \frac{\text{sh}(p \tau \gamma_k)}{\gamma_k + j\frac{\pi}{\tau}} \right| W/\text{cm}. \quad (28)$$

Таким образом, принципиальная оценка рабочих режимов индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом привела к выявлению особенностей в самом процессе преобразования электрической энергии в механическую. Размыкание магнитной цепи нормального асинхронного двигателя создало предпосылки к качественным и количественным изменениям условий образования механических усилий, развиваемых системой. Индукционная машина в ее обычном конструктивном оформлении обладает механической характеристикой, определяемой первым слагаемым в (27). Краевой эффект при дуговых или плоских статорах вносит в электромеханические свойства машины коррективы, оцениваемые двумя последними составляющими выражения (27), и определяет пульсирующий

характер дополнительных усилий, оцениваемый соотношением (28).

Не менее важным вопросом в оценке технико-экономических показателей машин с разомкнутым магнитопроводом является решение задачи о величине джоулевых потерь во вторичных цепях.

В условиях, описанных ранее исходных предположений, размыкание магнитной цепи не отражается на характере и значении джоулевых потерь в первичных цепях. Основным фактором, определяющим изменения в процессе образования аналогичных потерь во вторичных контурах, является наличие системы дополнительных токов.

Общее выражение (25) позволяет следующим образом характеризовать пространственное распределение средних за период значений квадратов вторичного тока:

$$\begin{aligned}
 t = \frac{2\pi}{\omega} \\
 i_{2cp}^2 = \frac{\omega}{2\pi} \int_{t=0}^{\frac{\omega}{s}} (i_2 + i_d)^2 dt = \frac{\Phi^2 \omega^2}{8} \frac{s^2}{r^2 + x^2 s^2} + \\
 + \Phi \omega s \frac{\delta}{\Pi_0} \operatorname{Re} \sum_{k=1}^{k=3} C_k \frac{j \gamma_k}{r - j x s} e^{-\left(\gamma_k - j \frac{\Pi}{\tau}\right) y} + \\
 + 2 \frac{\delta^2}{\Pi_0^2} \sum_{k=1}^{k=3} \sum_{h=1}^{h=3} C_k \hat{C}_h \gamma_k \hat{\gamma}_h e^{-(\gamma_k + \hat{\gamma}_h) y}, \quad (29)
 \end{aligned}$$

откуда величина джоулевых потерь во всех вторичных контурах, находящихся в активной зоне машины:

$$\begin{aligned}
 W = r \int_{-p\tau}^{p\tau} i_{2cp}^2 dy = \frac{\Phi^2 \omega^2}{4} \frac{r}{\left(\frac{r}{s}\right)^2 + x^2} p\tau \pm \\
 \pm 2 \Phi \omega \frac{\delta}{\Pi_0} \operatorname{Re} \frac{j s r}{r - j x s} \sum_{k=1}^{k=3} C_k \frac{\gamma_k}{\gamma_k - j \frac{\pi}{\tau}} \operatorname{sh}(p\tau \gamma_k) + \\
 + 4 \frac{\delta^2}{\Pi_0^2} r \sum_{k=1}^{k=3} \sum_{h=1}^{h=3} C_k \hat{C}_h \frac{\gamma_k \hat{\gamma}_h}{\gamma_k + \hat{\gamma}_h} \operatorname{sh}(p\tau \gamma_k + p\tau \hat{\gamma}_h). \quad (30)
 \end{aligned}$$

Здесь, так же как и ранее, первое слагаемое дает джоулевы потери, возникающие при прочих равных условиях в нормальном конструктивном оформлении асинхронной машины. Две остальные компоненты выражения (30) представляют оценку краевого эффекта. Количественная оценка этих явлений ориентирует в основных особенностях асинхронных двигателей с дуговыми и плоскими статорами.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Порядок изменений электрохимических свойств нормальной индукционной машины, возникающих в результате размыкания магнитной системы, иллюстрирует рис. 2. С целью получения данных для построения изображенных

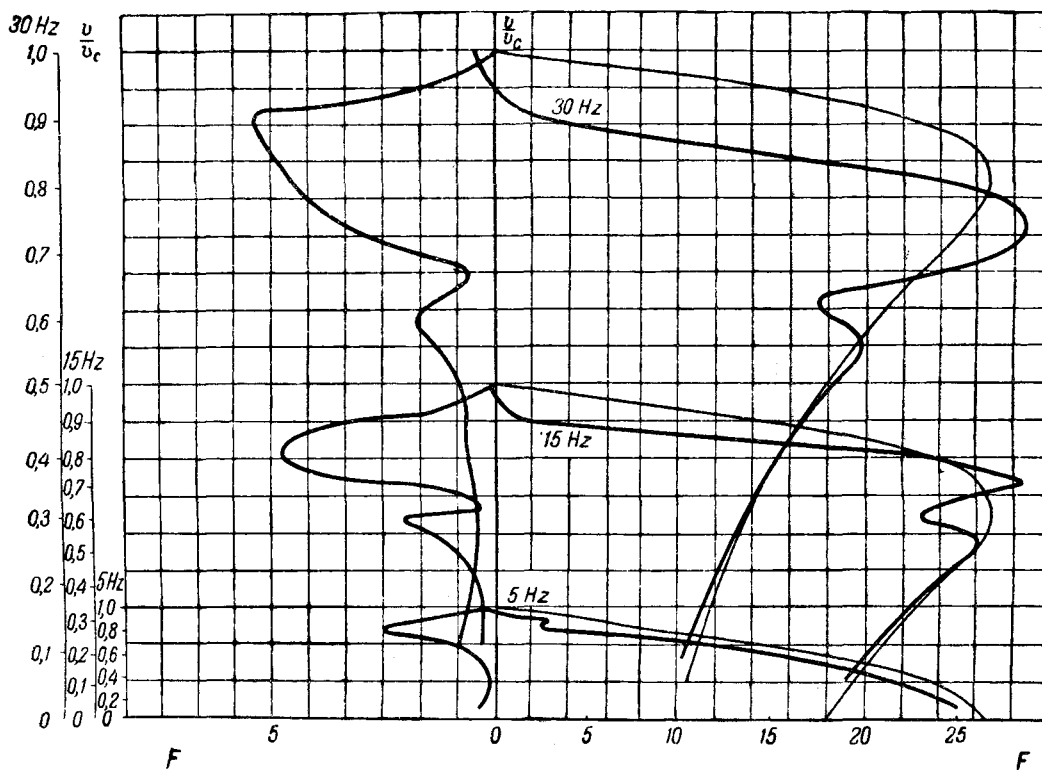


Рис. 2.

на рис. 2 характеристик была произведена группа расчетов, базировавшихся на применении установленных ранее соотношений к следующим численным значениям:

$$v = 2; \tau = 14,15 \text{ см}, \delta = 16 \cdot 10^{-2} \text{ см},$$

$$r = 1,9 \cdot 10^{-6} \Omega, L = 5,32 \cdot 10^{-8} \text{ Н},$$

$$T = \frac{L}{r} 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ сек.}, P = \frac{\Pi_0}{\delta r} = 4,15 \cdot 10^{-2} \text{ сек/см}^2.$$

Постоянные во времени усилия, развиваемые машиной при разных скоростях движения, определялись в соответствии с уравнением (27) для трех значений частоты первичной цепи:  $f = 30 \div 15 \div 5 \text{ Нз}$ .

Амплитудные значения усилий, пульсирующих с двойной частотой, устанавливались для тех же условий по модулю выражения (28).

Постоянные или, точнее, средние за время одного периода величины усилий отложены в правой части оси абсцисс рис. 2. Амплитуды накладывающихся на них колебаний представлены в удвоенном масштабе слева от оси ординат. Скорости движения отложены в относительных единицах. Все расчеты проводились для одних и тех же значений потоков  $\Phi$  междужелезного пространства, определяемых результирующей бегущей волной индукции  $B_z$ . Значения усилий показаны в некоторых условных

единицах. Поскольку основной практический интерес связан в данном случае с количественной оценкой изменений обычных свойств машины, для каждой из указанных частот на рис. 2 тонкими линиями в тех же единицах нанесены величины, определяемые первым членом уравнения (27).

Сопоставление нормальных механических характеристик машины с подвергнутыми корректировке позволяет сделать ряд выводов. Одним из основных является, что скорости идеального холостого хода не совпадают со скоростями движения бегущих волн м. д. с. и индукций. Последствия краевого эффекта вообще в значительно большей мере проявляются в зоне рабочих режимов, связанных с малыми скольжениями.

Амплитуды пульсирующих усилий при  $s < 0,2$  местами превосходят средние значения. Переход к пониженным частотам первичной цепи обуславливает ряд дополнительных изменений механических свойств машины. Последнее, как известно, не должно иметь места в нормальных асинхронных двигателях при соблюдении условия о постоянстве потока.

Для приведенных выше численных значений был произведен расчет джоулевых потерь во вторичных цепях, расположенных в активной зоне машины; при этом добавочные потери, оцениваемые двумя последними слагаемыми выражения (30), оказались при больших скольжениях незначительными по сравнению с первым членом. Относительная их величина при малых скольжениях делается весьма существенной.



### О схемах замещения электрических цепей с магнитной связью

Кандидат техн. наук П. А. ИОНКИН

Московский энергетический институт им. Молотова

В огромном большинстве случаев, встречающихся в практике, можно значительно упростить расчет и исследование сложных электрических цепей с магнитной связью, представив их в виде схем замещения без магнитной связи. В работе изложены некоторые положения, касающиеся подбора параметров схем замещения с реальными токами. Если токи во всех ветвях схем замещения должны иметь реальные значения, то электрические соединения ветвей в этих схемах должны повторять собой электрические соединения ветвей заданных реальных схем.

Пользуясь законами Кирхгофа, установим некоторые признаки, по которым можно судить о возможности получения схем замещения.

Пусть электрическая цепь произвольной конфигурации содержит  $m$  узлов и  $n$  ветвей с синусоидальными э. д. с. одинаковой частоты с параметрами, не зависящими от токов, при этом каждая из  $n$  ветвей имеет магнитную связь с остальными ветвями. Для такой цепи можно написать  $(m-1)$  независимых уравнений на основании первого закона Кирхгофа и  $(n-m+1)$  независимых уравнений на основании второго закона Кирхгофа. Если  $k$ -й контур содержит  $q$  ветвей, то на основании второго закона Кирхгофа можно написать уравнение баланса напряжений для этого контура с  $n$  членами, из которых  $q$  членов определяют падение напряжения в  $k$ -ом контуре, обусловленное токами, протекающими в различных ветвях этого контура. Остальные члены в количестве  $n-q$  определяют падение напряжения в рассматриваемом контуре, обусловленное токами в тех ветвях, которые связаны только магнитно с ветвями  $k$ -го контура.

В некоторых случаях, пользуясь первым законом Кирхгофа, можно заменить токи магнитно-связанных ветвей токами ветвей  $k$ -го контура, причем такая замена возможна только для того уравнения, для которого число заменяемых токов меньше или равно числу уравнений, написанных на основании первого закона Кирхгофа, т. е.

$$(n-q) \leq (m-1). \quad (1)$$

Максимальное число заменяемых токов будет в том уравнении, которое написано для контура с минимальным числом ветвей. Заменяв токи ветвей, связанных с данным контуром только магнитно, во всех независимых уравнениях, составленных по второму закону Кирхгофа, токами ветвей, входящих в данный контур, получим новую систему уравнений. Этим уравнениям должна удовлетворять электрическая цепь без магнитной связи, но прежней конфигурации, так как полученная система остается инвариантной в отношении токов ветвей, входящих в соответствующие контуры. Реактивные сопротивления этих ветвей будут иметь новые значения.

В порядке пояснения отмеченных положений рассмотрим электрическую цепь, показанную на рис. 1. Чтобы не затемнять чертежа, взаимные индуктивности показаны на рис. 1 не для всех ветвей. Пользуясь вторым законом Кирхгофа, напишем уравнения для контуров  $a, b, c, d, f, b$  и  $f, g, c$ , соответственно в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = & [Z_{aa} + j(x_{ba} + x_{ca})] \dot{I}_a + [Z_{bb} + \\ & + j(x_{ab} + x_{cb})] \dot{I}_b + [Z_{cc} + j(x_{ac} + x_{bc})] \dot{I}_c + \\ & + j(x_{ad} + x_{bd} + x_{cd}) \dot{I}_d + j(x_{af} + x_{bf} + x_{cf}) \dot{I}_f + \\ & + j(x_{ag} + x_{bg} + x_{cg}) \dot{I}_g; \\ \dot{E}_d - \dot{E}_f - \dot{E}_b = & [Z_{dd} - j(x_{bd} + x_{fd})] \dot{I}_d - \\ & - [Z_{ff} + j(x_{bf} - x_{df})] \dot{I}_f - [Z_{bb} + j(x_{fb} - x_{db})] \dot{I}_b + \\ & + j(x_{da} - x_{fa} - x_{ba}) \dot{I}_a + j(x_{de} - x_{fc} - x_{bc}) \dot{I}_c + \\ & + j(x_{dg} - x_{fg} - x_{bg}) \dot{I}_g \end{aligned} \quad (2)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{E}_f - \dot{E}_g - \dot{E}_c = & [Z_{ff} - j(x_{cf} + x_{gf})] \dot{I}_f - [Z_{gg} + \\ & + j(x_{cg} - x_{fg})] \dot{I}_g - [Z_{cc} + j(x_{gc} - x_{fc})] \dot{I}_c + \\ & + j(x_{fa} - x_{ga} - x_{ca}) \dot{I}_a + j(x_{fb} - x_{gb} - x_{cb}) \dot{I}_b + \\ & + j(x_{fd} - x_{gd} - x_{cd}) \dot{I}_d \end{aligned}$$

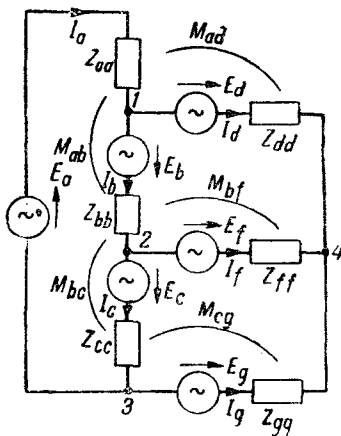


Рис. 1.

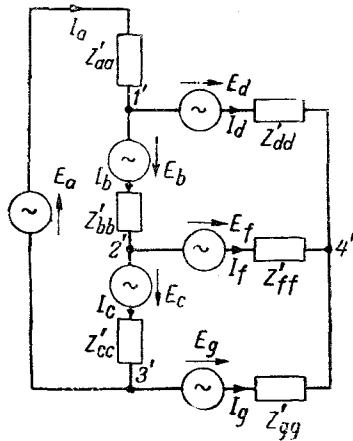


Рис. 2.

Из уравнений (2) и из схемы, показанной на рис. 1, следует, что число заменяемых токов во всех уравнениях удовлетворяет формуле (1), так как  $(6-3) = (4-1)$ . Исключив из уравнений (2) токи тех ветвей, которые связаны только магнитно с ветвями соответствующих контуров, получим:

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = Z'_{aa} \dot{I}_a + Z'_{bb} \dot{I}_b + Z'_{cc} \dot{I}_c$$

$$\dot{E}_d - \dot{E}_f - \dot{E}_b = Z'_{dd} \dot{I}_d - Z'_{ff} \dot{I}_f - Z'_{bb} \dot{I}_b$$

и

$$\dot{E}_f - \dot{E}_g - \dot{E}_c = Z'_{ff} \dot{I}_f - Z'_{gg} \dot{I}_g - Z'_{cc} \dot{I}_c$$

где

$$\begin{aligned} Z'_{aa} &= Z_{aa} + j(x_{ba} + x_{ca} + x_{ad} + x_{bd} + x_{cd} - \\ &- x_{ag} - x_{bg} - x_{cg}); Z'_{bb} = Z_{bb} + j(x_{ab} + x_{cb} + x_{af} + \\ &+ x_{bf} + x_{cf} - x_{ad} - x_{bd} - x_{cd}); Z'_{cc} = Z_{cc} + j(x_{ac} + \text{и т. д.}); \\ Z'_{dd} &= Z_{dd} + j(x_{da} + x_{fg} + x_{bg} - x_{fd} - x_{bd} - \\ &- x_{fa} - x_{ba} - x_{dg}) \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнениям (3) удовлетворяет электрическая схема замещения, показанная на рис. 2.

В предлагаемых схемах замещения не обусловлена неизменность напряжений на ветвях, в чем легко убедиться путем сравнения напряжений на соответствующих ветвях заданной схемы и схемы замещения.

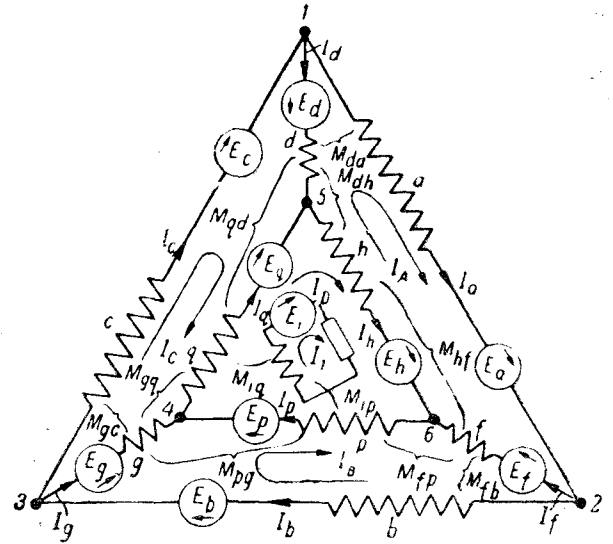


Рис. 3.

На рис. 3 изображена электрическая цепь с магнитной связью между всеми девятью ветвями 1, для которой нельзя подобрать параметры схемы замещения, сохраняя неизменной конфигурацию основной схемы. Действительно, не учитывая влияния контура с током  $I_1$  и пользуясь вторым законом Кирхгофа, напишем уравнения для контуров  $a f h d$ ,  $b g p f$ ,  $c d q g$  и  $q h p$  в следующем виде:

Для контура  $a, f, h, d$

$$\begin{aligned} \dot{E}_a + \dot{E}_f - \dot{E}_h - \dot{E}_d &= Z_{Aa} \dot{I}_a + Z_{Af} \dot{I}_f - Z_{Ah} \dot{I}_h - \\ &- Z_{Ad} \dot{I}_d + Z_{Ab} \dot{I}_b + Z_{Ac} \dot{I}_c + Z_{Ag} \dot{I}_g + Z_{Ap} \dot{I}_p + Z_{Aq} \dot{I}_q, \end{aligned}$$

где

$$Z_{Aa} = Z_{aa} + j(x_{fa} - x_{ha} - x_{da});$$

$$Z_{Af} = Z_{ff} + j(x_{af} - x_{hf} - x_{df});$$

и

$$Z_{Aq} = j(x_{aq} + x_{fq} - x_{hq} - x_{dq}) \text{ и т. д.}$$

Аналогично для остальных контуров, в частности для контура  $q, h, p$ , имеем:

$$\begin{aligned} \dot{E}_h + \dot{E}_p + \dot{E}_q &= Z_{Dh} \dot{I}_h + Z_{Dp} \dot{I}_p + Z_{Dq} \dot{I}_q + Z_{Da} \dot{I}_a + \\ &+ Z_{Db} \dot{I}_b + Z_{Dc} \dot{I}_c + Z_{Dd} \dot{I}_d + Z_{Df} \dot{I}_f + Z_{Dg} \dot{I}_g. \end{aligned}$$

Число заменяемых токов в уравнениях для контура  $a, f, h, d$  и для других аналогичных контуров удовлетворяет формуле (1), так как  $(9-4) = (6-1)$ , тогда как число токов, которые надо исключить из уравнения для контура  $q, h, p$ , не удовлетворяет уравнению (1).

В некоторых случаях можно подобрать параметры схем замещения для указанного типа электрических цепей с магнитной связью, если исключить из них те контурные токи, которые замыкаются по ветвям контуров с незаменяемыми токами, при числе ветвей в этих контурах, не большем трех.

<sup>1</sup> Влияние контура с током  $I_1$  учтем в дальнейшем.

Чтобы пояснить это положение, заменим в уравнениях, написанных для схемы рис. 3, токи ветвей контурными токами  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  и  $\dot{I}_D$ . В результате получим:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{AA} &= \dot{Z}_{AA}\dot{I}_A + \dot{Z}_{AB}\dot{I}_B + \dot{Z}_{AC}\dot{I}_C + \dot{Z}_{AD}\dot{I}_D, \\ \dot{E}_{BB} &= \dot{Z}_{BA}\dot{I}_A + \dot{Z}_{BB}\dot{I}_B + \dot{Z}_{BC}\dot{I}_C + \dot{Z}_{BD}\dot{I}_D, \\ \dot{E}_{CC} &= \dot{Z}_{CA}\dot{I}_A + \dot{Z}_{CB}\dot{I}_B + \dot{Z}_{CC}\dot{I}_C + \dot{Z}_{CD}\dot{I}_D.\end{aligned}\quad (4)$$

и

$$\dot{E}_{DD} = \dot{Z}_{DA}\dot{I}_A + \dot{Z}_{DB}\dot{I}_B + \dot{Z}_{DC}\dot{I}_C + \dot{Z}_{DD}\dot{I}_D,$$

где

$$\begin{aligned}Z_{AA} &= [Z_{aa} + Z_{ff} + Z_{hh} + Z_{dd} + 2j(x_{af} + x_{dh} - \\ &\quad - x_{ah} - x_{ad} - x_{fh} - x_{df})]; \\ Z_{AB} &= Z_{BA} = -[Z_{ff} + j(x_{af} + x_{hb} + x_{db} + x_{hg} + \\ &\quad + x_{dg} + x_{ap} + x_{fp} - x_{hf} - x_{df} - x_{ab} - x_{fb} - x_{ag} - \\ &\quad - x_{fg} - x_{hp} - x_{dp})] \text{ и т. д.}\end{aligned}$$

Определив ток  $\dot{I}_D$  из последнего уравнения (4) и подставив его значение в остальные, после обратной замены контурных токов токами ветвей, оставшихся в схеме, получим:

$$\begin{aligned}\dot{E}'_a + \dot{E}_f - \dot{E}_d + \dot{E}_{hp} - \dot{E}_{qh} &= \dot{Z}'_{AA}\dot{I}_a - \dot{Z}_{AB}\dot{I}_f + \\ &+ \frac{\dot{Z}_{DB}\dot{Z}_{AD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_f + \dot{Z}_{CA}\dot{I}_d - \frac{\dot{Z}_{DA}\dot{Z}_{CD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_d, \\ \dot{E}'_b + \dot{E}_g - \dot{E}_f + \dot{E}_{pq} - \dot{E}_{hp} &= \dot{Z}'_{BB}\dot{I}_b - \dot{Z}_{BC}\dot{I}_g + \\ &+ \frac{\dot{Z}_{DC}\dot{Z}_{BD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_g + \dot{Z}_{AB}\dot{I}_f - \frac{\dot{Z}_{DB}\dot{Z}_{AD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_f, \\ \dot{E}'_c + \dot{E}_d - \dot{E}_g + \dot{E}_{qh} - \dot{E}_{pq} &= \dot{Z}'_{CC}\dot{I}_c - \dot{Z}_{CA}\dot{I}_d + \\ &+ \frac{\dot{Z}_{DA}\dot{Z}_{CD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_d + \dot{Z}_{BC}\dot{I}_g - \frac{\dot{Z}_{DC}\dot{Z}_{BD}}{\dot{Z}_{DD}}\dot{I}_g,\end{aligned}\quad (5)$$

$$\text{где } \dot{E}'_a = \dot{E}_a - \frac{\dot{E}_h}{\dot{Z}_{DD}}j(x_{Da} + x_{Db} + x_{Dc});$$

аналогично определяется  $\dot{E}'_b$  и  $\dot{E}'_c$ ,

$$\dot{E}_{pq} = \frac{\dot{E}_p\dot{Z}_{DC} - \dot{E}_q\dot{Z}_{BD}}{\dot{Z}_{DD}},$$

$$\dot{E}_{hp} = \frac{\dot{E}_h\dot{Z}_{DB} - \dot{E}_p\dot{Z}_{AD}}{\dot{Z}_{DD}},$$

$$\dot{E}_{qh} = \frac{\dot{E}_q\dot{Z}_{DA} - \dot{E}_h\dot{Z}_{CD}}{\dot{Z}_{DD}},$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}'_{AA} &= \dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{AC} + \dot{Z}_{AD} - \frac{\dot{Z}_{AD}}{\dot{Z}_{DD}}j \times \\ &\times (x_{Da} + x_{Db} + x_{Dc});\end{aligned}$$

аналогично  $\dot{Z}'_{AA}$  определяются  $\dot{Z}'_{BB}$  и  $\dot{Z}'_{CC}$ , кроме того

$$x_{Da} = x_{qa} + x_{ha} + x_{pa},$$

$$x_{Db} = x_{qb} + x_{hb} + x_{pb} \text{ и } x_{Dc} = x_{qc} + x_{hc} + x_{pc}.$$

Уравнениям (5) удовлетворяет схема замещения, показанная на рис. 4, где токи в ветвях имеют реальные значения.

Следует отметить, что исключение контура с током  $\dot{I}_D$  дало возможность получить формулы

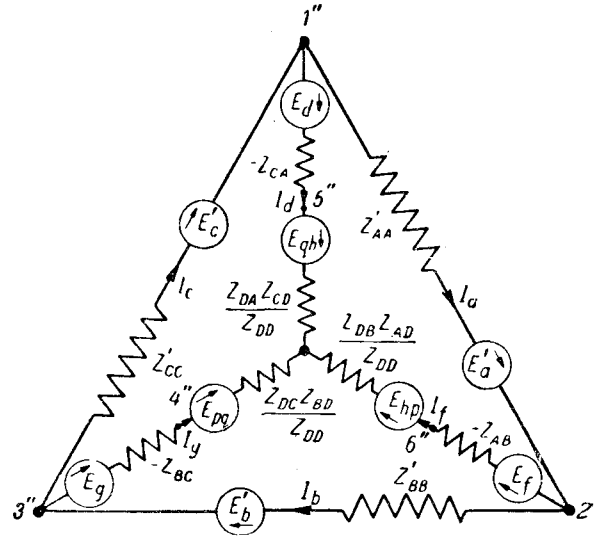


Рис. 4.

преобразования треугольника э. д. с. и при наличии магнитной связи в эквивалентную звезду.

Необходимо подчеркнуть, что при исключении контуров с незаменяемыми токами, в общем случае, происходят изменения активных и реактивных сопротивлений ветвей, а также суммарной активной мощности источников тока и, соответственно, потерь в рассматриваемой системе.

Полученные нами выводы в отношении подбора параметров схем замещения с реальными токами можно распространить и на такие цепи, в которых имеются электрически изолированные контуры, ветви которых имеют магнитную связь. Конфигурация схем замещения с реальными токами для подобных электрических цепей определяется конфигурацией исходных систем, причем как токи электрически изолированных магнитно-связанных контуров, так и токи контуров с незаменяемыми токами должны быть исключены из уравнений, написанных на основании второго закона Кирхгофа. Для таких электромагнитных систем можно рекомендовать следующий порядок определения параметров схем замещения.

Сначала исключают токи контуров, электрически изолированных от основной цепи, число этих контуров может быть любым. Затем исключают те контурные токи, которые замыкаются по ветвям контуров с незаменяемыми токами с числом ветвей не большим трех. Если оставшиеся ветви образуют контуры с заменяемыми токами, то полученной системе уравнений будет удовлетворять схема замещения с реальными токами.

Для иллюстрации последнего положения рассмотрим схему рис. 3 с учетом влияния тока  $\dot{I}_1$  электрически изолированного контура.

Пользуясь методом контурных токов, напишем для рассматриваемой схемы уравнения в следующем виде: для контура  $a f h d$

$$\dot{E}_{AA} = \dot{Z}_{AA}\dot{I}_A + \dot{Z}_{AB}\dot{I}_B + \dot{Z}_{AC}\dot{I}_C + \dot{Z}_{AD}\dot{I}_D + \dot{Z}_{A1}\dot{I}_1;$$

для контуров с токами  $\dot{I}_B$ ,  $\dot{I}_C$  и  $\dot{I}_D$  уравнения имеют аналогичную форму;

для контура с током  $\dot{I}_1$  имеем:

$$\dot{E}_1 = Z_{1A}\dot{I}_A + Z_{1B}\dot{I}_B + Z_{1C}\dot{I}_C + Z_{1D}\dot{I}_D + Z_{11}\dot{I}_1,$$

где

$$Z_{A1} = Z_{1A} = j(x_{a1} + x_{f1} - x_{h1} - x_{d1}),$$

$$Z_{B1} = Z_{1B} = j(x_{b1} + x_{g1} - x_{f1} - x_{p1}) \text{ и т. д.}$$

Значение сопротивлений  $Z_{AA}$ ,  $Z_{AB}$  и т. д. определяются так же, как в уравнениях (4). Определив ток  $\dot{I}_1$  из уравнения для контура с этим током и подставив его значение в остальные, получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}''_{AA} &= Z'_{AA}\dot{I}_A + Z'_{AB}\dot{I}_B + Z'_{AC}\dot{I}_C + Z'_{AD}\dot{I}_D; \\ \dot{E}''_{BB} &= Z'_{BA}\dot{I}_A + Z'_{BB}\dot{I}_B + Z'_{BC}\dot{I}_C + Z'_{BD}\dot{I}_D; \\ \dot{E}''_{CC} &= Z'_{CA}\dot{I}_A + Z'_{CB}\dot{I}_B + Z'_{CC}\dot{I}_C + Z'_{CD}\dot{I}_D; \\ \dot{E}''_{DD} &= Z'_{DA}\dot{I}_A + Z'_{DB}\dot{I}_B + Z'_{DC}\dot{I}_C + Z'_{DD}\dot{I}_D. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения параметров схемы замещения найдем ток  $\dot{I}_D$  из четвертого уравнения (6) и подставим его значение в остальные, в результате получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}''_{AA} - \dot{E}''_{DD} \frac{Z'_{AD}}{Z'_{DD}} &= \left( Z'_{AA} - \frac{Z'_{AD}Z'_{DA}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_A + \\ &+ \left( Z'_{AB} - \frac{Z'_{AD}Z'_{DB}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_B + \left( Z'_{AC} - \frac{Z'_{AD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_C; \\ \dot{E}''_{BB} - \dot{E}''_{DD} \frac{Z'_{BD}}{Z'_{DD}} &= \left( Z'_{BA} - \frac{Z'_{BD}Z'_{DA}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_A + \\ &+ \left( Z'_{BB} - \frac{Z'_{BD}Z'_{DB}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_B + \left( Z'_{BC} - \frac{Z'_{BD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_C; \\ \dot{E}''_{CC} - \dot{E}''_{DD} \frac{Z'_{CD}}{Z'_{DD}} &= \left( Z'_{CA} - \frac{Z'_{CD}Z'_{DA}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_A + \\ &+ \left( Z'_{CB} - \frac{Z'_{CD}Z'_{DB}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_B + \left( Z'_{CC} - \frac{Z'_{CD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}} \right) \dot{I}_C. \end{aligned} \quad (7)$$

Возвращаясь к схеме рис. 3, заменим в уравнениях (7) контурные токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  токами соответствующих вет-

вей, оставшихся в схеме после исключения контурного тока  $\dot{I}_D$ . В результате преобразований получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}''_a + \dot{E}''_f - \dot{E}''_d + \dot{E}''_{np} - \dot{E}''_{qh} &= Z''_{AA}\dot{I}_a - \\ - Z'_{AB}\dot{I}_f + \frac{Z'_{AD}Z'_{DB}}{Z'_{DD}}\dot{I}_f + \frac{Z'_{AC}Z'_{DC}}{Z'_{DD}}\dot{I}_d - \frac{Z'_{AD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}}\dot{I}_d \\ \dot{E}''_b + \dot{E}''_g - \dot{E}''_f + \dot{E}''_{pq} - \dot{E}''_{np} &= Z''_{BB}\dot{I}_b - \\ - Z'_{BC}\dot{I}_g + \frac{Z'_{BD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}}\dot{I}_g + Z'_{AB}\dot{I}_f - \frac{Z'_{AD}Z'_{BD}}{Z'_{DD}}\dot{I}_f, \\ \dot{E}''_c + \dot{E}''_d - \dot{E}''_g + \dot{E}''_{qh} - \dot{E}''_{pq} &= Z''_{CC}\dot{I}_c - \\ - Z'_{CA}\dot{I}_d + \frac{Z'_{CD}Z'_{DA}}{Z'_{DD}}\dot{I}_d + Z'_{BC}\dot{I}_g - \frac{Z'_{BD}Z'_{DC}}{Z'_{DD}}\dot{I}_g, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{E}''_a &= \dot{E}'_a - \alpha \dot{E}'_h, \quad \dot{E}''_b = \dot{E}'_b - \alpha \dot{E}'_p, \quad \dot{E}''_c = \dot{E}'_c - \alpha \dot{E}'_q, \\ \dot{E}''_{gh} &= \frac{\dot{E}'_q Z'_{AD} - \dot{E}'_h Z'_{DC}}{Z'_{DD}}, \quad \dot{E}''_{pq} = \frac{\dot{E}'_p Z'_{CD} - \dot{E}'_q Z'_{BD}}{Z'_{DD}}, \\ \dot{E}''_{np} &= \frac{\dot{E}'_h Z'_{DB} - \dot{E}'_p Z'_{AD}}{Z'_{DD}}, \end{aligned}$$

$$Z''_{AA} = Z'_{AA} + Z'_{AB} + Z'_{AC} + Z'_{AD} - \alpha Z'_{AD} \text{ и т. д.}$$

в свою очередь

$$\alpha = \frac{\dot{I}_1}{Z'_{DD}} \left[ j(x_{Da} + x_{Db} + x_{Dc}) + \frac{x_{1D}x_{1A}}{Z_{11}} \right],$$

$$\dot{E}''_a = \dot{E}'_a - \dot{E}'_1 j \frac{x_{1a}}{Z_{11}}$$

$$\dot{E}''_b = \dot{E}'_b - \dot{E}'_1 j \frac{x_{1b}}{Z_{11}} \text{ и т. д.,}$$

а  $x_{Da}$ ,  $x_{Db}$  и  $x_{Dc}$  определяется так же, как в уравнении (5).

Уравнениям (8) полностью удовлетворяет схема замещения, показанная на рис. 4, в которой надо произвести замену соответствующих параметров ветвей и значений э. д. с., согласно последним уравнениям (8). Токи в оставшихся после преобразования ветвях имеют реальные значения.

В заключение необходимо отметить, что изложенным методом автором получены до пятидесяти схем замещения различных электромагнитных аппаратов, анализ которых показал значительное упрощение исследования таких электромагнитных систем.





# Однофазные индукционные регуляторы

Доктор техн. наук, проф. Н. В. ГОРОХОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При регулировании напряжения в сетях низкого и среднего напряжения, а также в лабораторной практике применяют однофазные индукционные регуляторы [Л. 1]. Конструктивно эти регуляторы выполняются как нормальные асинхронные машины. В частности, ХЭМЗ для своих однофазных индукционных регуляторов использовал заготовки машин серии МА-195 и МА-197. На статоре и роторе в этом случае располагаются однофазные обмотки. Первичной обмоткой 1 может служить как обмотка статора, так и обмотка ротора. Схема включения однофазного индукционного регулятора приведена на рис. 1. Напряжение вторичной цепи  $U_2$  (на нагрузке) меняется в функции угла поворота ротора  $\beta$ . За начальное положение ( $\beta = 0$ ) в

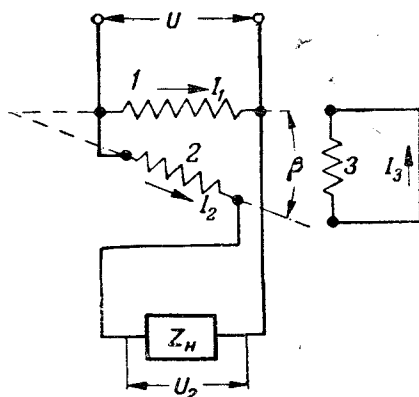


Рис. 1.

дальнейшем принимается положение ротора, при котором оси первичной 1 и вторичной 2 обмоток совпадают. Обычно однофазные индукционные регуляторы выполняются с дополнительной короткозамкнутой, так называемой компенсационной обмоткой (КО), которая располагается в квадратуре (3, рис. 1) с первичной обмоткой. В соответствии со сказанным выше, компенсационная обмотка может быть расположена как на статоре, так и на роторе. Компенсационная обмотка предложена Westinghouse EMC<sup>o</sup> [Л. 2].

При практическом выполнении для первичной обмотки 1 обычно используются  $\frac{2}{3}$  всех пазов статора (или ротора) и для компенсационной 3 оставшиеся  $\frac{1}{3}$  пазов. Вторичная обмотка 2, как правило, также располагается в  $\frac{2}{3}$  пазов ротора (или статора), остальные пазы остаются незаполненными.

Компенсационная обмотка в известной мере компенсирует поперечную составляющую намагничивающей силы вторичной обмотки  $\Theta_{2q}$  и

тем самым улучшает рабочие свойства однофазного индукционного регулятора. Эти положения отмечались в литературе. Однако, компенсационная обмотка вносит дополнительное улучшение в рабочие свойства однофазного индукционного регулятора, не рассмотренное теоретически в литературе. Это улучшение заключается в возможности применением компенсационной обмотки уменьшить величину максимального вращающего момента, развиваемого однофазным индукционным регулятором, что могло бы оказать влияние на решение некоторых практических задач<sup>1</sup> [Л. 3].

Найдем выражение для вращающего момента, развиваемого однофазным индукционным регулятором, при наличии компенсационной обмотки и при ее отсутствии. С этой целью воспользуемся выражением для вращающего момента в виде:

$$M_{12} = \left| I_1 \hat{I}_2 \right|_r \frac{dM_{12\beta}}{d\beta} = \frac{1}{\omega} \left| I_1 \hat{I}_2 \right|_r \frac{dx_{12\beta}}{d\beta}.$$

Здесь  $M_{12\beta}$  — коэффициент взаимной индуктивности первичной и вторичной обмоток являющийся функцией угла поворота ротора  $\beta$  и  $x = \omega M_{12\beta}$ , соответствующее ему реактивное сопротивление.

При анализе принимаем во внимание первые гармоники токов, напряжений и намагничивающих сил. Очевидно, при этих условиях:

$M_{12\beta} = M_{12} \cos \beta$  и  $x_{12\beta} = x_{12} \cos \beta$ , причем  $M_{12}$  и  $x_{12}$  — взаимная индуктивность и соответствующее ей реактивное сопротивление при совпадении осей обмоток. Для вращающего момента, возникающего между обмотками 2 и 3, аналогично получим:

$$M_{23} = \frac{1}{\omega} \left| I_2 \hat{I}_3 \right|_r \frac{dx_{23\beta}}{d\beta},$$

где

$$x_{23\beta} = x_{23} \sin \beta$$

— реактивное сопротивление обмоток 2 и 3, обусловленное взаимной связью этих обмоток при совпадении их осей.

<sup>1</sup> Необходимо отметить необоснованное положение, приведенное в СЭТ VI, отд. 37—177 „Преимущества однофазных индукционных регуляторов“, об „отсутствии вращающего момента“ у однофазного регулятора.

Найдем токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  при произвольном положении ротора. Обозначим:  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  — активные сопротивления соответствующих обмоток индукционного регулятора,  $x_{11} = \omega L_{11}$ ,  $x_{22} = \omega L_{22}$  и  $x_{33} = \omega L_{33}$  — полные собственные реактивные сопротивления. Тогда, при принятых нами условиях исходные уравнения для схемы рис. 1 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{I}_1 Z_{11} + \dot{I}_2 j x_{12} \cos \beta, \\ \dot{U} &= \dot{I}_2 Z + \dot{I}_1 j x_{12} \cos \beta + \dot{I}_3 j x_{23} \sin \beta, \\ 0 &= \dot{I}_3 Z_{33} + \dot{I}_2 j x_{23} \sin \beta. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= r_1 + j x_{11}; \quad Z_{33} = r_3 + j x_{33}, \\ Z &= r_2 + j x_{22} + Z_{\kappa}. \end{aligned}$$

Решение уравнений (1) дает [Л. 4]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U} [Z Z_{33} + x_{23}^2 \sin^2 \beta - j x_{12} Z_{33} \cos \beta] : \Delta, \\ \dot{I}_2 &= U [Z_{11} Z_{33} - j Z_{33} x_{12} \cos \beta] : \Delta, \\ \dot{I}_3 &= -I_2 j x_{23} \sin \beta : Z_{33}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\Delta = Z_{11} Z Z_{33} + Z_{11} x_{23}^2 \sin^2 \beta + Z_{33} x_{12}^2 \cos^2 \beta.$$

Полный момент  $M_{123}$ , действующий на обмотку 2, очевидно, равен сумме моментов взаимодействия обмоток 1 и 2 и обмоток 2 и 3, и при принятых выше условиях:

$$M_{123} = - |I_1 \hat{I}_2| r \frac{x_{12}}{\omega} \sin \beta + |I_2 \hat{I}_3| r \frac{x_{23}}{\omega} \cos \beta. \quad (3)$$

Для упрощения анализа рассмотрим величину вращающего момента при коротком замыкании вторичной цепи ( $Z_{\kappa} = 0$ ). Величинами активных сопротивлений обмоток индукционного регулятора по сравнению с величинами реактивных сопротивлений тех же обмоток можно пренебречь, положить  $r_1 = r_2 = r_3 = 0$ . Тогда выражения для токов отдельных обмоток будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= -j \frac{U}{x_{11}} \frac{[-1 + k_{23}^2 + \varepsilon k_{12} \cos \beta - k_{23}^2 \cos^2 \beta]}{[-1 + k_{23}^2 + (k_{12}^2 - k_{23}^2) \cos^2 \beta]}, \\ \dot{I}_2 &= +j \frac{U}{x_{22}} \frac{\varepsilon - k_{12} \cos \beta}{[-1 + k_{23}^2 + (k_{12}^2 - k_{23}^2) \cos^2 \beta]}, \\ \dot{I}_3 &= -I_2 \frac{x_{23}}{x_{33}} \sin \beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь:

$$k_{12} = \frac{x_{12}}{\sqrt{x_{11} x_{22}}}, \quad k_{23} = \frac{x_{23}}{\sqrt{x_{22} x_{33}}}$$

коэффициенты связи соответствующих обмоток и  $\varepsilon = \sqrt{\frac{x_{11}}{x_{22}}}$ . Введем далее величину относительного момента:

$$\mu = \frac{M \omega}{U^2 / x_{11}}.$$

В результате подстановок (4) в (3) и соответствующих преобразований получим для величины вращающего момента однофазного индукционного регулятора при наличии компенсационной обмотки следующее выражение:

$$\mu_{123} = \frac{(k_{12} \cos \beta - \varepsilon) [k_{12} (1 - k_{23}^2) - \varepsilon (k_{12}^2 - k_{23}^2) \cos \beta] \sin \beta}{[1 - k_{23}^2 - (k_{12}^2 - k_{23}^2) \cos^2 \beta]^2}. \quad (5)$$

Положив в выражениях (4) и (5)  $k_{23} = 0$ , получим величины токов и вращающего момента индукционного регулятора при отсутствии компенсационной обмотки в виде:

$$\dot{I}_1 = -j \frac{U}{x_{11}} \frac{[-1 + \varepsilon k_{12} \cos \beta]}{[-1 + k_{12}^2 \cos^2 \beta]}, \quad (6)$$

$$\dot{I}_2 = +j \frac{U}{x_{22}} \frac{1 - k_{12} \cos \beta}{[-1 + k_{12}^2 \cos^2 \beta]},$$

$$\mu_{12} = \frac{k_{12} [k_{12} \cos \beta - \varepsilon] [1 - \varepsilon k_{12} \cos \beta] \sin \beta}{[1 - k_{12}^2 \cos^2 \beta]^2}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены кривые  $\mu_{12} = f(\beta)$  и  $\mu_{123} = \varphi(\beta)$  для одинаковых значений коэффициентов связи обмоток 1 и 2 и обмоток 2 и 3, т. е.  $k_{12} = k_{23}$ , причем  $k_{12}^2 = 0,956$ .

Из рассмотрения кривых рис. 2 следует, что применение компенсационной обмотки 3 в рассматриваемом случае снижает величину максимального момента примерно в четыре раза

$$(\mu_{123} \approx 31 \text{ и } \mu_{12} \approx 135).$$

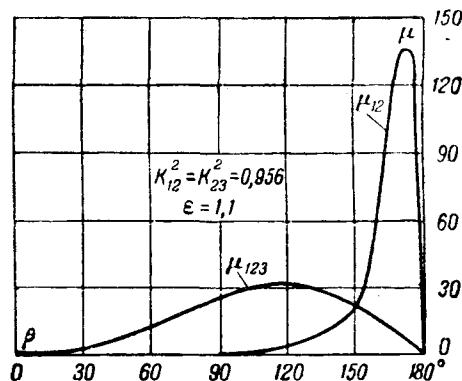


Рис. 2.

Отметим, что сравнение вращающих моментов проведено здесь при одинаковых значениях сопротивлений вторичной цепи. В частности, как указано выше, принято  $r_1 = r_2 = r_3 = 0$ ,  $Z_{\kappa} = 0$ . В этом случае, как это легко установить путем сравнений выражений для токов  $I_2$  для обеих схем включения, величина тока вторичной цепи в случае наличия компенсационной обмотки будет больше, чем при ее отсутствии. Взяв отношение тока во втором случае к току в первом, найдем, что это отношение:

$$m = 1 - k_{23}^2 \frac{1 - \cos^2 \beta}{1 - k_{12}^2 \cos^2 \beta}. \quad (8)$$

Совершенно очевидно, что отношение  $m$  всегда меньше единицы.

При одних и тех же значениях токов  $I_2$  величина максимального момента при наличии ком-

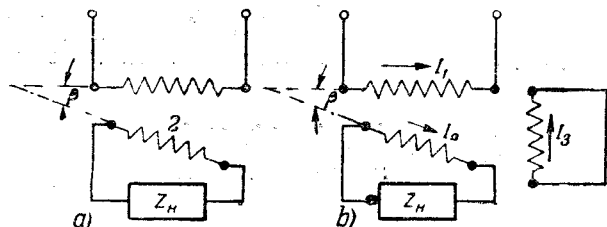


Рис. 3.

пенсационной обмотки снизится, очевидно, больше, чем в рассматриваемом случае.

Наличие компенсационной обмотки облегчает условия работы приводного механизма индукционного регулятора.

Одновременно сравнение полученных результатов указывает на опасность, связанную с размыканием цепи компенсационной обмотки в том случае, когда не приняты меры защиты индукционного регулятора против сильного возрастания вращающего момента (расцепные муфты, срезывающиеся шпонки).

Обмотки 1 и 2 могут быть включены согласно схеме а рис. 3, т. е. не иметь электрического соединения. В этом случае мы будем применять термин поворотный трансформатор. Поворотные трансформаторы также имеют применение в практике регулирования напряжения. В частности, такого рода соединения применяются в качестве исполнительных систем в схемах реле [Л. 5]. В этой схеме применение компенсационной обмотки (b рис. 3) вносит те же улучшения, как и в схеме рис. 1.

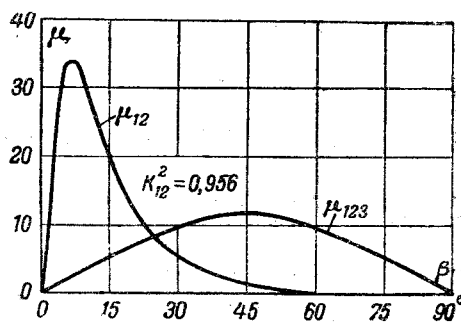


Рис. 4.

Выражения для вращающих моментов будет иметь в этом случае такой вид:

$$\mu_{123} = \frac{k_{12}^2 [1 - k_{23}^2] \sin 2\beta}{2 [-1 + k_{23}^2 + (k_{12}^2 - k_{23}^2) \cos^2 \beta]^2}, \quad (9)$$

$$\mu_{12} = \frac{k_{12}^2 \sin 2\beta}{2 [-1 + k_{12}^2 \cos^2 \beta]^2}. \quad (10)$$

Кривые, иллюстрирующие эти уравнения для  $k_{12} = k_{23}$ , приведены на рис. 4. При данной схеме соединения снижение максимального значения вращающего момента получается примерно в три раза.

Все замечания и выводы, сделанные нами применительно к схеме индукционного регулятора, действительно и в применении к схеме поворотного трансформатора.

#### Литература

1. Н. В. Горохов. Электричество, № 6, 1940.
2. ETZ, стр. 984, 1902.
3. Д. И. Гордеев. Электрооборудование электровозов переменного тока. Трансжелдориздата, 1938.
4. Н. Н. Горохов. Электричество, № 18, 1940.
5. В. С. Сотсков. Элементы телемеханической и автоматической аппаратуры, ч. 1, реле, стр. 67, Оборонгиз, 1938.



## Влияние земли на потери энергии в прямоугольных рамках при повышенной частоте

Доктор техн. наук, проф. С. И. ТЕТЕЛЬБАУМ, кандидат техн. наук, доц. А. Б. БУДНИЦКИЙ, кандидат техн. наук, доц. В. Г. ХОЛМСКИЙ

Киевский политехнический институт

Для суждения о возможности применения подземной тяговой сети высокочастотного транспорта необходимо определить потери, обусловленные влиянием земли.

В 1945 г. нами по заданию НКХХ УССР измерены потери этого вида [Л. 1] в прямоугольной проволочной рамке размером  $2 \times 10$  м, помещенной в земле — на разной глубине — и над поверхностью земли — на различной высоте. Опыты производились в осеннее (влажная почва, температура  $+6^\circ\text{C}$   $+15^\circ\text{C}$ ) и зимнее (мерзлый грунт, температура  $-3^\circ\text{C}$   $-15^\circ\text{C}$ ) время в диапазоне частот 30—200 кГц при следующих положениях рамки: 1) горизонтальном, на расстоянии 20—200 см от поверхности земли; 2) при укладке рамки в траншеях сечением  $45 \times 45$  см (траншея № 1) и  $15 \times 20$  см (траншея № 2); 3) при вертикальном положении рамки вне траншеи.

Испытательная площадка выполнена в суглинистом грунте.

Дно траншей № 1 и 10—15 см боковых стенок проходят по бурому суглинку коренного залегания. Верхние 30—35 см стенок сложены насыпным грунтом, состоящим из шлака, извести, битого кирпича, песка, почвы и др. Шлак состоит из темных, неправильной формы кусков размером 2—8 см и залегает сплошным слоем мощностью 10 ÷ 20 см непосредственно на суглинке. Основную массу шлака составляют спекшиеся и сплавившиеся минеральные частицы, однако не исключена возможность присутствия и металлов, скорее всего окислов железа. Над шлаком залегает слой извести толщиной около 10 см. Самый верхний слой боковых стенок состоит из механической смеси песка, суглинка, битого кирпича и др.

Дно траншеи № 2 и ее боковые стенки проходят по суглинку, который в верхней части обогащен гумусовым веществом. Встречается также битый кирпич. Наносный грунт и шлак в этой траншее отсутствуют.

При опытах измерялось резонансное сопротивление контура, образованного испытательной рамкой и параллельно включенными конденсаторами.

Ввиду относительно малых (по сравнению с длиной волны) размеров испытательной рамки можно считать, что вокруг проводов включенной рамки существует переменное магнитное поле, обуславливающее потери от вихревых токов в земле, а между проводами — переменное электрическое поле, вызывающее диэлектрические потери.

Выражая потери через соответствующие им эквивалентные активные сопротивления и рассматривая рамку как двухпроводную короткозамкнутую линию с распределенными постоянными, можно представить эквивалентную схему контура по рис. 1. На схеме сопротивление  $3R_d = R_d$ , эквивалентное диэлектрическим потерям в земле, равно для короткозамкнутой линии примерно утроенному сопротивлению диэлектрических потерь разомкнутой. Действующая собственная емкость  $C_0$  между проводами рамки внесена в общую резонансную емкость  $C_p$ .

Контур подключен к ламповому генератору  $\Gamma$  через безиндукционное добавочное сопротивление  $R$ . Напряжение на выходе  $U_u$  и резонансное  $U_p$  измеряются катодным вольтметром. Для получения удовлетворительных по точности результатов измерения добавочное сопротивление подобрано так, чтобы отсчеты можно было вести по одной шкале вольтметра и вместе с тем, чтобы разность показаний  $U_u$  и  $U_p$  не была чрезмерно малой. В наших экспериментах  $R=1300 \Omega$ .

Определение интересующих нас значений  $r_f$  и  $R_d$  производится следующим образом. Контур помещается вдали от поверхности земли (в наших опытах на высоте 2 м) и определяется резонансное сопротивление

$$R_{p1} = \frac{U_{p1} R}{U_{u1} - U_{p1}}. \quad (1)$$

При относительно высоком качестве контура, при известной частоте и индуктивности собственное сопротивление контура

$$r_0 = r_m + r_c \approx \frac{L^2 \omega^2}{R_{p1}}. \quad (2)$$

Затем рамка устанавливается в другое интересующее нас положение (например, в траншею) и снова определяется резонансное сопротивление

$$R_{p2} = \frac{U_{p2} R}{U_{u2} - U_{p2}} \quad (1')$$

и соответствующее эквивалентное последовательное сопротивление общих потерь

$$r = \frac{L^2 \omega^2}{R_{p2}}. \quad (2')$$

Очевидно, что

$$r = r - r_0 = \left( \frac{U_{u2} - U_{p2}}{U_{p2}} - \frac{U_{u1} - U_{p1}}{U_{p1}} \right) \frac{L^2 \omega^2}{R} \quad (3)$$

обусловлено влиянием земли.

Для разделения потерь на диэлектрические и магнитные к исследуемому контуру, не меняя его положения, подключаются отрезки («усы»), показанные на рис. 1 пунктиром. Усы представляют собой такую же, как и рамка, линию, но с разомкнутым торцом.

В этом случае сопротивления диэлектрических потерь рамки и усов включены параллельно

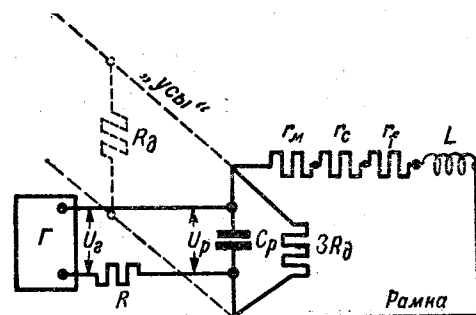


Рис. 1. Эквивалентная схема контура, образованного испытательной рамкой, параллельно включенными конденсаторами и землей.

$L_m$  — индуктивность рамки;  $r$  — сопротивление меди провода при данной частоте;  $r_f$  — сопротивление потерь на токи Фуко в земле;  $r_c$  — сопротивление, эквивалентное потерям в конденсаторе;  $3R_d$  — сопротивление, эквивалентное диэлектрическим потерям в земле;  $C_p$  — общая резонансная емкость;  $\Gamma$  — ламповый генератор;  $R$  — добавочное безиндукционное сопротивление.

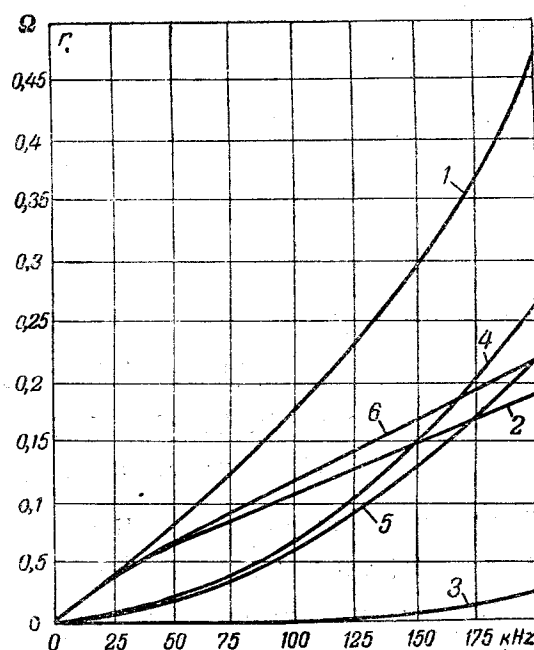


Рис. 2. 1, 2, 3 и 4 — экспериментально определенные зависимости сопротивлений контура от частоты в случае рамки, уложенной в траншею сечением  $45 \times 45$  см.

1 — эквивалентное сопротивление суммарных потерь; 2 — собственное сопротивление контура; 3 — сопротивление диэлектрических потерь; 4 — сопротивление потерь на токи Фуко. Кривая 5 — потери в земле в зависимости от частоты для горизонтальной рамки, помещенной в воздухе на высоте 20 см от уровня земли; кривая 6 — полное сопротивление в зависимости от частоты для вертикальной рамки, расположенной в воздухе так, что одна из ее длинных сторон находится на высоте 20–25 см от земли.

но и составляют  $\frac{3}{4} R_{\delta}$ . Соответствующее резонансное сопротивление  $R_{p3}$  определяется по значениям напряжений  $U_{z3}$  и  $U_{p3}$ .

Таким образом,

$$R_{\delta} = \frac{R_{p2} R_{p3}}{R_{p2} - R_{p3}} = R \frac{U_{p2} U_{p3}}{U_{p2} U_{z3} - U_{p3} U_{z2}}, \quad (4)$$

а сопротивление потерь на токи Фуко в земле

$$r_f = r_l - \frac{\omega^2 L^3}{3R_{\delta}}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены кривые зависимости сопротивления контура от частоты, построенные по результатам измерений для траншеи сечением  $45 \times 45$  см. На рисунке: эквивалентное сопротивление суммарных потерь (кривая 1)

$$r = r_m + r_c + r_f + \frac{\omega^2 L^3}{3R_{\delta}},$$

собственное сопротивление контура (кривая 2)

$$r_0 = r_m + r_c,$$

сопротивление диэлектрических потерь (кривая 3)

$$r_{\delta} = \frac{\omega^2 L^3}{3R_{\delta}},$$

сопротивление потерь на токи Фуко (кривая 4)

$$r_f = r - r_0 - \frac{\omega^2 L^3}{3R_{\delta}}.$$

Измерение потерь в траншее  $15 \times 20$  см дали несколько меньшие значения сопротивления  $r_f$ , хотя эта траншея более узкая. Здесь, очевидно, сказалось влияние неидентичности грунта.

Из рис. 2 видно, что сопротивление потерь на токи Фуко практически пропорционально квадрату частоты. При расстоянии между проводами,

равном 2 м, и расположении провода в траншее (кривая 4)

$$r_f \approx \alpha \omega^2 l \approx 1,7 \cdot 10^{-14} \omega^2 l \approx 6,7 \cdot 10^{-13} f^2 l, \quad (6)$$

где  $l$  — длина линии в м.

Для расчетов с некоторым запасом можно рекомендовать значение

$$\alpha \approx 10^{-14}. \quad (7)$$

Кривая 5 рис. 2 дает зависимость потерь в земле от частоты для горизонтальной рамки, помещенной в воздухе на высоте 20 см над уровнем земли. При таком расположении практически сопротивление потерь в земле

$$r_2 \approx 1,4 \cdot 10^{-14} \omega^2 l \approx 5,5 \cdot 10^{-13} f^2 l. \quad (8)$$

Кривая 6 рис. 2 представляет зависимость полного сопротивления от частоты для вертикальной рамки, расположенной в воздухе так, что одна из длинных ее сторон находится на высоте 20—25 см от земли.

Как видно из рисунка, сопротивление потерь в земле при вертикальной рамке значительно меньше, чем при горизонтальной, и, с некоторым запасом, это значение можно принять разным

$$r_g \approx 0,2 \cdot 10^{-14} \omega^2 l \approx 0,8 \cdot 10^{-13} f^2 l. \quad (9)$$

Приведенные цифры, естественно, относятся к испытанному нами грунту.

Оценка возможного к. п. д. подземной тяговой сети, произведенная с учетом полученных результатов, показала, что потери энергии в земле при правильном выборе рабочей частоты и формы сети могут быть относительно невелики.

#### Литература

1. Определение потерь энергии в прямоугольном контуре, обусловленных влиянием земли. Рукописный отчет КПИ, 1945 г. Киев.



## Опыт применения новых железохромалюминиевых сплавов для нагревательных элементов

Профессор И. И. КОРНИЛОВ, инж. Р. С. МИНЦ и А. А. АЗОВСКАЯ

Институт общей и неорганической химии Академии наук СССР

Жаростойкие сплавы сопротивления Института общей и неорганической химии Академии наук им. Н. С. Курнакова № 1 и № 2 [Л. 1—3] были приняты в производство в 1940 г.

Эти сплавы представляют собой твердые растворы Fe, Cr и Al. Характерными особенностями их является высокое удельное сопротивление и высокая жаростойкость. Они отличаются от ранее существовавших аналогичных сплавов (фехраль, хромаль) содержанием хрома, алюминия и углерода, повышенным удельным сопротивлением, отсутствием превращений при высоких температурах и новой технологией их промышленного производства.

Завод «Электросталь» выпускает эти сплавы под марками ЭИ-341, ЭИ-340, ЭИ-292 в виде горячекатанной ленты; Миньярский завод производит холоднокатанную ленту, а Белорецкий сталепроволочный завод — проволоку. Сплавы

поставляются в виде проволоки по ГОСТ 2238-43 и в виде ленты по ГОСТ 2615-44. Сплав ЭИ-292 отличается от сплава ЭИ-340 низким содержанием углерода. Свойства сплавов и для сравнения нихрома даны в табл. 1. На рис. 1 представлено удельное сопротивление этих же сплавов в функции температуры. Рис. 2 дает механические свойства (прочность на разрыв  $\sigma$  в  $\text{kg/mm}^2$  и удлинение  $\delta$  в %) сплава № 2 и нихрома в функции температуры.

Для проверки эксплуатационных свойств новых сплавов они были испытаны в качестве элементов сопротивления в различных промышленных и лабораторных печах. Приводимые ниже данные основываются на протоколах испытаний печей, актах, составленных после выхода нагревателей из строя и общих заключениях заводов о пригодности материала для работы в конкретных условиях.

На одном из заводов испытание сплавов производилось в

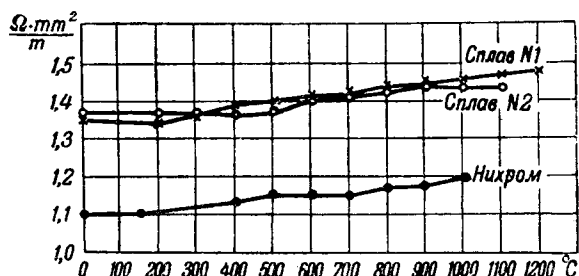


Рис. 1.

камерных печах: для термообработки (ПН-12) и для цементации (ПН-15). Печь ПН-12 мощностью 30 kW с нагревательным элементом из сплава № 1 в виде горячекатанной ленты  $2 \times 20$  мм<sup>2</sup>. Расчетная удельная нагрузка — 2,5 W/cm<sup>2</sup>. Секции изготовлены в холодном состоянии; выводы тройного сечения; всего — три секции. Высота секции

200 мм, шаг зигзага 40 мм и радиус изгиба 15 мм. Рабочая температура печи 860° С. Печь проработала всего три года (25 000 h непрерывной работы) и продолжает нормально работать. Подобных случаев продолжительной работы печи с нихромовым нагревателем на заводе не было.

Печь ПН-15 имеет мощность 72 kW; нагреватели изготовлены из сплава № 2. Расчетная удельная нагрузка 2,1 W/cm<sup>2</sup>. Высота секции 400 мм, шаг спирали 40 мм и радиус изгиба 15 мм. Рабочая температура 900—950° С, температура на элементе 1 000—1 050° С. Печь проработала 18 000 h и в настоящее время находится в консервации. Нагреватели печи пригодны для дальнейшей работы.

На Первом государственном подшипниковом заводе муфельная закалочная печь из сплава № 2 работала в течение 16,5 месяцев. Нагревательный элемент из проволоки диаметром 3,5 мм в виде спирали диаметром 25 мм, длина секции 500 мм. Температура рабочего пространства печи 820—860° С, температура на элементе 960° С. Нагреватель перегорел из-за неисправности футеровки печи.

На заводе им. Кирова (г. Челябинск) была смонтирована опытная печь — электрогорн, мощностью 12 kW, для нагрева концов прутков под горячую высадку головок. Рас-

Таблица 1

Вид сплавов	Сплав № 1 (ЭИ-311)	Сплав № 2 (ЭИ-340)	Сплав № 2 (ЭИ-292)	Нихром (ЭХН-60)
Состав (прочее кроме указанных компонентов — Fe), %	Cr 16 ÷ 18; Al 4,5 — 6,5, C ≤ 0,10	Cr 23 — 27; Al 4,5 — 7,0 C ≤ 0,10	Cr 23 — 27 Al 4,5 — 7,0; C ≤ 0,05	Cr 15 ÷ 17 Ni 58 ÷ 62; C ≤ 0,25
Температура плавления, °C	1 450 — 1 500	1 450 — 1500	1 500 — 1 510	1 360 — 1 370
Структура	Феррит	Феррит	Феррит	Аустенит
Удельное сопротивление, Ω мм <sup>2</sup> /м	1,3 ÷ 1,5	1,40 ÷ 1,60	1,30 ÷ 1,45	1,08 ÷ 1,12
Температурный коэффициент расширения, 10 <sup>-6</sup> /°C	14,5 — 15,0	14,5 — 15,0	14,5 — 15,5	12,3
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,0 — 7,2	6,9 — 7,2	6,9 — 7,2	—
Магнитные свойства	Ферромагнитный до 600°С	Ферромагнитный до 550°С	Ферромагнитный до 550°С	Немагнитный
Твердость по Бриннелю, kg/mm <sup>2</sup>	150 ÷ 170	160 ÷ 180	160 ÷ 180	180 ÷ 200
Прочность на разрыв, kg/mm <sup>2</sup>	60 ÷ 70	70 ÷ 80	60 ÷ 80	49 ÷ 84
Удлинение при разрыве, %	15 ÷ 25	15 ÷ 20	15 ÷ 20	25
Обрабатываемость	В горячем и холодном состоянии	В холодном состоянии	В горячем и холодном состоянии	В горячем и холодном состоянии
Допускаемая максимальная рабочая температура нагревательного элемента, °C	900	1 200°	1 250	1 000

Таблица 2

## Испытание сплавов в лабораторных и промышленных печах

Тип печи	Мощность печи в kW	Марка сплава и сечение нагревателя	Характеристика работы печи	
			рабочая температура	время работы
ПН-12	30	(ЭИ-341) лента $2 \times 20$ мм <sup>2</sup>	850—860	25 000 <sup>1</sup>
ПН-15	72	(ЭИ-340) " " "	900—950	18 000 <sup>1</sup>
Муфельная	45	(ЭИ-340) проволока диаметром 3,5 мм	820—900	12 000 <sup>1</sup>
Электрогорн	15	(ЭИ-340) лента $2 \times 25$ мм <sup>2</sup>	1 100—1 150	8 600 <sup>1</sup>
Шахтная ЗШВ	72	(ЭИ-292) лента $2 \times 20$ мм <sup>2</sup>	1 250—1 270	12 200 <sup>1</sup>
Марса	0,75	(ЭИ-292) проволока диаметром 3,5 мм	1 200—1 250	2 800 <sup>1</sup>
Марса	0,70	(ЭИ-292) " " " "	1 200—1 250	2 600 <sup>1</sup>
Трубчатая	1,20	(ЭИ-292) " " " "	1 200—1 250	4 200 <sup>1</sup>
Шахтная	0,90	(ЭИ-292) " " " "	1 200—1 300	2 900 <sup>1</sup>
Трубчатая	1,20	ЭХН-60) проволока диаметром 1,0 мм	1 000—1 100	192

<sup>1</sup> Данные относятся к 15 октября 1946 г. Печи продолжают работать.

четная удельная нагрузка  $1,65 \text{ W/cm}^2$ , материал—горячекатанная лента из сплава № 2. Рабочая температура  $1\,100$ — $1\,150^\circ \text{C}$ , температура на элементе  $1\,130$ — $1\,200^\circ \text{C}$ .

Особого внимания заслуживает испытание сплава № 2 в печи ЗШВ-72, как наиболее высокотемпературной из всех испытанных и вместе с тем имеющей наибольший габарит рабочего пространства. Печь, сконструированная инж. Н. В. Никольским, с нагревательным элементом из сплава № 2 (ЭИ-292) была смонтирована на заводе впервые вместо печи, которая раньше работала на глобаровых нагревателях отечественного производства со сроком службы не более  $500 \text{ h}$ , а при импортных нагревателях  $3\,000$ — $4\,000 \text{ h}$ . Шахтная закалочная печь ЗШВ-72 [Л. 4] имеет мощность  $72 \text{ kW}$ . Расчетная удельная нагрузка  $0,96 \text{ W/cm}^2$ . Глубина рабочего пространства  $2,5 \text{ m}$ , внутренний диаметр  $600 \text{ mm}$ . Секции подвешены вертикально на алюминиевых крючках. Высота секции  $155 \text{ mm}$ , шаг спирали  $48 \text{ mm}$ , радиус изгиба  $10 \text{ mm}$ . Расположение секций схематически представлено на рис. 3. Рабочая температура печи  $1\,250$ — $1\,270^\circ \text{C}$ . Смена нагревателей печи произошла после 17 месяцев или около  $12\,000 \text{ h}$  непрерывной работы печи.

Испытание сплава в печах Марса для определения содержания углерода в сталях проводилось на нескольких заводах. Нагревательные элементы в этих печах состоят из двух кусков проволоки из сплава № 2 диаметром  $3,5 \text{ mm}$ , длиной  $1,5 \text{ m}$  каждый. Проволока, навитая в виде двух параллельных спиралей, уложена в пазы шамотной трубки. В рабочее пространство печи вставляется фарфоровая трубка, в которой производится сжигание анализируемой стали. На одном из заводов печь работала при  $1\,150$ — $1\,250^\circ \text{C}$  в течение  $1\,760 \text{ h}$  и вышла из строя, потому что фарфоровая трубка дала трещину и на нагревательный элемент проникли плавы. В НИИ ВВС подобная печь проработала при  $1\,150$ — $1\,200^\circ \text{C}$  около  $7\,000 \text{ h}$ . Авторам известны случаи систематического использования подобных печей с нагревателем из сплава № 2 с рабочей температурой до  $1\,250^\circ \text{C}$  на заводах «Электросталь», «Серп и молот» и др.

Результаты продолжительного испытания сплавов в заводских и лабораторных печах сведены в табл. 2.

Таким образом, длительные наблюдения за работой нагревателей из железохромалюминевых сплавов в цеховых и лабораторных печах дают основание для рекомендации этих сплавов как заменителей нихрома, платины и силитовых стержней.

Выводы: 1. Опыт применения сплавов № 1 и № 2 (ЭИ-340, ЭИ-341 и ЭИ-292) для нагревателей высокотемпературных печей промышленного типа полностью подтверждает высокую жаростойкость сплавов.

Можно гарантировать следующий средний срок службы нагревательных элементов из новых сплавов:

№№	С п л а в	Рабочая температура в $^\circ \text{C}$	Средний срок службы в h
1	(ЭИ-341)	$800$ — $850$	$10\,000$
2	(ЭИ-340)	$850$ — $1\,150$	$10\,000$
2	(ЭИ-292)	$1\,200$ — $1\,250$	$12\,000$

2. Эти сплавы обладают отличными от нихрома свойствами, которые должны быть учтены при конструировании промышленных и лабораторных печей и их эксплуатации.

3. Конструкция нагревательных элементов, их расположение в печи, условия эксплуатации должны выполняться с учетом специфических свойств сплавов и в полном соответствии с составленной инструкцией по применению этих сплавов [Л. 4—5].

4. Сплав № 2 марки ЭИ-292 может быть рекомендован для нагревательных элементов промышленных печей с рабочей температурой до  $1\,200$ — $1\,250^\circ \text{C}$ . Он не только заменяет импортные силитовые нагреватели, но и обладает рядом преимуществ перед последними.

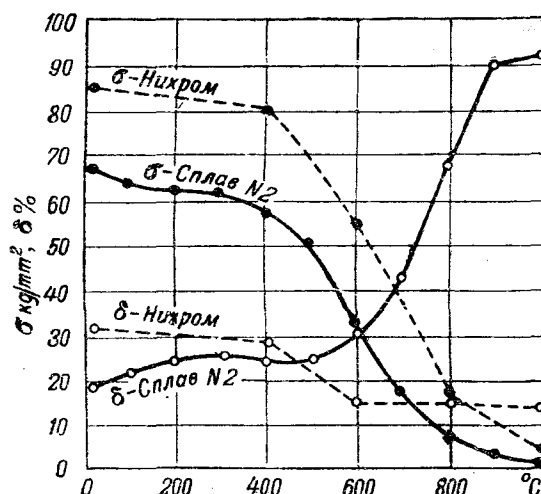


Рис. 2.

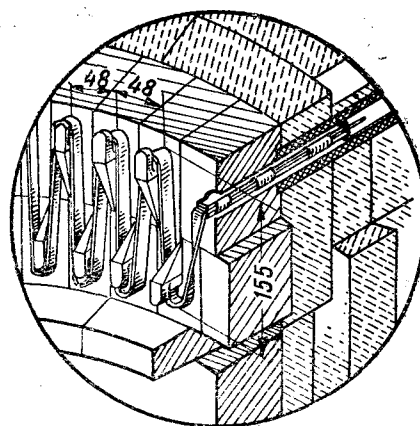


Рис. 3.

5. Возможность получения проволоки и ленты разных размеров позволяет применять сплавы в разнообразных печах лабораторного типа мощностью в несколько киловатт и промышленных печах мощностью более  $100 \text{ kW}$ .

6. Сплавы могут быть применены для изготовления печей: муфельных, шахтных, конвейерных, трубчатых, плавильных и др., применяемых для термической обработки цветных и легких сплавов и стальных изделий и для плавки легких и цветных металлов.

## Литература

1. И. И. Корнилов и В. С. Михеев. Жароупорные сплавы № 1 и № 2. Металлургиздат, 1943.
2. И. И. Корнилов. Железные сплавы т. 1. Сплавы железохромалюминий. Изд. Академии наук СССР, 1945.
3. И. И. Корнилов и Р. С. Минц. Сталь, № 11—12, стр. 35, 1941.
4. И. И. Корнилов и Н. В. Никольский. Изв. ОТН Академии наук СССР, № 9, стр. 825, 1945.
5. Инструкция по изготовлению и применению нагревательных элементов из сплавов № 1 и № 2. Оборонгиз, 1946.



# Зависимость времени потерь от продолжительности использования максимума и коэффициента мощности нагрузки

Инж. А. А. ГЛАЗУНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Использование общепринятой кривой зависимости времени потерь<sup>1</sup>  $\tau$  от продолжительности использования максимума нагрузки  $T_{\max}$ , широко применяемой для определения потерь энергии в линиях сети, обмотках машин и при выборе сечений проводов и кабелей по потерям энергии, приводит в целом ряде случаев к крупным ошибкам. Названная выше кривая была получена по шести теоретическим годовым графикам нагрузок по продолжительности. Очертания графиков были приняты (рис. 1): по парабололам 1 и 3, по синусоиде 4, по прямым 2 и 6 и по ломаной линии 5.

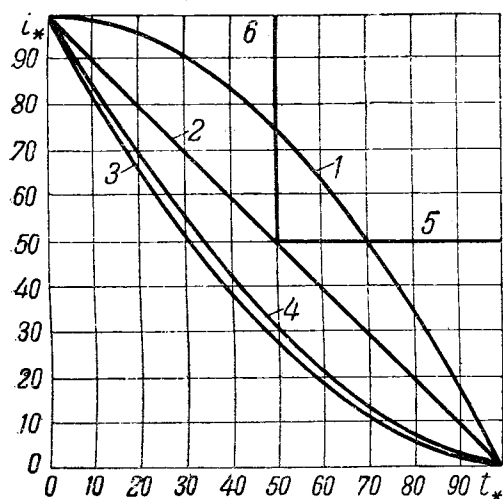


Рис. 1.

Все эти графики нагрузок имеют простые уравнения, позволяющие аналитически найти площади графиков и соответствующих им графиков квадратичных нагрузок, благодаря чему легко установить зависимость между временем потерь и продолжительностью использования максимума нагрузки. Но при этом следует иметь в виду, что: 1) минимальные нагрузки действительных годовых графиков нагрузок не равны нулю, в то время как из принятых шести графиков четыре имеют минимум, равный нулю; 2) очертания графиков нагрузок взяты достаточно произвольно, например, график, представленный ломаной линией; 3) при построении кривой  $\tau = f(T_{\max})$  предполагается наличие только активных и отсутствие реактивных нагрузок, что не соответствует действительности.

Последнее становится очевидным, если вспомнить, что очертания графиков активных и реактивных нагрузок должны быть различными. Это

<sup>1</sup> Понятие времени потерь означает число часов, которое при передаче энергии с максимальной нагрузкой потери энергии в элементе системы будут равны действительным потерям в этом элементе за один год.

различие в основном определяется наличием в графике активных нагрузок, нагрузки от освещения. Доля участия освещения в максимуме нагрузки уменьшается с увеличением  $T_{\max}$ . При построении принятой ранее кривой  $\tau = f(T_{\max})$  каждому значению  $T_{\max}$  соответствует только один график. Ясно, что это не график реактивных нагрузок. В то же время это и не график полной (кажущейся) мощности, поскольку в таком случае для каждого значения  $T_{\max}$  нужно было бы иметь несколько кривых, соответствующих различным коэффициентам мощности нагрузок. Ввиду указанных ошибок в общепри-

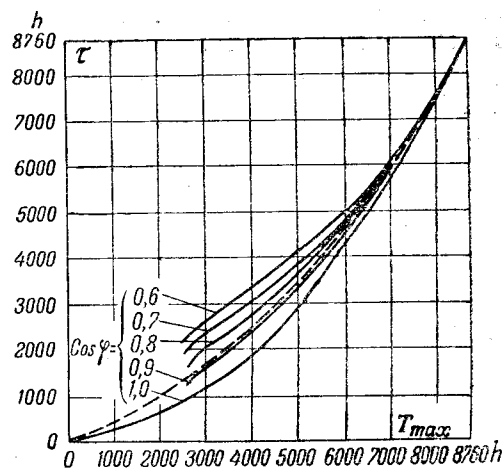


Рис. 2.

нятой кривой  $\tau = f(T_{\max})$  было предпринято построение новых кривых зависимости времени потерь от продолжительности использования и коэффициента мощности нагрузок, используя метод Россандера.

Для построения годовых графиков активных нагрузок, по методу Россандера, необходимо иметь: продолжительность использования максимума активной нагрузки  $T_{\max}$  и максимум и минимум активных нагрузок в течение года  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ . Для построения годовых графиков реактивных нагрузок необходимо знать долю участия осветительной нагрузки  $P_{осв}$  в суммарном максимуме активной нагрузки. Считая в относительных единицах максимальную за год нагрузку  $P_{\max} = 100$  и продолжительность года  $t_{год} = 100$  ( $t_{год} = 8760$  h) принимаем, при построении годовых графиков активных нагрузок, соотношения, приведенные в табл. 1.

По приведенным данным были построены годовые графики активных нагрузок по продолжительности. Построенные графики дают возможность более точно установить зависимость



Таблица 1

Соотношение между  $P_{*max}$ ,  $P_{*min}$  и  $P_{*осв}$ 

$T_{*max}$ в часах	$P_{*max}$	$P_{*min}$	$P_{*осв}$
2 000	100	10	$P_{*max}$
3 000	100	20	0,7 $P_{*max}$
4 000	100	30	0,5 $P_{*max}$
5 000	100	40	0,35 $P_{*max}$
6 000	100	50	0,2 $P_{*max}$
7 000	100	60	0,1 $P_{*max}$

между  $\tau$  и  $T_{max}$ , чем кривые рис. 1. Это следует из большего их сходства по очертанию с действительными графиками нагрузок, чем принятые при построении общепринятой кривой.

Годовые графики реактивных нагрузок были получены следующим образом. Из ординат графиков активных нагрузок вычитались ординаты чисто осветительной нагрузки (график нагрузки при  $T_{max} = 2000$  h), уменьшенные в соответствии с долей участия освещения в данном графике. Этой операцией определялись ординаты графиков активных нагрузок от промышленных предприятий. Принимая  $\cos \varphi$  в течение года постоянным, получим, что очертания графиков активных нагрузок от промышленных предприятий будут соответствовать очертаниям графиков реактивных нагрузок.

По полученным графикам, задаваясь различными значениями коэффициента мощности и построив графики квадратичных активных и реактивных нагрузок, можно определить среднеквадратичные нагрузки и  $\tau$  для графиков нагрузок с различными продолжительностями использования максимума нагрузки.

Полученные результаты сведены в табл. 2.



Таблица 2

Значения  $\tau$  в зависимости от  $T_{max}$  и  $\cos \varphi$ 

$\cos \varphi$	$T_{max}$ в часах				
	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000
0,6	2 620	3 380	4 110	5 010	5 920
0,7	2 350	3 100	3 890	4 890	5 870
0,8	2 000	2 780	3 690	4 680	5 790
0,9	1 620	2 390	3 290	4 500	5 740
1,0	1 300	1 970	2 940	4 290	5 680

Эти же результаты представлены на рис. 2, на котором пунктирной линией нанесена зависимость  $\tau = f(T_{max})$ , применяемая в настоящее время.

Сравнение кривых позволяет сделать следующие выводы:

1. Используемая в настоящее время кривая почти совпадает с кривой, соответствующей  $\cos \varphi = 0,9$ .

2. Пользование общепринятой кривой для местных сетей 6—35 kV, для которых  $\cos \varphi$  близок к 0,7, а  $T_{max} = 3000—4500$  h, приводит к ошибкам в определении времени потерь от 20 до 50 %.

3. Для линий сети 110 kV, работающих с  $\cos \varphi = 0,7—0,8$  и  $T_{max} = 4000—5000$  h, ошибки в определении  $\tau$  лежат в пределах 10—30 %.

4. Для коммунальных сетей, имеющих коэффициент мощности близким к единице и  $T_{max} = 2000—3000$  h, ошибки достигают 50 %.

5. Использование общепринятой кривой  $\tau = f(T_{max})$  приводит для сетей электрических систем к заниженному, а для коммунальных сетей — завышенному значениям потерь энергии.

6. Следует рекомендовать пользоваться новыми кривыми  $\tau = f(T_{max}, \cos \varphi)$ , как дающими более точные значения времени потерь.

## О величине возможных перенапряжений в ртутновыпрямительных агрегатах

Инж. В. Я. ГАЛПЕРН

Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта

При определенных условиях — ненормально низкая температура корпуса выпрямителя, перегрузки — газовая среда может внезапно, за время  $10^{-5}—10^{-6}$  сек, ограничить свою токопроводимость в значительных пределах. Освобождающаяся при обрыве дуги энергия магнитных полей обмоток трансформатора, питающего выпрямитель, катушки Кюблера и анодных реакторов переходит в энергию электрических полей тех же обмоток, создавая перенапряжение, достигающее многих десятков киловольт, если ранее не наступает перекрытие или пробой изоляции какой-либо части установки или обратное зажигание.

С целью определения вероятных величин этих перенапряжений и возможных методов борьбы с ними нами были поставлены опыты на ртутно-выпрямительном агрегате одной из трамвайных подстанций Днепропетровска. Агрегат состоял из выпрямителя РВ 20/6, силового трансформатора ТМР 1800/35, катушки Кюблера ОМ 66/35 и анодных реакторов РАТМ 10/20.

Охлажденный до  $40^\circ\text{C}$  выпрямитель нагружался с помощью проволочного реостата током 5 А. Выключив дежурные аноды, мы измеряли клидонографами величины перенапряжений, возникавших в момент погасания дуги, на всех промежутках анод-катод выпрямителя. Время

погасания дуги того же порядка, что и время ограничения токопроводимости ее.

Клидонографы зафиксировали перенапряжения, не превышающие 1 600 V. Наблюдавшийся разброс значений перенапряжений, сопутствующих обрыву дуги, объясняется тем, что моменты погасания катодного пятна имеют различное отклонение относительно максимума анодного тока.

Тот же опыт был повторен при подключенных параллельно промежуткам анод-катод конденсатора емкостью 310 см. В этом случае максимальная величина перенапряжений снизилась до 1 150 V.

Полученные результаты дали возможность, пользуясь формулой

$$LI^2 = CU_1^2 = (C + 310) U_2^2,$$

подсчитать величины  $L$  и  $C$  агрегата. Они оказались соответственно равными  $50-100 \cdot 10^{-6}$  Н и  $500-1500$  см, учитывая возможную погрешность опытов.

Напомним, что при нагрузке меньше одного процента (5 А) номинальной, выпрямитель работает в шестифазном режиме, так что полученные нами числовые величины относятся к последовательно включенным: одной фазе вторичной обмотки трансформатора, половине обмотки катушки Кюблера, половине обмотки анодного реактора.

В основном индуктивность ртутно-выпрямительных агрегатов в нашем опыте обусловлена потоками рассеяния, которые замыкаются через воздух; потоки агрегата, замыкающиеся через железо сердечников, не успевают следовать за сверхбыстрыми изменениями тока цепи из-за магнитной инерции железа. Поэтому определенная нами индуктивность не зависит от тока нагрузки. Следовательно, в крайне неблагоприятном

случае—полный обрыв дуги при нагрузке<sup>1</sup> 3 500 А—перенапряжение может достигнуть величины<sup>2</sup> порядка полумиллиона вольт. Это значение можно снизить до 24 kV включением в каждый промежуток анод-катод конденсатора емкостью всего 0,5—1,0 μF на каждую пару анодов. Расчет простой, и мы его опускаем.

Основываясь на изложенном выше, считаем доказанным, что применение емкостей для защиты ртутных выпрямителей от перенапряжений резко уменьшит число обратных зажигания (примерно на 25% при рабочем напряжении до 825 V и на 50% у выпрямителей, дающих выпрямленный ток напряжением 3 300 V).

Помимо увеличения надежности работы благодаря снижению средней частоты обратных зажигания имеется, по нашему мнению, возможность увеличить допустимую перегрузку выпрямителя, что особенно важно для тяговых установок, для которых характерен пикообразный график нагрузки.

#### Литература

1. В. К. Крапивин. Электричество, № 6, 1939.
2. Габович. ЖТФ, т. 9, вып. 23, 1939.
3. Н. Н. Петухов и В. И. Дроздов. Электричество, № 6, 1939.
4. Т. А. Суетин. Электричество, № 5, 1946.
5. Б. Г. Жданов. Электричество, № 5, 1946.
6. Sauvage. L'industrie des voies ferrées et des transports automobiles, № 349, 1936.
7. Pakala, Batten. El. Eng., vol. 59, № 6, 1940.
8. Lassen. Arch. f. El., Band 13, 1925.
9. Kleinwächter. Arch. für Elektrotechnik, Band 34, № 9, 1940.
10. Hull, Elder. Journ. of Appl. Phys., vol. 13, № 6, 1942.

<sup>1</sup> Предельный кратковременный ток нагрузки для выпрямителя типа РВ 20/6.

<sup>2</sup> Такое значение перенапряжения, конечно, практически недостижимо, так как раньше произойдет обратное зажигание или перекрытие изоляции внешних частей установки.



## К статье С. М. Брагина

### „ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ“

(см. стр. 23 этого номера)

*Учитывая актуальность вопросов, поставленных проф. С. М. Брагиным, редакция ознакомила с его статьей широкий круг специалистов с целью обсуждения выдвинутых проф. С. М. Брагиным предложений. Ниже помещается часть полученных замечаний по статье. Окончание дискуссии будет опубликовано в следующем номере.*

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

*Московский энергетический институт им. Молотова*

Ряд статей, опубликованных в прошлом году в журнале «Электричество»<sup>1</sup>, а также весь опыт современной электроэнергетики в СССР и за границей показали экономическую и техническую целесообразность внедрения для распределения электроэнергии повышенных напряжений вплоть до напряжений 35—110 кВ. Распределение электроэнергии на напряжениях 6—10 кВ может быть рационально осуществлено только при глубоком вводе линий повышенного напряжения к потребителям. Распределение энергии при напряжениях 6—10 кВ нескольким, относительно удаленным, потребителям от одной подстанции сопряжено с большими потерями электроэнергии и мощности и с большим расходом цветных металлов. Перестройка схем электроснабжения городов, фабрично-заводских предприятий и т. д. потребует в ряде случаев иного конструктивного решения задачи — ввода линий повышенного напряжения.

Совершенно очевидно, что ввод воздушных линий 35—110 кВ в центральные части крупных городов неосуществим по многим соображениям. Прокладка таких линий по улицам городов может быть допущена, и то с известными оговорками, если на этих улицах будет выделена специальная трасса, не используемая для движения транспорта и пешеходов. Установка опор непосредственно на проезжей части улицы недопустима из-за стеснения движения и опасности для людей. Правильным решением вопроса в таких случаях может быть кабельный ввод. Кажущаяся высокая стоимость такого ввода окупится снижением расходов на сооружение распределительной сети и уменьшением стоимости потерянной электроэнергии.

Цеховые подстанции крупных фабрик и заводов безусловно целесообразно питать напряжением 35, а не 6—10 кВ. Прокладка воздушных линий по фабрично-заводской территории подчас может встретить значительные затруднения. В отдельных случаях, например на химических заводах, сооружение воздушных линий вообще недопустимо. Таким образом, применение высокого напряжения для распределения энергии цеховым подстанциям также потребует использования кабелей при повышенных напряжениях.

Необходимо подчеркнуть, что современное рациональное электроснабжение цехов, фабрик и заводов строится на подстанциях, расположенных непосредственно в цехах. Устройство воздушных вводов к трансформаторам этих подстанций, конечно, неосуществимо. Необходимы кабельные вводы. В настоящее время одной из причин, заставляющих сооружать подстанции у наружных стен цехов, яв-

ляется устройство воздушной заводской сети, высокая относительно стоимость кабелей и недоверие к надежности работы кабелей.

Не останавливаясь далее на примерах, иллюстрирующих необходимость значительно более широкого применения кабелей повышенных напряжений, чем это было до сих пор, отметим, что этот вопрос тесно связан со снижением стоимости кабелей. Статья доктора техн. наук, проф. С. М. Брагина, намечающая применение новых типов кабелей, которые позволяют уменьшить первоначальные затраты и эксплуатационные расходы, ставит конкретные задачи перед электропромышленностью. Союзная электропромышленность обязана самым серьезным образом заняться вопросами производства кабелей повышенных напряжений, выпуская и их с необходимой арматурой.

**Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ**

*Технический совет Министерства электростанций СССР*

В ряде статей, опубликованных за последнее время в журнале «Электричество», предъявляются очень серьезные требования к нашей электропромышленности в части улучшения качества продукции и приведения ее в соответствие с уровнем современной электротехники. Требования были предъявлены к электромашиностроительным заводам, к трансформаторостроению, к заводам, производящим коммутационную аппаратуру. Серьезные и обоснованные требования предъявляет С. М. Брагин к кабельной промышленности. Они настолько значительны, что уместно говорить об очередности их выполнения.

Первой, неотложной задачей является обеспечение вопросов кабельных сетей существующего генераторного напряжения. Статистика повреждений показывает недопустимо высокую их аварийность: свыше двух аварий на 100 км сети в год. Особенно велика аварийность в соединительных и концевых муфтах. По существу у нас отсутствуют сколько-нибудь удовлетворительные конструкции концевых муфт как для наружных, так и для внутренних установок, и заводы, поставляющие кабель, повидимому, не считают себя обязанными заниматься кабельной арматурой. Нельзя ставить задачу о переходе к изготовлению кабеля более высокого напряжения, пока остаются не оснащенными кабельные сети генераторного напряжения.

Несомненно, второй задачей является переход на кабельные сети более высокого напряжения. Задача эта комплексная, выбор напряжения для этих сетей должен решаться совместно с заводами, изготовляющими генераторы и трансформаторы. Утверждать, что кабельной сетью следующего за 10 кВ напряжения должна быть сеть 35 кВ

<sup>1</sup> Электричество, № 6 и 7, 1946 г.

пока нет оснований. Наша сеть 35 kV работает при незаземленной нейтрали, а при этом условия кабельная линия обойдется дороже воздушной не в 3 раза, как это имеет место при заземленной нейтрали, а раз в 5—6, что ставит под сомнение экономическую эффективность перехода на сети этого напряжения. В США распределительные сети крупных городов работают на напряжении 22—27 kV, в Англии — на 35 kV, в обоих странах при заземленной нейтрали. В Германии для этой цели преимущественное применение получило напряжение 15 kV, при работе с изолированной нейтралью. Вопрос о выборе промежуточного напряжения между 10 и 35 kV в связи с развитием кабельных сетей ставился перед нашей электропромышленностью неоднократно, но никакого ответа на него, насколько известно, промышленность не дала.

Нам представляется, что следующей ступенью должно явиться напряжение 17,5 kV. Кроме преимуществ, которые получит городская кабельная сеть в отношении стоимости, экономии энергии и надежности работы, следует принять во внимание целесообразность электроснабжения окраин и пригородов на однофазном токе 10 kV, непосредственно получаемом от такой сети. По литературным сведениям больше 12 городов США в настоящее время развивают у себя однофазные воздушные сети. Сети напряжением 17,5 kV следовало бы создать с заземленной нейтралью, что благоприятно отразится на стоимости кабелей и надежности их работы.

Кабели напряжением 35 kV и выше потребуются для так называемых вводов высокого напряжения в центры жилых и промышленных массивов. Научную и исследовательскую работу по подготовке производства таких высоковольтных кабелей следует начинать немедленно, но осуществление самих вводов ни в коем случае не следует ставить в зависимость от наличия соответствующих кабелей. Опыт ввода воздушной линии 115 kV в центр Москвы дал самые благоприятные результаты как в смысле экономии средств и энергии, так и в смысле надежности работы линии, которая оказалась примерно на том же уровне, который может обеспечить кабельная линия при существующем состоянии производства кабелей; за более чем 20-летний срок работы не было ни одного несчастного случая, несмотря на то, что линия на протяжении нескольких километров проходит над тротуарами в населенной части города. Нам необходимо полностью использовать те возможности, которые дает социалистический строй. За границей электрические компании принуждены сооружать кабельные вводы потому, что они не могут найти ни средств, ни возможности изменить планировку города. Мы же можем и обязаны при перепланировке городов, проводимой сейчас и намечаемой в недалеком будущем, предусмотреть проезды необходимой ширины для вводов по ним в центр города высоковольтных вводов. Со временем воздушные вводы будут заменены кабельными, а проезды обратятся в одно из лучших украшений города после того, как проходящая по ним линия уже выполнит свое дело — сэкономит миллионы рублей и киловаттчасов, как это делает такой ввод в Москве. К тому же для большинства наших городов вводы будут осуществляться на напряжении 35 kV на штыревых изоляторах и металлических опорах и проложить их будет не труднее, чем обычную телефонную линию.

**Проф. В. П. ИВАНОВ**

*Ленинградский политехнический институт им. Калинина*

Задача изготовления кабелей высокого напряжения и принадлежностей к ним должна и может быть выполнена нашими заводами. Об этом свидетельствуют, в частности, технические достижения завода «Севкабель», давшего в 1924—1925 гг. подземный кабель на 35 kV для Ленинградского кольца и в 1931 г. — маслонаполненный кабель на 120 kV. Тем не менее разработки новых конструкций кабелей остановились на этих достижениях вплоть до настоящего времени; отсутствует должная борьба за расширение достижений и за удешевление новой заводской кабельной продукции. В то же время расширение производства высо-

ковольтных кабелей с одновременным их удешевлением имеет первостепенное значение для нашего энергохозяйства.

Для городов со сложившимися схемами и конструкциями электрических устройств возможность применения кабелей 35 и 110 kV открывает новый и эффективный путь повышения пропускной способности существующих линий и уменьшения потерь в них.

Исключительно широки возможности, которые дают кабели на 35 и 110 kV при осуществлении плана строительства городов в районах, разрушенных немцами в период оккупации.

Приближение в городах подстанций, питаемых линиями 35 и 110 kV, к центрам нагрузки приведет к эффекту не меньшему, чем полученный в промышленных предприятиях за счет широко осуществляемого теперь электроснабжения от «разукрупненных» подстанций.

В электроснабжении крупных промышленных предприятий использование 35- и 110-kV воздушных линий ограничивается, как правило, требованием трассировать линии и размещать подстанции, с ними связанные, у границ территории предприятия.

Это снижает экономичность, приводит к усложнению конфигурации сетей и к искусственности в размещении электротехнических устройств. Прокладка высоковольтных кабельных линий во многих таких случаях дала бы экономии в металле и энергии при большей логичности схемы электроснабжения.

Более скромных результатов можно ожидать от расширения использования кабелей повышенных напряжений в межцеховых и в цеховых устройствах промышленных предприятий. Случаи целесообразности применения вместо 6- или 10-kV кабелей и соответствующих подстанций системы электроснабжения предприятия от внутрицеховых 35-kV подстанций представляются исключительными, не имеющими сколько-нибудь общего характера и связанными со сверхмощными цехами.

Выпуск по относительно невысокой цене кабелей на 35 и 110 kV и арматуры к ним поведет к улучшению показателей городского и промышленного электроэнергетического хозяйства и к совершенствованию схем электроснабжения.

**Кандидат техн. наук П. Н. ГОРШКОВ**

*Завод Министерства электропромышленности СССР*

Наша кабельная промышленность сумела создать еще до войны некоторую производственную базу, необходимую для изготовления высоковольтных кабелей на напряжения вплоть до 220 kV. В случае необходимости имеющиеся производственные мощности могли бы быть сравнительно быстро увеличены, причем в настоящее время возможно организовать производство этих кабелей на ряде заводов, расположенных в разных районах страны. Для развертывания производства высоковольтных кабелей необходимо собрать и пополнить кадры кабельщиков-высоковольтников, распылившиеся во время войны, и восстановить снабжение кабельных заводов изоляционными материалами должного качества.

Иначе обстоит дело с производством кабельной арматуры. Чем выше напряжение кабеля и чем дешевле его конструкция, тем сложнее становится концевая и соединительная арматура. При переходе на маслонаполненные и газонаполненные кабели арматура становится уже настолько сложной, что ее правильнее называть аппаратурой. Для разрешения задачи упрощения и сокращения времени монтажа соединительных, концевых и стопорных муфт необходимо свести ее к простым сборочным операциям. Эта задача вполне разрешима, но при этом конструкция муфт, а следовательно, и технология их изготовления еще более усложняются.

Для того, чтобы не задерживать развитие кабельной техники, необходимо работы по восстановлению массового выпуска высоковольтных кабелей начать с создания серьезной производственной базы для изготовления кабельной арматуры и аппаратуры.

**Доктор техн. наук,  
проф. М. Д. КАМЕНСКИЙ**

*Ленинградский политехнический институт им. Калинина*

Ставя вопрос о конструкции новых кабелей на 35, 66 и 110 kV, необходимо одновременно обратить внимание и на связанные с соответствующей конструкцией вопросы релейной защиты этих кабелей.

Уместно напомнить о практике релейной защиты Ленинградского 35-kV кабельного кольца. Надо признать, что вполне надежную защиту этих кабелей по системе Липро не удалось полностью наладить до настоящего времени. В связи с ложными действиями защиты при сквозных коротких замыканиях был поставлен ряд исследований, в результате которых сложилось у ряда специалистов убеждение, что неправильное действие защиты вызывается появлением при переходных режимах различного рода паразитных, влияющих на изменение потоков в дифференциальных трансформаторах защиты и создающих токи небаланса. Наиболее надежным способом предотвращения неправильных действий защиты Липро является по мнению указанных лиц включение между реле и трансформатором тока фильтров, запирающих пути высшим гармоническим. Такие фильтры перед войной были установлены для предварительных испытаний, но и они полностью не ликвидировали неправильные действия защиты Липро.

В связи со сказанным заслуживает внимания работа инж. А. Н. Дмитриева [Л. 1], доказывающего, что установка фильтров вообще не может уничтожить ложных действий защиты, так как причиной последних является неправильный подбор отношения числа витков двух обмоток трансформаторов, исходящий только из активных сопротивлений, без учета реактивных. Автор указывает, что токи в жилах кабеля не совпадают по фазе и при нормальной нагрузке, вследствие чего даже в этом случае всегда имеется некоторое количество нескомпенсированных ампервитков и что с изменением нагрузки меняется и угол сдвига между токами. В результате А. Н. Дмитриев приходит к выводу, что сама конструкция кабелей с жилой Липро такова, что она не может не вызывать ложных действий защиты. А. Н. Дмитриев считает поэтому, что для высоковольтных кабелей 35 и 66 kV, которые будут прокладываться в ближайшем будущем, должна быть выбрана конструкция кабелей, принципиально отличная от системы Липро.

**Литература**

1. А. Дмитриев. Процессы в кабеле с расщепленными жилами. Кандидатская диссертация ЛЭТИ, 1946 г.

**Кандидат техн. наук, доц. В. Г. ХОЛМСКИЙ**

*Киевский политехнический институт*

Сооружение кабельных линий 20—35 kV с экономической плотностью тока является вполне возможным, так как для них плотность тока должна быть на 10 и на 25% выше, чем для кабелей 6—10 kV.

Экономические показатели кабелей на 20—35 kV значительно выше, чем у кабелей на 6—10 kV. Изменение расхода проводникового металла и потерь энергии при переходе к высшему напряжению определяется выражениями

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\alpha U_2}{U_1} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} = \frac{U_2}{\alpha U_1}, \quad (2)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — веса меди,  $\Delta A_1$  и  $\Delta A_2$  — потери энергии;  $U_1$  и  $U_2$  — рабочие напряжения;  $\alpha$  — отношение плотностей тока.

Таким образом, при переходе от кабеля 10 kV к кабелю 20 kV получим:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{1,1 \cdot 2}{10} = 2,2 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} = \frac{20}{1,1 \cdot 10} = 1,82.$$

При переходе на 35 kV

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{1,25 \cdot 35}{10} = 4,375 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} = \frac{35}{1,25 \cdot 10} = 2,8.$$

Правда, при напряжениях 20—35 kV становятся заметными диэлектрические потери, но они при этом еще довольно малы и не превышают 10% от напрузочных потерь.

Пропускная способность линии по потере напряжения растет пропорционально квадрату рабочего напряжения и вопросы его регулирования соответственно упрощаются.

Стоимость кабельных линий на 20—35 kV не является чрезмерно высокой и вполне сравнима со стоимостью аналогичных воздушных линий, если учесть, что воздушная линия для глубокого ввода должна быть построена на металлических опорах, с защитными тросами, при пониженном тяжении проводов и двойном их креплении. Конечно, это не снимает вопроса о дальнейшем удешевлении кабельных сетей, особенно за счет рационализации строительных работ и монтажа.

**Доктор техн. наук,  
проф. А. М. ЗАЛЕСКИЙ**

*Ленинградский политехнический институт им. Калинина*

Проф. С. М. Брагин своевременно поднимает вопрос о значении высоковольтных кабельных линий в энергетике крупных городов. К этому нужно добавить, что почти столь же большое значение могут иметь высоковольтные (20—35 kV) кабельные линии в энергетике крупных заводов, таких, например, как Магнитогорский металлургический.

Кроме того, в связи с поставленной в пятилетнем плане задачей реализовать передачу энергии постоянным током, разработка и освоение кабелей на 300—400 kV постоянного тока срочно и насущно необходимы. Дело это должно быть начато немедленно, так как оно может потребовать нескольких лет.

Рассматривая перспективу научных работ по высоковольтным кабелям, необходимо подчеркнуть одну задачу большой важности. На рис. 4 статьи С. М. Брагина нельзя не обратить внимания на огромный удельный вес свинца в конструкции кабеля. Огромные потребные количества свинца могут лимитировать применение кабеля для дальней электрпередачи постоянным током. Замена свинца алюминием или пластмассой радикально облегчит и удешевит транспорт и монтаж кабеля, не говоря уже об экономии в этом случае дефицитного свинца. Необходимо, поэтому заняться изысканием новых легких материалов для замены свинца в конструкции кабеля.

Предлагаемая С. М. Брагиным механизация прокладки кабеля исключительно актуальна, особенно в связи с проблемой передачи постоянным током. Без механизации прокладки кабеля применение его для дальних линий будет затруднено, а между тем оно со многих точек зрения весьма желательно.

Следует остановиться на поставленном С. М. Брагиным вопросе о применении в СССР напряжения 60 kV. Он заслуживает серьезного изучения. Во многих случаях напряжение 60 kV может дать значительно лучшее технически и экономически решение, чем 35 kV, а в некоторых случаях — также лучшее решение, чем 110 kV.

Спорной в предложениях С. М. Брагина является намерение им множественность типов кабеля. Шесть различных типов кабеля — не слишком ли это много? Я полагаю целесообразным и возможным отобрать из этих шести типов максимум три (например, кабель с вязкой пропиткой, маслонаполненный кабель под давлением с упрочненной свинцовой или иной оболочкой и газонаполненный кабель для крутонаклонных трасс). Кстати, укажем на то, что кабель постоянного тока с вязкой пропиткой прекрасно работает на крутонаклонных трассах.



## Эксплуатация, регулирование нагрузки и работа водохранилищ мощного энергообъединения США

(Обзор)

Тихоокеанский северо-запад США представляет собой район с развитой промышленностью (судостроение, авиазаводы, производство алюминия и др.) и широкой электрификацией сельского хозяйства и быта.

В результате слияния энергосистем пяти штатов северо-запада США в 1942 г. было создано мощное энергообъединение. Общая генераторная мощность 294 энергоустановок района достигает 4 млн. кВт. Электросети объединения имеют общую протяженность до 20 000 км. Одна из линий интерконнекции, соединяющая системы штатов Монтана и Юта, имеет длину 440 км (при напряжении 161 кВ). Такими некоторыми показателями энергообъединения, генерирующие узлы и линии передач которого показаны на рис. 1. Образование энергообъединения привело к значительным выгодам в эксплуатации и улучшению экономических показателей. Ввиду несовпадения максимумов нагрузок и поясного времени различных районов удалось сэкономить до 100 тыс. кВт генераторной мощности. Характерным для рассматриваемого комплекса энергоустановок является значительный удельный вес гидроэлектростанций (около  $\frac{4}{5}$  общей мощности электростанций). В объединение входят также гЭС, как Гранд-Кули (полная мощность 1,974 млн. кВт,

современная—0,9 млн. кВт), Бонневиль (518 тыс. кВт), а также Лонг-Лейк, Форт-Пек, Челан и др. Большая протяженность рассматриваемого энергорайона определяет несовпадение водных режимов различных гидроэлектростанций и дает дополнительные преимущества объединенной эксплуатации. При эксплуатации используются наиболее дешевые энергоресурсы в каждый данный момент с учетом дефицитности топлива. Следует отметить, что указанные принципы, однако, не полностью реализованы в энергообъединении: эксплуатация систем имеет особенности, обусловленные стихийным характером капиталистического производства и искажающие оптимум использования энергоресурсов.

Руководство работой объединения осуществляет комитет из представителей энергосистем, оперативное управление возглавляет координационная группа, состоящая из 4 инженеров, обобщающих также исследовательскую работу.

Автоматическое регулирование нагрузки и частоты. Создание сверхмощного энергообъединения выявило необходимость в автоматическом ре-

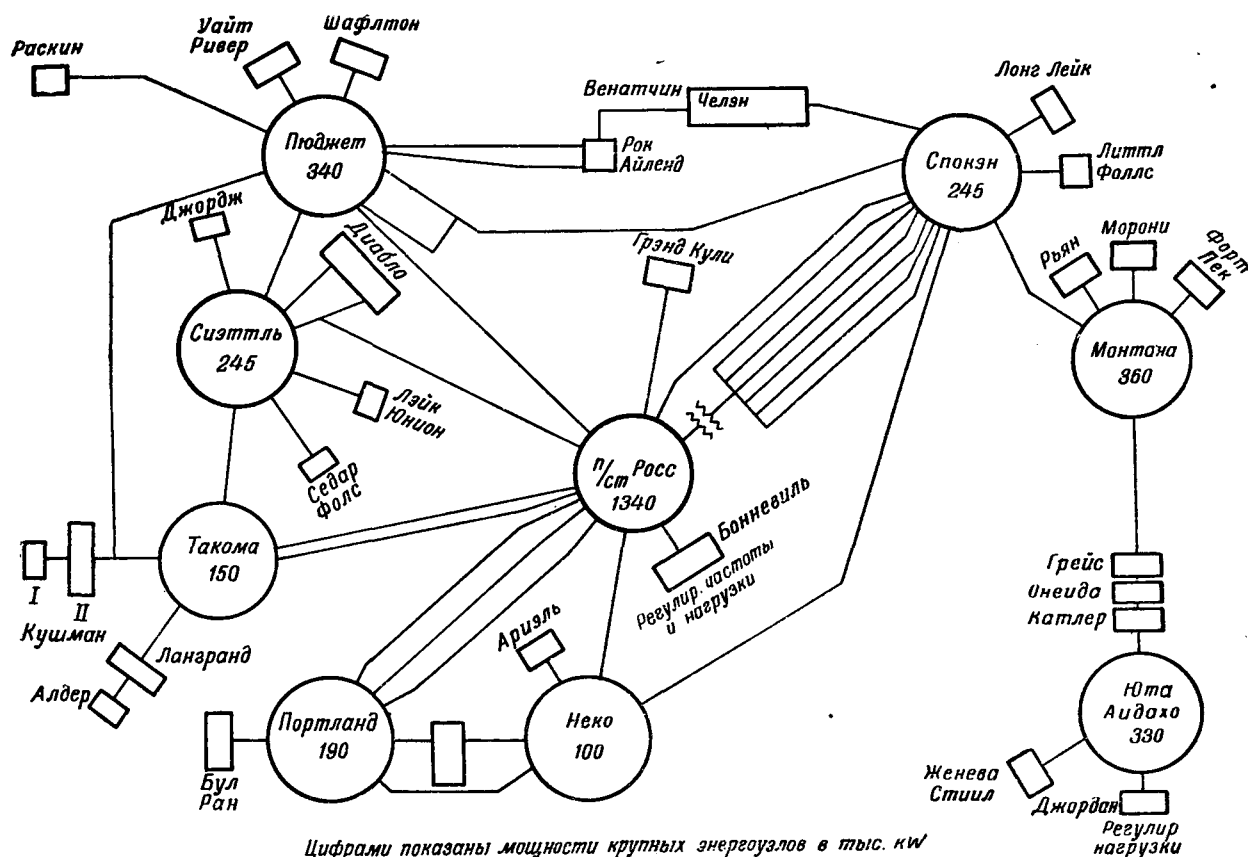


Рис. 1. Схема линий передач и регулирование нагрузок северо-западного энергообъединения США.

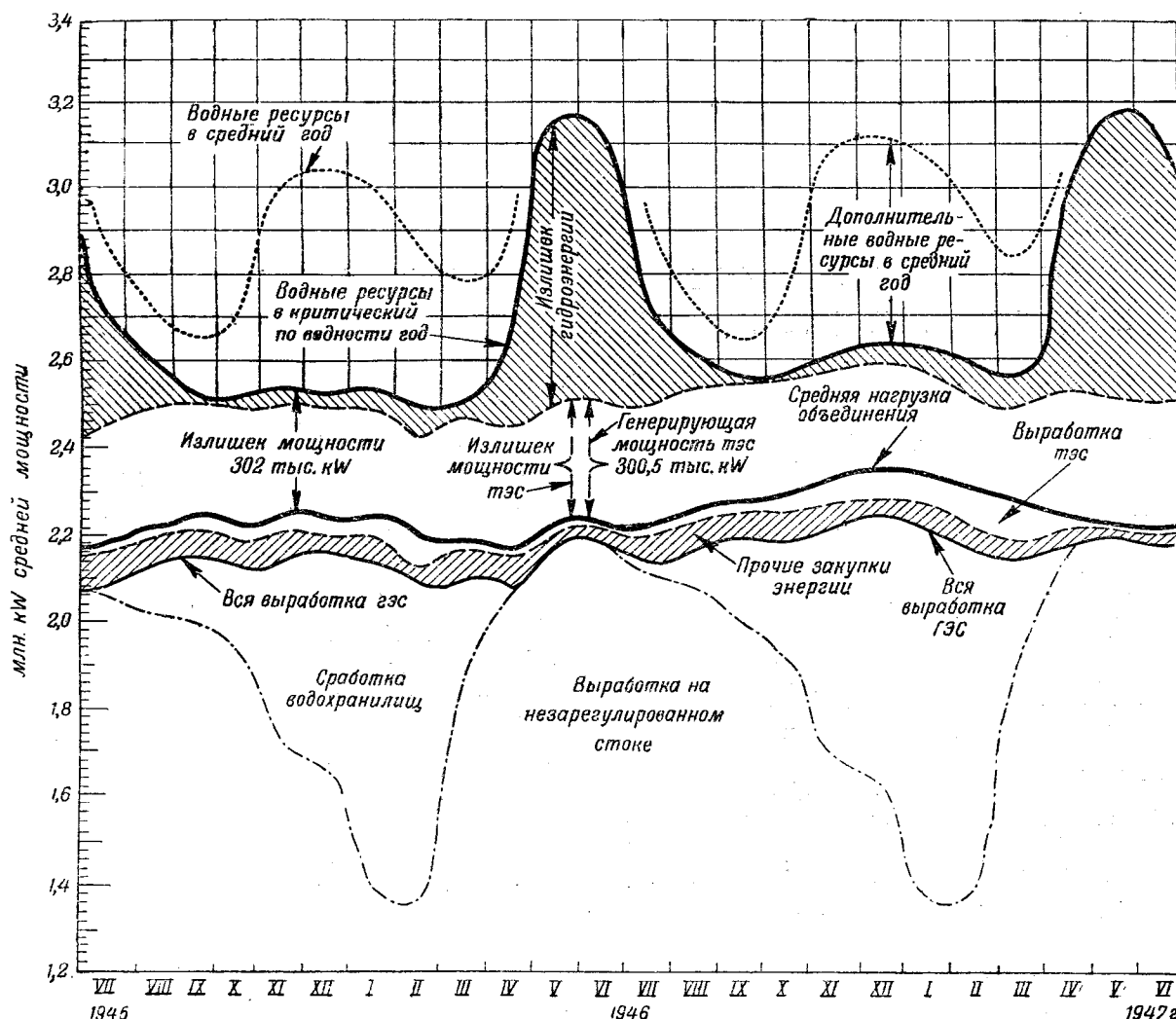


Рис. 2. Средние нагрузки и гидроресурсы в условиях маловодного года по северо-западному энергообъединению.

гулировании нагрузки путем взаимных энергопотоков между системами. Это позволяет одной системе вести частоту для всего энергообъединения при регулировании другими системами нагрузки и участия их в регулировании частоты.

Каждая система связана несколькими линиями с соседними системами. Соединительные линии постоянно включены, чтобы достичь максимальной пропускной способности передачи в различных районах. До введения автоматического регулирования нагрузки в основном корректировались путем регулирования частоты. Системы не могли поддерживать взаимный обмен энергией при наличии телефонной связи и ручного регулирования. В периоды быстрого изменения нагрузок (утренний и вечерний пики, дневной и вечерний провалы) требования к регулированию частоты превышали иногда мощность регулирующих установок и частота отклонялась от стандартной до 0,2 Hz. В радиальных связанных системах ручной контроль неудовлетворителен, а в сетях со сложными и многообразными связями — ручной контроль почти невозможен для диспетчера. При таких условиях средняя передача мощности была относительно низка и имело место недоиспользование пропускной способности линий передач до 50%. После установки телеизмерительной аппаратуры и автоматического регулирования нагрузки диспетчер получил действительную картину нагрузки каждой линии, возможность регулирования ее на расстоянии и поддержания мощности линий в заданных границах во избежание излишних перетоков.

Основой регулирования является телеизмерение на диспетчерском пункте системы перетоков мощности в каждой связи. Затем потоки алгебраически складываются для получения итогового баланса мощностей. Мощности отмечаются графически в диспетчерском пункте. Оттуда непре-

рывно посылаются импульсы к регуляторам турбин на электростанциях по специальным каналам связи. Таким образом, Вашингтонская система производит регулирование с помощью ГЭС Челан или Лонг-Лейк на расстояние 267 км из диспетчерского пункта в Спокэн. Указанная система и система Тихоокеанской компании эксплуатируются как одна система и имеют 9 высокочастотных телеканалов связи, идущих в Спокэн, а также к системам Монтаны, северо-западной электрокомпании, Бонневильского энергоуправления и Пюджетской компании. Последняя в свою очередь осуществляет регулирование энергопотоками через связи с указанными системами и системой Сиэттля путем автоматического изменения отдачи своей ГЭС Вайт-Ривер либо тепловой электростанции Шафтон. Портлендская, Такома и некоторые другие системы также осуществляют автоматическое регулирование нагрузки. Для регулирования применяются регуляторы импульсного типа. В аварийных случаях регуляторы выключаются и затем включаются диспетчером. Для управления автоматическим регулированием на диспетчерских пунктах требуется 60 телеизмерительных каналов связи. Большая часть их работает вдоль существующих линий передач и телефонных линий. Бонневильская система осуществляет регулирование частоты на ГЭС Бонневиль или Грэнд-Кули для всего объединения. Для этой цели выделяется 2 генератора Грэнд-Кули по 108 тыс. кВт, либо 4 генератора Бонневиль по 60 тыс. кВт. В период, когда частоту ведет Грэнд-Кули и имеется излишек располагаемой мощности, Бонневиль работает на регулирование нагрузки линии 230 кВ, идущей к Грэнд-Кули, и покрывает часть изменений нагрузки в соседнем районе Портленда. Нормальная полоса допустимых отклонений частоты примерно равна  $\pm 0,04 \div 0,06$  Hz и редко превышает 0,08 Hz. Соответственно нормальные колебания на установке, регу-



лирующей нагрузку, составляют около 20 тыс. kW. Согласно данным испытаний, требуется около 50 тыс. kW генераторной мощности, чтобы изменить частоту объединения на 0,1 Hz. Опыт показал весьма незначительные колебания частоты даже в случае серьезных нарушений работы объединения. В октябре 1943 г. в результате аварии в соседней системе имел место временный выход из строя 230-kV линии Бонневиль—Такома, передававшей около 200 тыс. kW. Частота в энергообъединении уменьшилась на короткое время всего на величину 1 Hz.

Представляет интерес регулирование нагрузок в связи с колебаниями нагрузки такого потребителя, как металлургический завод в г. Женеве, присоединенный к системе после образования энергообъединения. Пиковые нагрузки двигателей прокатных станов дают колебания порядка 35 тыс. kW в 10 sec. Ввиду того, что колебания нагрузки отражались на частоте системы, были разработаны мероприятия по специальному высокоскоростному автоматическому регулированию нагрузки на паровом турбогенераторе завода в г. Женеве мощностью в 50 тыс. kW.

Автоматическое регулирование стало важной частью эксплуатации энергоустановок, облегчило переоборудование больших потоков мощности между основными системами и позволило использовать потоки энергии для полного использования емкости водохранилищ на гЭС энергообъединения. В настоящее время продолжается работа по техническому совершенствованию автоматического регулирования.

Эксплуатация водохранилищ энергообъединения. Северозападное энергообъединение охватывает 21 водохранилище с общей энергоемкостью порядка 2,75 млрд kWh, включающей такие крупные водохранилища, как Гранд-Кули (1,21 млрд. kWh), Росс (360 млн. kWh) и др. Эксплуатация столь значительных гидроресурсов потребовала тщательного расчета со стороны персонала 11 входящих в объединение энергосистем. Основными принципами эксплуатации водохранилищ являются: а) полное покрытие нагрузки потребителей и б) экономия топлива.

Разработанные диспетчерские графики предусматривают наполнение водохранилищ к 1 июля на основе наименьшего зарегистрированного стока за период наполнения. Водохранилища должны быть наполнены, кроме тех случаев, когда: а) минимальная отдача все же не обеспечивает повышения уровня водохранилища до заданного; б) условия водности могут быть прогнозированы; в) возможность наполнения водохранилищ осуществляется лишь при сверхплановой выработке тепловых электростанций.

В ряде случаев экономичный режим эксплуатации не требует ежегодного наполнения водохранилищ. С другой

стороны, полное водохранилище к концу сработки (в марте) является обычно хуже всего используемым. Запоздывание сработки себя не оправдывает. Приводимые Е. N. Peterson кривые регулирования и баланс мощностей на 1945—1947 гг. (рис. 2) учитывают лишь минимальные требования к наполнению водохранилищ. Около 9% емкости водохранилищ (250 млн. kWh) представляют аварийный резерв энергообъединения.

Наличие дополнительной полезной емкости, получаемой путем регулирования благодаря совместной работе гидро- и тепловых энергосистем, представляет ряд выгод.

Право собственности отдельных систем на водохранилища приводит к неэкономичному использованию водохранилищ. Система — собственник водохранилища и имеет всегда первоочередное право его использования.

В рамках энергообъединения отдельные системы заключают соглашения на сбережение их излишней энергии в чужих водохранилищах. Так, энергосистема штата Юта отдает пиковую мощность своей гЭС Бир-Ривер в западные системы, получая взамен энергию во внепиковые часы и др.

В результате опыта эксплуатации уточнены определенные правила эксплуатации водохранилищ. Системы заранее назначают водохранилища, где сберегается полезная емкость, количество сбереженной воды, последовательность сработки слоев воды, принадлежащих различным владельцам, эквивалент количества воды, выраженный в единицах электроэнергии, условия возврата, отметки водохранилищ, потери и т. д.

Использование водохранилищ для сбережения излишней энергии тепловых энергосистем наталкивается на ограниченную пропускную способность линий передач, а также на ограниченную пиковую мощность гЭС. Одним из факторов, лимитирующих полное использование водохранилищ, является наличие минимальной ночной нагрузки тепловых агрегатов.

В дальнейшей эксплуатации предусматривается пропорциональность в накоплении воды различными водохранилищами, кроме того предусмотрены условия компенсации при чрезмерной сработке отдельных водохранилищ.

### Литература

1. El. World, стр. 59, 4 марта, 1944.
2. El. World, стр. 56, 22 декабря, 1945.
3. El. World, стр. 48, стр. 100, 16 февраля, 1946.

Кандидат техн. наук Б. Л. ЭРЛИХМАН

## Опыт эксплуатации трамвайных вагонов новейшей конструкции США

(Обзор)

С начала текущего столетия до примерно 1925 г. трамвай являлся одним из основных видов городского пассажирского транспорта больших городов США. Однако, уже начиная с 1920 г., а в особенности к 1930 г., трамвай начал заметно утрачивать свое значение, благодаря широкому распространению автобусов и автомобилей.

В целях восстановления утраченного значения трамвая в городских перевозках и развития трамвайных вагонов новейших образцов, обладающих динамическими показателями, близкими к автомобильному транспорту, была образована Комиссия руководителей предприятий городского электротранспорта: Electric Railway Presidents Conference Committee (PCC).

В результате обширных теоретических, лабораторных и эксплуатационных исследований был разработан тип бесшумного быстрого трамвайного вагона. Интересно отметить, что величина предельного ускорения для вагона нового типа определялась в лабораторных условиях с помощью замедленной киносъемки пассажиров, стоящих на специальной платформе, которой сообщались различные по величине ускорения. Исследования показали, что пассажиры могут безболезненно воспринимать значительные ус-

корения, в случае плавного пуска и равномерного изменения величины ускорения.

В 1936 г. промышленности США был выдан первый заказ на 100 трамвайных вагонов нового типа, а к концу 1936 г. новые трамвайные вагоны эксплуатировались уже в 6 трамвайных предприятиях (в том числе: Brooklyn and Queen Transport Corporation, Pittsburg Railway Co и др.). Трамвайные вагоны PCC начали быстро распространяться по США (см. таблицу 1).

Таблица 1

Годы	Число предприятий, эксплуатирующих вагоны PCC	Число вагонов, находящихся в эксплуатации
1936	6	396
1939	14	1 135
1942	16	2 258
1945	21	3 220
1946		4 000 (проект)



Таким образом общее число вагонов нового типа к 1946 г. составило уже около 14% к общему парку трамвайных вагонов США.

Быстрому развитию трамвайных вагонов нового типа способствовало взаимодействие промышленности с эксплуатирующими трамвай предприятиями, осуществляемое American Transit Association через Transit Research Corporation (ATA).

Применение вагонов типа РСС не ограничилось одним трамваем: New-York Rapid Transit Transportation, эксплуатирующая метрополитен в Нью-Йорке, заказала секции метрополитена на базе основных конструктивных элементов вагонов РСС с кузовом из алюминиевых сплавов. Этот опыт создания секций из легких и быстроходных, амортизированных резиной, вагонов с плавным многоступенчатым пуском дал вполне положительные результаты. Опыт применения модифицированного вагона РСС для метрополитена должен получить в США дальнейшее распространение.

Трамвайные вагоны РСС строятся различными фирмами с электрооборудованием General Electric Co и Westinghouse Co.

Современный четырехосный вагон РСС имеет длину в 14 м при: ширине 2,54 м, высоте вагона 3,05 м, базе тележки 1 830 мм, общей базе 6 950 мм и диаметре колес вагона 635 мм. Вагон рассчитан на 53 места для сидения и обеспечивает вместимость при предельном заполнении, включая стоящих пассажиров, 117 человек. Общий вес вагона колеблется, в зависимости от исполнения, и составляет в среднем 15,9 т. При этом вес отдельных элементов оборудования вагонов представляется в следующем виде: кузов — 7 750 кг, тележки, комплектно — 5 700 кг, электрооборудование — 1 840 кг, воздушное и пр. оборудование 610 кг. Относительный вес вагона составляет 270 кг на пассажиро-место.

В целях снижения шума и обеспечения планового хода, в вагоне РСС находят широкое применение резиновые амортизаторы, которые используются как в виде рессор, так и для эластичных колес. В этих колесах применяются мощные резиновые диски, отделяющие диски, на которых насажены колесные ободы, от системы крепления колес на центрах оси вагона. Колеса с двойными резиновыми дисками запрессовываются под давлением 15 900 кг и рассчитаны на восприятие максимального рабочего давления в 2 950 кг, причем прогиб однодюймовой резиновой прокладки достигает 19%.

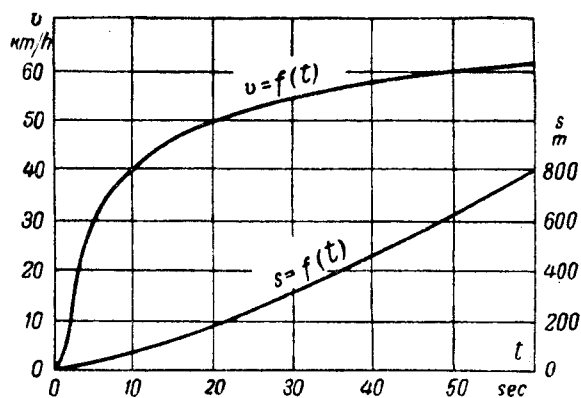
В течение 10 лет эксплуатации вагонов нового типа в США было изготовлено 20 000 подрезиненных колес, срок службы которых определялся в среднем 3 года. Применение амортизированных резиной колес обусловило снижение числа случаев изломов осей в 10 раз. Применение подрезиненных колес обусловило, однако, увеличение сопротивления движению вагона на 2,7 кг/т.

Оригинальной в системе резиновой амортизации вагона является применение резиновых спиральных рессор, воспринимающих вертикальное статическое давление в 1 250 кг. Такие рессоры в процессе изготовления испытываются 50 миллионами толчков при 300 колебаниях в минуту. Срок службы таких рессор достигает 2 лет. В настоящее время рессоры вертикальной амортизации изготавливаются смешанного сталь-резинового типа.

Вагоны РСС оборудуются 4 тяговыми двигателями часовой мощностью по 40,5 kW, при 1 670 об/мин. каждый. Двигатели рассчитаны на рабочее напряжение 300 В и снабжены теплостойкой изоляцией. Вес тягового двигателя составляет всего 327 кг. На вагонах различных исполнений устанавливаются тяговые двигатели как с самовентилирующей, так и с принудительной вентиляцией. Передача тягового усилия от двигателя к оси вагона осуществляется через гипоидную спиральную коническую редукторную передачу с передаточным числом 7,17 : 1.

Процесс пуска происходит автоматически, в зависимости от величины выбранного водителем ускорения. Величина ускорения при пуске может быть установлена в пределах от 0,67 до 2,3 м/сек<sup>2</sup>.

При пуске вагон развивает среднее пусковое ускорение в 2,26 м/сек<sup>2</sup>, причем максимальная величина пускового ускорения не превышает во время пуска 2,5 м/сек<sup>2</sup>. Максимальная скорость вагона на площадке составляет 67 км/ч и 45,5 км/ч на подъеме в 60‰. Вагон обеспе-



чивает максимальную безопасную скорость на спусках в 80 км/ч. Диаграмма пуска вагона дана на рисунке.

При режиме движения с 7-сек остановками при расстоянии между остановочными пунктами около 200 м и временем выезда в 25% от времени хода на перегоне, при среднем ускорении в 1,8 м/сек<sup>2</sup> и тормозном замедлении 2,1 м/сек<sup>2</sup>, вагон РСС развивает скорость сообщения от 16 до 21 км/ч. При увеличении расстояния между остановками до 400 м скорость сообщения возрастает до 32 км/ч.

Схема вагона предусматривает постоянное последовательное соединение тяговых двигателей попарно. Система управления — автоматическая с многоступенчатым коллекторным пуском — имеет 60 пусковых и 100 тормозных позиций. Управление осуществляется от мастер-контроллера с двухпедальным управлением. Предусмотрено наличие коллекторного контроллера диаметром в 750 мм при ширине 460 мм. Элементы пусковых сопротивлений располагаются по внешней периферии цилиндра коллекторного контроллера. Внутри цилиндра коллекторного контроллера имеется круглое контактное кольцо с контактными пластинами, по которым скользят контактные ролики, смонтированные на рычаге, вращаемом от серводвигателя. Величина пусковых и тормозных токов, а следовательно величина пусковых ускорений и тормозных замедлений, контролируется специальным реле, вмонтированным в мастер-контроллер.

На вагонах РСС, как правило, применяется в качестве служебного тормоза электрическое реостатное торможение с пневматическим колесным тормозом, а для экстренного торможения используется еще электромагнитный рельсовый тормоз. В целях избежания нагрева бандажей, вредно отзывающегося на резиновой амортизации колес, воздушное торможение осуществляется не путем нажатия колодок на обод колеса, а на специальные тормозные диски.

Послевоенная модификация вагона РСС предусматривает полный отказ от системы воздушного торможения, в

Таблица

Город	Количество вагонов в эксплуатации	Средний пробег в тыс. км	Увеличение дохода, %	Увеличение средней скорости, %
Baltimore . . . . .	200	272	10	7,6
Chicago . . . . .	83	430	17,5	9,4
Kansas City . . . . .	24	194	35,4	4,3
Los Angeles . . . . .	95	416	11	13,5
New-York . . . . .	100	505	29	6,5
Philadelphia . . . . .	260	147	28	10
Pittsburgh . . . . .	401	420	7,5	6,0
San Diego . . . . .	28	502	16	4,8
St. Louis . . . . .	200	158	20	4,0
Toronto . . . . .	250	336	11	11,5

Примечание: На ряде предприятий наблюдается кроме того снижение на 25% числа несчастных случаев, обусловленных применением вагонов РСС.

целях ликвидации компрессора, являющегося источником шума и увеличивающего вес вагона. Отказ от воздушного оборудования вагона дает снижение веса вагона на 320 kg. В вагонах новейшего образца предусматривается, в качестве служебного тормоза, реостатное торможение и дисковый тормоз с соленоидным приводом. Рельсовый тормоз сохраняется для экстренного торможения. Привод дверей переводится на электромагнитный. В вагонах новейшего образца уделяется еще большее внимание улучшению амортизации колес с применением видоизмененной конструкции тележек. Значительное снижение веса вагона (до 20%) удается достигнуть от почти полного отказа применения легированных сталей в конструкциях кузова, с заменой их алюминиевыми сплавами.

Вагоны новейшего образца обладают, однако, значительным удельным расходом электроэнергии, достигающим 130 Wh/tkm, что обуславливается высокими пусковыми ускорениями и скоростями движения, а также наличием подрезиненных колес и дополнительным расходом электроэнергии на питание рельсовых электромагнитных тормозов.

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### Электропотребление больших нефтепроводов США. *Power*, стр. 71—74, № 2, 1946.

К числу крупнейших потребителей электроэнергии США в период войны принадлежали насосные станции большого нефтепровода Big Inch длиной 2 250 km из труб диаметром 610 mm, а также бензинопровода Little Big Inch длиной 2 500 km из труб диаметром 510 mm. Общее число насосных станций на обоих нефтепроводах равно 58, их суммарная присоединенная мощность 250 000 л. с., среднесуточное потребление электроэнергии 105 млн. kWh, максимальное потребление электроэнергии за месяц 121,5 млн kWh. В течение первого полного года работы обоих сооружений, закончившегося 1 апреля 1945 г., общее потребление электроэнергии составило 1,28 млрд. kWh при среднем коэффициенте нагрузки 0,852 и  $\cos \varphi = 0,894$ .

При суммарном потреблении электроэнергии в США, составившем в 1944 г. около 200 млрд. kWh, потребление нефтепроводов было равно 0,64% от этой величины.

На нефтепроводе Big Inch предусмотрено 27 насосных станций, на каждой из которых установлено по три последовательно включенных насосных агрегата, приводимых трехфазными асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями 1 500 л. с., 2 300 V, 1 800 об/мин. Номинальная производительность насоса в сутки составляет 35 800 m<sup>3</sup> нефти с удельным весом 0,85, при напоре 16,2 ата. Таким образом, производительность каждой насосной станции составляет 35 800 m<sup>3</sup> в сутки при напоре около 50 ата.

На бензинопроводе Little Big Inch предусмотрена 31 насосная станция, на каждой из которых установлено по три последовательно включенных насосных агрегата, приводимых трехфазными асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями 1 250 л. с., 2 300 V, 3 600 об/мин. Номинальная производительность насоса в сутки составляет 28 000 m<sup>3</sup> бензина с удельным весом 0,6, при напоре 17,6 ата. Таким образом, производительность каждой насосной станции составляет 28 000 m<sup>3</sup> в сутки при напоре около 53 ата.

Электрообеспечение насосных станций осуществляется от сетей 19 различных энергообъединений напряжением от 22 до 110 kV. Ввиду одновременного строительства обоих нефтепроводов, хотя и идущих на большей части их длины по одной трассе, каждая из насосных станций имеет собственную монументальную подстанцию, оборудованную одним трехфазным трансформатором мощностью 3 750 kVA с масляным охлаждением.

На 33 насосных станциях, где это допустимо по условиям электрообеспечения, предусмотрен запуск электродвигателей при полном напряжении, а на остальных 25 — через пусковые автотрансформаторы. По мере изменения условий электрообеспечения последние также постепенно переводятся на систему запуска электродвигателей при полном напряжении.

В течение года работы по нефтепроводу было перекачано 13,4 млн. m<sup>3</sup> нефти, а по бензинопроводу 8,7 млн. m<sup>3</sup> бензина, что составляет в сумме 22,1 млн. m<sup>3</sup>. Среднесуточное количество перекачанной нефти составило 36 700 m<sup>3</sup>, а

Несмотря на ряд конструктивных усовершенствований вагона РСС, его стоимость вместо 15 тыс. долларов при прежней конструкции не будет превышать 20 тыс. долларов для вагона новейшего образца.

По данным фирмы Westinghouse к началу 1944 г., эксплуатационные показатели по некоторым городам, в трамвайной сети которых эксплуатируются вагоны РСС, представляются в следующем виде (таблица 2):

Автор отмечает также, что применение стандартных вагонов РСС обеспечило снижение текущих расходов по содержанию и ремонту вагонов.

### Литература

1. H. G. Mc Clean, M. I. Loco. Passenger Transport Journal, стр. 345—354, № 2371, 1945.

2. H. G. Mc Clean, Passenger Transport Journal, стр. 230—239, № 2363, 1945.

3. El. Light and Power, стр. 78—80, ноябрь, 1945.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

бензина 23 800 m<sup>3</sup>. Годовое потребление электроэнергии насосными станциями нефтепровода равнялось 766 млн kWh, а бензинопровода 517 млн. kWh, что соответствует среднесуточному потреблению электроэнергии соответственно в 2,1 и 1,4 млн. kWh. Удельный расход электроэнергии на 1 m<sup>3</sup> перекачанной нефти составил около 57 kWh, а на 1 m<sup>3</sup> бензина 60 kWh. Удельный расход электроэнергии на 1 000 m<sup>3</sup> × km нефти составил около 25 kWh, а на 1 000 m<sup>3</sup> × km бензина 24 kWh.

Ввиду возросшей против проектной потребности в нефти и бензине был осуществлен ряд мероприятий по повышению пропускной способности нефтепроводов, как, например: увеличение размеров рабочих колес некоторых насосов в целях выравнивания гидравлических условий по всей длине нефтепроводов (это привело к необходимости повышения мощности соответствующих электродвигателей); повышение рабочего давления насосных станций нефтепровода до 56 ата (это потребовало увеличения мощности электродвигателей на 10—25%, что было осуществлено путем повышения эксплуатационного напряжения до 2 400—2 500 V).

Последовательная работа как насосных агрегатов на каждой станции, так и насосных станций из каждого нефтепровода вызывает резкое снижение производительности нефтепровода при выходе из строя любого из элементов перекачки. Это обстоятельство предьявляет повышенные требования к бесперебойности электроснабжения. Опыт эксплуатации показал, что, несмотря на ограничения военного времени, приведшие к отказу от строительства резервных линий, трансформаторов и т. п., система электроснабжения и электрооборудование насосных станций работали вполне удовлетворительно.

Эксплуатация нефтепроводов подтвердила возможность перевода протяженных систем с последовательно работающими установками на электропривод даже в случае электроснабжения от нескольких независимых энергообъединений. Преимуществами электропривода являются: меньшая начальная стоимость, надежность оборудования, простота обслуживания и ремонта, возможность автоматизации и дистанционного управления.

Инж. Ю. А. ЯКУБ

### ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

P. Chevalley, E. Eichenberger, Ch. Ehrensperger. Выключатель постоянного тока высокого напряжения. *BBC, Mitt.*, стр. 298—306, № 9, 1945.

Выключатель постоянного тока высокого напряжения станет необходимым при развитии передачи постоянным током высокого напряжения на далекие расстояния, когда появится необходимость иметь ответвления, питающие промежуточные подстанции. В настоящее время линии передачи постоянного тока проектируются без ответвлений и нужна в таких выключателях не ощущается, так как для выключения линии достаточно иметь выключатель на стороне переменного тока выпрямительной станции. В статье

приводятся результаты экспериментов по отключению опытной модели линии передачи постоянным током, показавшие, что быстрое отключение линии со стороны постоянного тока приводит к высоким перенапряжениям. Медленно действующие выключатели или выключатели, в которых процесс отключения происходит ступенями, дают значительно меньшие перенапряжения. Отключение с помощью разъединителя дает примерно такой же результат, как и отключение со стороны переменного тока.

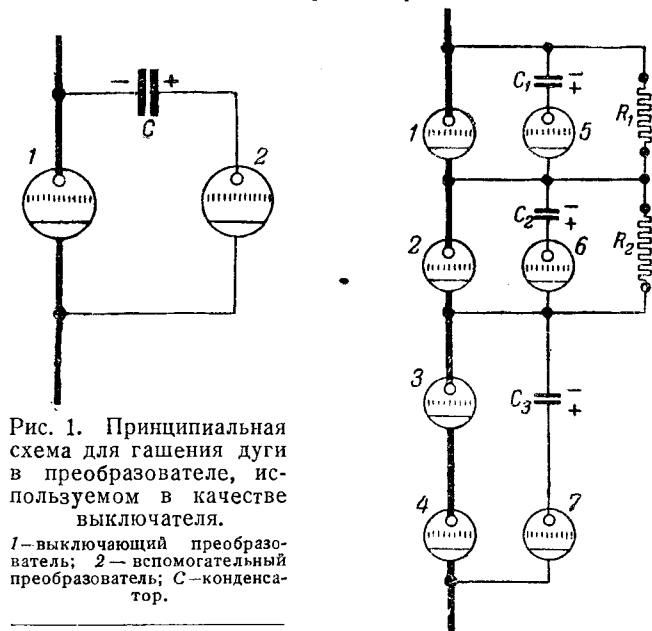


Рис. 1. Принципиальная схема для гашения дуги в преобразователе, используемом в качестве выключателя.

1 — выключающий преобразователь; 2 — вспомогательный преобразователь; C — конденсатор.

Рис. 2. Выключение с помощью преобразователей при ступенчатом гашении дуги постоянного тока.

1, 2 — преобразователи, выключающие вспомогательные сопротивления ( $R_1$  и  $R_2$ ); 3 и 4 — преобразователи, производящие окончательное отключение; 5, 6 и 7 — вспомогательные преобразователи;  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  — гасящие конденсаторы.

Были предложены два метода отключения цепей постоянного тока: с помощью преобразователей тока и с помощью дуговых выключателей. Принцип отключения с помощью ртутного преобразователя состоит в том, что параллельно преобразователю, используемому в качестве выключателя (рис. 1), присоединяется конденсатор C, заряжаемый от вспомогательного устройства. Чтобы погасить ток в преобразователе 1, зажигают преобразователь 2 посредством сеточного управления, и тогда конденсатор разряжается через оба преобразователя, причем его ток разряда, направленный навстречу току преобразователя 1, гасит его, производя отключение линии. Этот процесс происходит чрезвычайно быстро. Однако, в силу того, что постоянная времени разрядной цепи конденсатора мала, возникают колебания с высокими перенапряжениями и поэтому этот способ не может быть использован непосредственно. Отключение несколькими ступенями через сопротивления (рис. 2) устраняет указанные недостатки.

В статье приводится осциллограмма отключения тока 20 А при 20 кВ опытным устройством, из которой видно, что время гашения тока шлейфовым осциллографом не улавливалось. Процесс происходит без колебаний. Авторы приходят к выводу, что постоянный ток любой мощности может быть отключен применением преобразователей и конденсаторов. Вместе с тем, они отмечают, что затраты на такое устройство значительны.

При применении дугового выключателя должна быть поглощена вся электромагнитная энергия отключаемой цепи, либо непосредственно в дуге, либо частично в дуге, частично в сопротивлениях. В статье даны результаты опытов с отключением при помощи сжатого газа. На основании своих опытов авторы приходят к выводу, что возможно построение выключателя из нескольких отключающих элементов. Приводятся результаты испытаний одного такого элемента на отключение тока 4 000 А при 6,6 кВ и 2 000 А при 10 кВ постоянного напряжения. Десять таких элементов позволяют отключать линию при напряжении 100 кВ.

В заключении авторы указывают на возможность комбинации отключения преобразователем и дуговым выключателем так, что преобразователи производят ступенчатое включение сопротивлений в цепь, а окончательное отключение производится дуговым выключателем.

Кандидат техн. наук А. М. МЕЛЬКУМОВ

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

С. М. Slack, L. F. Ehrke, C. T. Zavales. Микросекундная рентгенография. *Westinghouse Eng.*, стр. 28, № 1, стр. 99, № 4, 1945.

Рентгеновский аппарат для микросекундной рентгенографии довольно компактен (монтируется на тележке) и отличается простотой управления. Он состоит в основном из рентгеновской трубки и ударного контура. Особенностью конструкции рентгеновской трубки является наличие вспомогательного (третьего) электрода 1 (рис. 1), расположенного вблизи катода 2 и соединенного с анодом 3 через большое сопротивление. Роль вспомогательного электрода — получение высоких градиентов у катода и зажигание разряда, который затем перебрасывается на анод. Одновременно вспомогательный электрод служит для фокусирования электродов. Анод представляет собой прямоугольную вольфрамовую пластинку с размерами  $25,4 \times 38,1 \times 3,175$  мм<sup>3</sup>. Мощности отдельных импульсов через трубку достигает 600 000 кВт. «Мгновенные» значения разрядного тока через трубку составляют 2 000 А при напряжении в 300 кВ. Для питания трубки применяется ударный контур, состоящий из десяти конденсаторов по 0,04 мкФ, соединенных по схеме Маркса (рис. 2). Конденсаторы заряжаются параллельно через сопротивления около 10 000 Ом до напряжения в 50 кВ. При разряде на рентгеновскую трубку конденсаторы через разрядные промежутки соединяются последовательно.

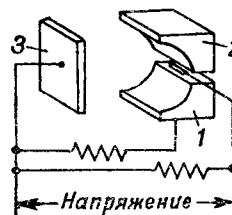


Рис. 1.

Конденсатор  $C_1$  присоединен непосредственно к аноду рентгеновской трубки. Конденсатор  $C_6$  присоединяется к катоду рентгеновской трубки через разрядный промежуток  $P_7$ . Конденсатор  $C_3$  заземлен, а конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  соединены между собой через сопротивление в 10 000 Ом. Металлические корпуса конденсаторов  $C_4$ ,  $C_5$  и  $C_6$  также соединены между собой через сопротивления по 10 000 Ом и присоединены к положительному полюсу трансформаторно-выпрямительного устройства. Разрядники  $P_5$ ,  $P_6$  и  $P_7$  механически связаны и регулируются посредством специального микрометрического устройства, приводимого в дей-

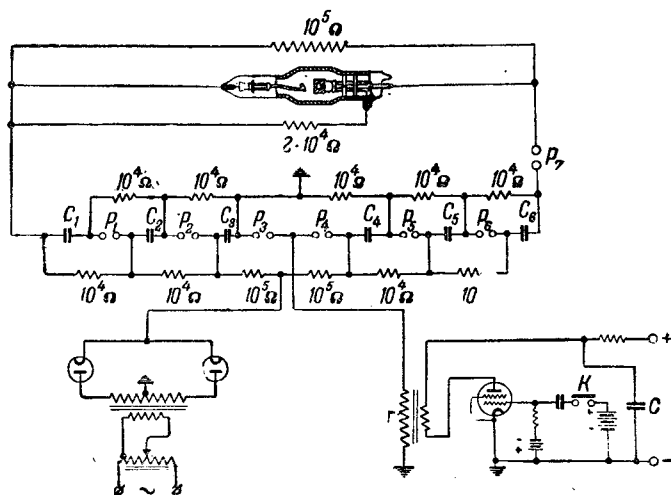


Рис. 2.

ствие с панели управления. Разрядники  $P_1$  и  $P_2$  соединены аналогичным образом и также могут регулироваться микрометрическим механизмом. Разрядник  $P_3$  не регулируется и служит как «спусковой» разрядник, вызывающий срабатывание схемы. Выход вспомогательного трансформатора  $T$  присоединен между разрядником  $P_3$  и землей. Высоковольтный кабель соединяет выход питания конденсатора  $C_3$  и корпус конденсатора  $C$ . Соединения между выходом напряжения и корпусом конденсатора  $C_4$  и изоляционным вводом конденсатора  $C_3$  сделаны через сопротивления в 100 000  $\Omega$ . После зарядки конденсаторов схема готова к действию. При замыкании контактов  $K$  возникает импульс во вторичной обмотке трансформатора, вызывающий пробой разрядника  $P_3$ .

При этом напряжение между этим разрядником и землей повышается, происходит пробой остальных разрядных промежутков и к рентгеновской трубке оказывается приложенным удерживающее напряжение каждого из конденсаторов. Высокое напряжение между катодом и вспомогательным электродом зажигает разряд, быстро перебрасывающийся затем на анод рентгеновской трубки, генерирующей импульс рентгеновского излучения очень высокой интенсивности продолжительностью около одной микросекунды.

В арсенале Frankford проведена большая работа по применению сверхскоростной (микросекундной) рентгенографии, которая была использована при определении давления газа в стволе орудия в зависимости от времени и месторасположения снаряда. Используя микросекундную рентгенографию, можно изучать поведение составных элементов снаряда в процессе его ускорения, взрывание снаряда, пробивание брони, быстрые химические реакции, взаимодействия движущихся частей механизмов и машин и другое неподдающееся визуальному наблюдению явление.

Описываемый аппарат может быть применен также и для импульсной фотографии. Для этого ударный контур разряжается не на рентгеновскую трубку, а на осветительный разрядный промежуток. Происходит яркая вспышка, и фотографирование может производиться обычным фотоаппаратом без специального затвора. В реферируемой статье проводится выполненная по этому методу фотография летящей пули, отличающаяся исключительной четкостью всех деталей.

Инж. И. И. ЗАСЛАВСКИЙ

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СТАНЦИИ, СЕТИ И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

Системы возбуждения больших турбогенераторов. Power, № 3, 1916.

Наметившаяся в течение последних лет тенденция к переходу к мощным быстроходным паровым турбогенераторам ставит под сомнение правильность применения во всех случаях возбuditелей, сидящих на валу турбогенераторов. Переход к отдельностоящим возбuditелям различных типов упрощает фундамент турбогенератора, исключает коллекторы с большими окружными скоростями и допускает обслуживание и ремонт возбuditелей, не затрагивая основной агрегат. Преимущества и недостатки различных систем возбуждения характеризуются таблицей 1.

Преимуществами мотор-генератора по сравнению с возбuditелем, сидящим на валу агрегата, являются: 1) простота и независимость конструкции и возможность установки в любом месте; 2) возможность выбора оптимального числа оборотов генератора постоянного тока; 3) упрощение конструкции и изготовления главного генератора.

В результате опыта эксплуатации и проведенных исследований установлено, что: мотор-генераторный возбuditель, соответствующий запроектированный и удовлетворяющий требованиям надежности современных энергосистем, может быть сконструирован и имеет ряд преимуществ по сравнению с возбuditелем на валу для большинства тепловых электростанций; последнее объясняется применением быстродействующего отключения, интерконнекцией энергосистем, построением электростанций по блочной схеме, созданием усовершенствованных автоматических регуляторов напряжения и т. п.; энергосистемы, применяющие современное оборудование, отдают преимущество мотор-генераторным возбuditелям.

В результате детального изучения работы электронного

Таблица 1

Сравнительные показатели систем возбуждения

Возбуждение от:	Возбуждения с полувозбудителем	Возбуждения без полувозбудителя	Возбуждения с самовозбуждением	Регулируемого возбуждения	Вспомогательного генератора через выпрямитель или мотор-генератор	Вспомогательного шестифазного генератора через выпрямитель	Мотор-генератора	Электронного возбуждения
	1	2	3	4	5	6	7	8
Зависимость возбуждения от аварий в системе	нет	нет	нет	нет	нет	нет	есть	есть*
Возможность пуска агрегата без постороннего источника переменного тока	есть	есть	есть	есть	нет	есть	нет	есть
Возможность подъема напряжения генератора при пуске без постороннего источника постоянного тока	есть	нет	есть	есть	есть	нет	есть	нет
Необходимость смены щеток под нагрузкой при непрерывной работе и отсутствия резервного возбuditеля	есть	есть	есть	нет	есть	нет	есть	нет
Необходимость отключения главного генератора при механических повреждениях возбuditеля	есть	есть	есть	есть	нет	нет	нет	нет
Начальная стоимость	минимальная	повышенная	минимальная	повышенная	повышенная	высокая	повышенная, но менее чем для систем 2, 4, 5	повышенная и более чем для систем 2, 4, 5, 7

\* Можно компенсировать возбuditели и генераторы по системам 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

возбудителя на большом количестве опытов авторы приходят к следующим выводам: 1) электронный возбудитель может рассматриваться как надежный источник возбуждения мощных турбогенераторов; 2) схема питания выпрямителя переменным током зависит от местных условий; 3) электронный возбудитель должен иметь высокое потолочное напряжение или серьезную компенсацию для компенсации толчков в сети переменного тока, имеющих место при нарушениях; 4) электронный возбудитель можно установить в любом месте, он прост в обслуживании, очень чувствителен, легко приспосабливается к условиям регулирования напряжения генератора, но стоит дороже вращающейся машины; 5) замена машинного возбудителя электронным не отражается на работе современных быстродействующих реле, но влияет на работу реле с выдержкой времени большей 1 sec., так как при наличии самовозбуждения ток короткого замыкания затухает скорее; 6) турбогенератор, возбуждаемый электронным возбудителем, может работать изолированно, причем первоначальное возбуждение при пуске может быть осуществлено от аккумуляторной батареи.

Инж. Ю. А. ЯКУБ

**H. A. P. Langstaff, R. E. Lawrence, H. R. Vaughan.** Электронный возбудитель для больших синхронных генераторов. *El. Eng., Trans. ser., 246-253, № 3, 1946.*

Электронные (игнитронные) выпрямители за последнее время успешно применяются в целом ряде отраслей промышленности как надежные преобразователи энергии переменного тока в постоянный. Они также стали применяться в качестве возбудителей на синхронных моторах и компенсаторах. Однако, применение электронных выпрямителей в качестве возбудителей для больших и ответственных синхронных генераторов задерживалось пока из-за опасений, что они могут представлять ненадежное звено в таком ответственном механизме, как большой синхронный генератор.

Недавно на электростанции Springdale, West Penn Power Company был установлен электронный возбудитель для 81 250 kVA турбогенератора. Этот генератор работает в блоке с трансформатором на шине 132 kV. Собственный расход генератора питается от трансформатора собственного расхода, приключенного к генератору. Для повышения надежности питания возбуждения генераторов предусмотрены сборные секционированные шины возбуждения; нормально все секции разомкнуты. При выходе из строя любого из возбудителей имеется возможность подавать возбуждение к генератору с поврежденным возбудителем от резервного возбудителя или других возбудителей через резервную систему шин питания возбуждения. Возбуждение на турбогенераторе 81 250 kVA включено по указанной схеме, причем в качестве основного возбудителя применен электронный возбудитель. Кроме этого имеется еще резервный возбудитель с двойным приводом от электродвигателя и паровой турбины.

Электронный возбудитель. Электронный возбудитель состоит в основном из анодного трансформатора, выпрямителя и цепей регулирования напряжения. Дополнительно имеется вспомогательное оборудование: серийный компенсатор, сеточный трансформатор, вспомогательный трансформатор, предохранители, анодные автоматы обратного тока, катодный автомат, система охлаждения, реле и контрольные приборы. Принципиальная схема возбудителя представлена на рис. 1. Анодный трансформатор включен по схеме треугольник — шестифазная звезда (вторичная обмотка). Первичная обмотка трансформатора имеет два анцапфы, предназначенные для компенсации возможного понижения напряжения в сети. Анцапфы запроектированы из расчета, чтобы возбудитель давал нормальное напряжение возбуждения даже при питающем напряжении в 75% от номинального. Кроме указанного способа устранения влияния уменьшения напряжения, подводимого к возбудителю, применяется токовая компенсация, рассчитанная на компенсацию падения напряжения при начальном значении тока короткого замыкания в 25 000 А (на стороне 132 kV).

Выпрямительный элемент возбудителя делится на три самостоятельные секции. Каждая секция имеет два игнитрона и два тиратрона и работает независимо одна от другой. Аноды каждого игнитрона и тиратрона присоединяются к диаметрально противоположным фазам анодного трансформатора.

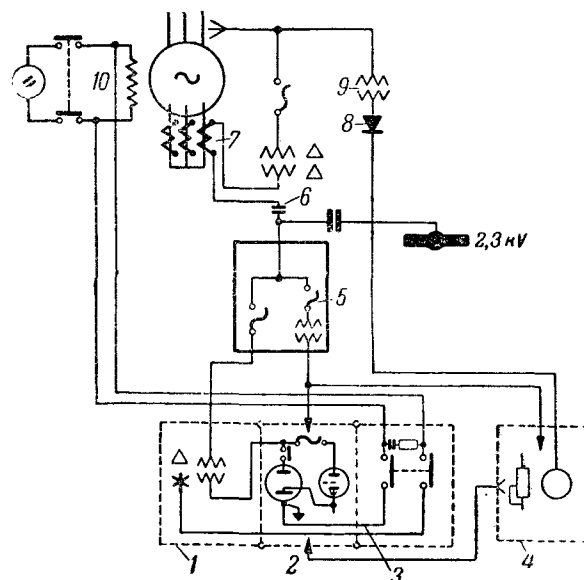


Рис. 1. Принципиальная схема электронного возбудителя. 1—анодный трансформатор; 2—выпрямительный элемент; 3—элемент постоянного тока; 4—элемент управления; 5—вспомогательный трансформатор; 6—контакторы; 7—токовая компенсация; 8—сухие выпрямители; 9—трансформатор напряжения; 10—обмотка возбуждения генератора.

Автоматы обратного тока в цепи анодов игнитронов предназначены для разрыва анодной цепи при обратном зажигании в игнитроне. На этих анодных автоматах обратного тока установлены устройства, обеспечивающие повторное включение их. Каждый автомат имеет блокировку от включения его в случае выключения секции для производства ремонта в ней.

Выпрямитель может нормально работать на двух секциях в течение двух часов и на одной секции только в течение одной минуты.

Элемент управления возбудителем состоит из приборов регулирования питания возбудителя, сеточного регулятора напряжения, который изменяет запаздывание зажигания тиратронов. Зажигание тиратронов, а следовательно и игнитронов регулируется смещением волны сеточного напряжения тиратрона посредством подачи на сетку регулируемого постоянного смещающего напряжения. Запаздывание зажигания регулируется в пределах от 0° до 120°. Смещающее отрицательное напряжение на сетках тиратрона регулируется посредством регулятора напряжения (прямого действия). Подвижный якорь регулятора замыкает и размыкает контакты, присоединенные к секциям реостата, изменяющего напряжение на сетке. Положение якоря регулятора определяется напряжением на обмотке регулятора, которая питается через сухие выпрямители типа Rectox от измерительного трансформатора напряжения, включенного на междупазовое генераторное напряжение. В том же элементе находится катодный 1 200 А автомат, на котором установлена блокировка от его выключения при нагреве нитей накала и реле, обеспечивающие присоединение питания накала и сеточного трансформатора в случае исчезновения напряжения к другому источнику энергии.

В систему водо-воздушного охлаждения входят: моторная водоопомпа, радиатор, вентилятор и реле контроля температуры и интенсивности протекания охлаждающей воды.

Перед установкой возбудитель проверялся в лаборатории на двух параллельно работавших синхронных генераторах 20 000 kVA, причем испытания были максимально приближенными к действительным условиям эксплуатации. Проведенные испытания показали, что электронный возбудитель обеспечивает высокую скорость восстановления напряжения генератора при самых тяжелых условиях (после отключения короткого замыкания или одновременного включения нагрузки составляющей 60% от номинальной). Характеристики, показывающие работу регулятора в указанных условиях, приведены на рис. 2 и 3. Установлено также, что токовая компенсация такого возбудителя не требуется.

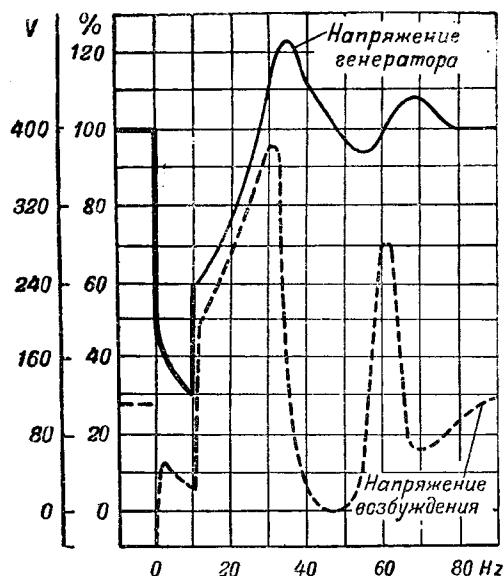


Рис. 2. Изменения напряжений при коротком замыкании.

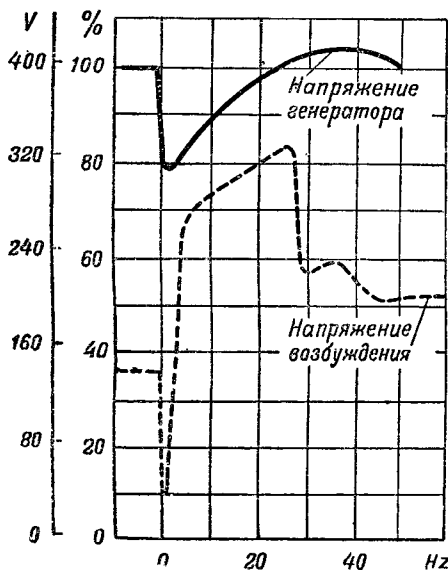


Рис. 3. Изменения напряжения при включенной 60% мощности.

Следует отметить, что у нас в Союзе ВЭИ разработал и применил установку с самовозбуждающимся синхронным генератором для небольших передвижных электростанций (Электричество, № 1, 1946). Возбудитель, примененный ВЭИ, построен на сухих выпрямителях. Применение электронных возбудителей для более мощных синхронных генераторов представляет определенный практический интерес.

Инж. С. П. ИНОЗЕМЦЕВ

R. W. Holman. Новая установка для гибкой связи сетей разной частоты. *El. World, emp.* 112—116, № 15, 1946.

На металлургическом заводе введена в промышленную эксплуатацию установка для гибкой связи электрической сети 25 Hz с сетью 60 Hz мощностью в 6 670 kW. Часть цехов завода питается от заводской сети 25 Hz, генерирующая мощность которой превышает 200 000 kW. Остальные цехи получают энергию от районной сети 60 Hz примерно такой же мощности. На станциях сети 25 Hz используются в качестве топлива доменный газ и другие отходы производства. В период малой электрической нагрузки на заводе часть этих газов бесполезно терялась.

Перед заводом встала задача связать между собой обе сети, с тем чтобы улучшить использование машин 25 Hz, выравнять график потребления энергии из районной сети (что давало бы заводу при существующем тарифе значительную экономию) и, наконец, обеспечить нормальное питание потребителей 25 Hz при ремонтах или авариях турбогенераторов заводской сети. Жесткая связь сетей, например через синхронный мотор-генератор, была исключена из-за больших колебаний частоты в заводской сети, доходящих до  $\pm 6\%$ . Было решено связать обе сети гибко через выпрямитель и инвертор.

Характерной особенностью этой преобразовательной установки явилось стремление использовать почти без изменений стандартное оборудование выпрямительных подстанций обычного типа, в частности, электротяговых. В соответствии с этой тенденцией связь сетей была осуществлена на весьма низком напряжении — 1 750 V постоянного тока. Выпрямитель и инвертор установлены в одном и том же здании. Для выпрямления и для инвертирования использованы по два 12-анодных ртутных выпрямителя, отличающихся от стандартных только применением одновольных управляющих сеток специальной конструкции, обеспечивающих повышенную четкость управления в инверторном режиме. Питающие трансформаторы 25 и 60 Hz соединены по схеме Кюблера. Особое внимание уделено предотвращению и быстрой ликвидации нарушений инверторного режима. Для этой цели были осуществлены следующие мероприятия: 1) в цепь постоянного тока, связывающую выпрямитель с инвертором, были включены по два мощных реактора реактивной мощностью по 15 мН. Реакторы уменьшают скорость нарастания тока при нарушениях нормальной работы инвертора (пропусках зажигания анодов и т. п.). Это позволяет инвертору во многих случаях возобновить нормальную работу уже через один период после нарушения; 2) если предотвратить «опрокидывание» инвертора не удалось, быстродействующая сеточная защита выпрямителя обеспечивает прекращение на несколько периодов протекания тока через цепь постоянного тока, после чего нормальная работа инвертора беспрепятственно восстанавливается; 3) если и эта мера не дала нужного результата, цепь постоянного тока разрывается быстродействующим выключателем. В качестве выключателя применен обычный шестиполосный анодный автомат, все полюса которого включены в цепь постоянного тока последовательно. Применен следующий метод выключения: первые три полюса отключаются один за другим с промежутками в полпериода и вводят в цепь токоограничивающие сопротивления. Затем остальные три полюса отключаются одновременно и рвут цепь. Такой выключатель гасил токи до 10 000 А за три периода.

Первоначально, несмотря на принятые меры, инвертор работал недостаточно надежно. После внесения ряда конструктивных и схемных изменений число аварийных отключений удалось снизить до 1—2 в месяц.

Регулирование передаваемой мощности производится автоматическим воздействием на сетки выпрямителя. Для этой цели каждый выпрямитель снабжен быстродействующим электронным регулятором. Регулятор может либо поддеживать заданную нагрузку преобразователя, либо автоматически контролировать величину получасового потребления энергии заводом из районной сети. От колебаний частоты в обеих сетях передаваемая мощность не зависит. В нормальных условиях поток энергии направлен через преобразователь из сети 25 Hz в сеть 60 Hz, однако это направление потока энергии может быть изменено на обратное. В будущем предусмотрена возможность увеличения пропускной способности связи до 20 000 kW.

Кандидат техн. наук Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

G. V. Planer, F. F. Planer. Углеродистые сопротивления высокой стабильности. *Electronic Engineering, emp.* 66—68, 97, № 217, 1946.

Непроволочное сопротивление (резистор) угольно-керамического поверхностного типа представляет собой керамический стержень (или трубку), на поверхности которого осажден тонкий слой углерода. Осаждение достигается при



пиролитическом разложении углеводородов, испаряющихся в вакууме или в атмосфере инертного газа. Такие сопротивления изготавливаются в СССР [Л. 1] и в других странах [Л. 2]. Практика показала преимущество резисторов данного типа по сравнению с рядом других типов непроволочных резисторов, в отношении стабильности сопротивления во времени, малого температурного коэффициента сопротивления, малого коэффициента по напряжению и малой э. д. с. шумов.

В реферируемой статье приводятся характеристики и данные по технологии резисторов, изготавливаемых английскими фирмами. Углерод, пиролитически отложенный на поверхности керамики (стеатита или фарфора) имеет кристаллическое строение, большую твердость, весьма чист и химически инертен. Удельная проводимость его равна

$$0,33 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{\Omega \cdot \text{см}}, \text{ тогда как обычный графит дает } 1 \dots 1,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{\Omega \cdot \text{см}};$$

температурный коэффициент сопротивления пиролитического углерода равен:  $-3 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ \text{C}$ , а графита:  $-8 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ \text{C}$ . Температурный коэффициент линейного расширения пиролитического углерода около  $5 \cdot 10^{-6}$  на  $1^\circ \text{C}$ . Температурный коэффициент сопротивления готовых непроволочных резисторов данного типа обычно лежит в пределах:  $-(0,02 \div 0,07)\%$  на  $1^\circ \text{C}$ ; он зависит не только от температурного коэффициента сопротивления углеродистого слоя, но и от соотношения температурных коэффициентов линейного расширения углерода и керамики. Поэтому подбором типа керамики можно снизить температурный коэффициент сопротивления. В зависимости от режима пиролиза можно получать слой углерода разной степени дисперсности. Крупнозернистый углерод имеет пониженное удельное сопротивление и положительный температурный коэффициент сопротивления; химическая стабильность его хуже, чем у мелкозернистого углерода. Для получения углерода в мелкодисперсном состоянии надо вести пиролиз при температурах порядка  $900 \div 1100^\circ \text{C}$ .

Большой интерес представляет непрерывный метод науглероживания фарфоровых стержней. Стержни автоматически проталкиваются через кварцевую трубку, нагретую до указанной выше температуры, и в раскаленном состоянии омываются смесью азота с парами углеводорода (метана); углерод, выделяющийся при разложении углеводорода, высаживается на поверхность фарфоровых стержней. В статье приведены схемы двух установок непрерывного действия. Непрерывный метод более экономичен, чем обычно применяемый непрерывный вакуумный метод науглероживания, дает более равномерное покрытие и позволяет легче получать нужные значения сопротивления слоя на стержнях, с меньшим разбросом от заданного значения.

Для получения высоких сопротивлений на поверхности науглероживаемых стержней шлифуется спиральная канавка, превращающая угольный слой в спиральную ленту. После нарезки на стержень монтируются выводы с применением контактной пасты малого сопротивления, после чего производится лакировка. Для защиты от механических повреждений на готовый резистор надевается полихлорвиниловая трубка. Если требуется обеспечить высокую влагостойкость (работа в тропических условиях), то резистор герметически запаивается в стеклянную трубку.

В статье дано также описание нового метода изготовления объемных резисторов. Ранее объемные резисторы изготавливались прессовкой из порошка, полученного спеканием углерода, наполнителя (тальк, кварц, асбест) и связующего (полистирол, бакелит). При этом величина сопротивления регулировалась содержанием углерода в порошке. Для получения высоких сопротивлений приходилось сильно снижать содержание углерода, в результате чего в готовом образце частицы углерода оказывались в значительной степени разобщенными частицами наполнителя и смолы. Это сильно затрудняло получение заданных номиналов сопротивления и ухудшало качество готовых резисторов. Новый способ получения объемных резисторов характеризуется тем, что частицы наполнителя (кварц) покрываются тонким

слоем углерода путем пиролитического разложения углеводородов; к полученному этим путем науглероженному кварцевому порошку добавляется небольшое количество связующего вещества и полученная смесь прессуется. При этом получается резко уменьшенный разброс значений сопротивления образцов, отпрессованных из одной и той же партии порошка, и облегчается получение заданных номиналов; регулировку последних можно вести изменением толщины углеродистого слоя на поверхности кварцевых зерен. Качество резисторов также улучшается, так как даже при высоких значениях сопротивления удается обеспечить непрерывный контакт углеродных слоев по всей длине отпрессованного стерженька. Прессованные стержни объемных резисторов снабжаются выводами, как и в случае резисторов поверхностного типа, и лакируются или помещаются в защитную керамическую трубку.

Нашей промышленности следует освоить непрерывный процесс науглероживания в производстве резисторов поверхностного типа и производство нового типа объемных непроволочных резисторов.

### Литература

1. В. Т. Ренне. Непроволочные сопротивления поверхностного типа. Бюллетень электропромышленности Ленинграда, стр. 13, № 8, 1945.

2. F. C. Carter. The Production of Fixed Carbon Resistors. Post Off. El. Eng. J., стр. 6, № 1, 1943.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

Конденсаторы с пленочным диэлектриком. *PIRE, cmp, 68-A, № 11 и с. пр. 70-A, № 12, 1-45; Electronics, cmp. 318. № 1. 1946.*

Фирма Condenser Products Co выпускает конденсаторы нового типа Plasticon (Plastic Film Condenser) с диэлектриком из синтетической пленки, пропитанные силиконом. Указывается, что при рабочем напряжении 10 kV объем таких конденсаторов в 8 раз меньше объема бумажных конденсаторов. Конденсаторы относительно большей емкости (до  $0,1 \mu\text{F}$ ) изготавливаются в герметизированных металлических корпусах прямоугольного или цилиндрического типа, а малой емкости — в стеклянных трубках с посеребренными концами, к которым припаиваются с торцов выводные металлические колпачки. Конденсаторы «пластикон» рассчитаны на работу в широком температурном интервале от  $-60$  до  $+125^\circ \text{C}$  (изменение емкости в этом интервале температур не превосходит 10%) и рекомендуются для применения при повышенных рабочих температурах.

Фирма Aircraft Marine Products также выпускает высоковольтные конденсаторы с диэлектриком из синтетической пленки. Они запрессовываются в специальную пластмассу в виде прямоугольных пластин небольшой толщины ( $1,5 \div 12 \text{ mm}$ ). Конденсаторы этого типа изготавливаются с емкостью от  $0,0016$  до  $0,05 \mu\text{F}$  для рабочего напряжения от 3 до 15 kV. Сообщается, что они имеют вес и объем на 25% меньше, чем у любого другого типа конденсаторов с аналогичными номинальными данными. Пленка допускает применение высокой рабочей напряженности поля без появления короны. Поэтому конденсаторы изготавливаются с большим рабочим напряжением без применения последовательного соединения секций и без заливки маслом. Конденсаторы рассчитаны на работу в диапазоне температур от  $-60$  до  $+100^\circ \text{C}$ . Максимальные размеры конденсаторов этого типа:  $154 \times 154 \times 12,8 \text{ mm}^3$  (на  $0,05 \mu\text{F}$ , 3 kV); минимальные размеры:  $77 \times 25 \times 1,6 \text{ mm}^3$  (на  $0,00167 \mu\text{F}$ , 3,5 kV). Эти конденсаторы рекомендуются для радиолокационного оборудования.

Современный опыт по изготовлению конденсаторов с диэлектриком из синтетических пленок следует учесть в нашем конденсаторостроении. Необходимо поставить вопрос перед химической промышленностью о налаживании выпуска в рулонной форме таких пленок с требуемыми характеристиками.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ



## Всесоюзная научно-техническая сессия по электрическим машинам в Ленинграде

В ноябре 1946 г. в Ленинграде происходила Всесоюзная научно-техническая сессия по электрическим машинам, организованная секцией электрических машин Всесоюзного инженерно-технического общества энергетики совместно с Министерством электропромышленности СССР.

В работах сессии принимало участие около 600 чел., в том числе 336 делегатов, прибывших из 60 городов Советского Союза; среди делегатов были представители: 20 министерств, Академии наук СССР, электротехнических заводов, научно-исследовательских институтов, проектных организаций и вузов.

На сессии было заслушано 58 докладов по различным вопросам электромашиностроения и аппаратостроения, теории электрических машин, теории электропривода и вопросам современной технологии.

На сессии работали следующие секции: секция электрических машин под председательством доктора техн. наук проф. А. Е. Алексеева, секция аппаратуры и электропривода под председательством доктора техн. наук В. К. Попова, секция теоретических вопросов под председательством заслуженного деятеля науки и техники, доктора техн. наук проф. Г. Н. Петрова, секция трансформаторостроения под председательством лауреата Сталинской премии инж. С. И. Рабиновича, секция асинхронно-синхронного каскада под председательством доктора техн. наук, проф. Д. В. Васильева и секция корабельных машин и приводов под председательством инж.-подполковника кандидата техн. наук доц. И. Р. Фрейдзона.

Во вступительном слове председатель Правления ВНИТОЭ член-корр. Академии наук СССР проф. М. А. Шателен подчеркнул значение сессии и своевременность ее созыва.

С докладом от Министерства электропромышленности СССР выступил член коллегии министерства, начальник Главэлектромашинопрома инж. А. И. Бертинов на тему «Современное состояние и задачи советского электромашиностроения в четвертой пятилетке».

На пленарных заседаниях были также заслушаны доклады: академика А. Ф. Иоффе «Достижения современной физики», главного инженера завода «Электросила», лауреата Сталинской премии проф. Д. В. Ефремова «Современное крупное электромашиностроение», главного технолога завода МЭП А. В. Шаниро «Новое в технологии изготовления электрических машин», главного конструктора Московского трансформаторного завода, лауреата Сталинской премии инж. С. И. Рабинович «Современное трансформаторостроение», заместителя начальника технического отдела Министерства электростанций СССР кандидата техн. наук И. А. Сыромятникова «Требования министерства электростанций к электромашиностроительной промышленности» и доктора техн. наук, проф. В. К. Попова на тему «Электрические машины и аппараты в современном электроприводе».

На объединенных заседаниях секций электрических машин, трансформаторостроения и электропривода были заслушаны доклады: «Электрические машины и аппаратура для черной металлургии» инж. Б. А. Левитанского, «Повышение к. п. д. трансформаторов и двигателей» доктора техн. наук, проф. Г. Н. Петрова и доктора техн. наук проф. Ю. С. Ченета, «Расход цветных металлов и потери мощности в электрических системах»

проф. П. Г. Грудинского и «Серия электрических машин для тяжелых режимов работ» инж. Г. С. Витенберга.

В представленных докладах были широко отражены вопросы проектирования и эксплуатации современных электрических машин. В состоявшейся дискуссии работники заводов охарактеризовали мероприятия, намечаемые заводами для повышения надежности и экономичности выпускаемых машин.

Представители министерств электростанций, черной металлургии, авиационной промышленности и др. представили ряд замечаний о работе машин в эксплуатации и высказали соответствующие пожелания.

В докладах и прениях постоянно отмечалось, что многие недочеты, наблюдающиеся в электрических машинах, объясняются недостаточным внедрением высококачественных изоляционных материалов и низким качеством щеток для электрических машин.

Доклады проф. Г. Н. Петрова и проф. Ю. С. Ченета были посвящены вопросу о повышении к. п. д. трансформаторов и двигателей. Эти доклады рассматривались в неразрывной связи с докладом проф. П. Г. Грудинского о расходе цветных металлов и потерях мощности в электрических системах. Из обмена мнениями выяснилось, что правильным путем повышения к. п. д. трансформаторов и двигателей является прогресс на пути использования более совершенных материалов, более совершенной технологии и рационального проектирования.

Задание на новую серию стандартных асинхронных машин широкого потребления разработан с учетом этих положений, как это было положено членом коллегии Министерства электропромышленности СССР инж. А. И. Бертиновым.

Доклады лауреата Сталинской премии кандидата техн. наук Е. Г. Комара, лауреата Сталинской премии инж. А. С. Еремеева и лауреата Сталинской премии инж. Н. П. Иванова осветили вопросы о новых конструкциях турбо- и гидрогенераторов, намеченных к постройке в ближайшие годы на наших ведущих заводах. Уникальный характер уже выпущенных заводами крупных машин значительно поднимает уровень советского электромашиностроения.

Эксплуатация наших крупных машин на электростанциях показала, что крупные электрические генераторы являются достаточно надежными. Необходимо дальнейшее усовершенствование возбуждателей.

Были отмечены мероприятия электропромышленности по унификации основных узлов гидрогенераторов различных мощностей, что позволило в короткий срок развернуть значительный выпуск гидрогенераторов.

Инж. И. Н. Рабинович в своем докладе остановился на сравнении электрических машин для крупных прокатных станов, выпускаемых заводом «Электросила» им. Кирова, с машинами известных фирм.

Главный инженер Гидроэлектропроекта Б. К. Александров и доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев выступили с докладом на тему «Основные конструктивные особенности гидрогенераторов водосливных электростанций».

Доклады кандидата техн. наук В. М. Калитвянского и лауреата Сталинской премии доктора техн. наук проф. К. А. Андрианова были посвящены обзору новых электрических изолирующих материалов, освоенных в Советском Союзе, но еще не нашедших промышленного распространения. В прениях по этим докладам была отмечена настоятельная необходимость расширения выпуска новых электроизоляционных материалов.



Были заслушаны также доклады «Опыт восстановления крупных электрических машин и схем управления» инж. Б. М. Эпштейна «Современное турбогенераторостроение в Англии» инж. Л. Я. Станиславского, «Аппаратура водородного охлаждения» инж. Д. С. Итенберга.

На секции электроприводов и аппаратуры было заслушано 10 докладов, из которых доклады инженеров Н. А. Тищенко, М. М. Бразголь, кандидата техн. наук С. Ф. Березниковского и доктора техн. наук, проф. Д. П. Морозова рассматривали вопросы электроприводов металлургической промышленности и вопросы электропривода прокатных станов.

Инж. Н. А. Тищенко в своем докладе рассмотрел задачи, которые ставятся перед электроприводами механизмов доменного, мартеновского и прокатного цехов, с точки зрения наилучшего осуществления производственного процесса, и показал, в каких направлениях должны совершенствоваться электродвигатели и аппаратура для осуществления интенсивного процесса и автоматизации.

В докладах инж. М. М. Бразголь и кандидата техн. наук С. Ф. Березниковского были рассмотрены современные схемы электроприводов реверсивных прокатных станов с использованием систем непрерывного управления и регулирования с помощью амплидинов, регулосов и рототролей. В докладах была отмечена необходимость дальнейшего развития методов управления и регулирования реверсивных прокатных станов с использованием машин регулирования.

В докладе инж. Д. И. Шапиро было кратко изложено современное состояние и направление развития электроприводов в станкостроении с кратким суммированием требований к электродвигателям и аппаратуре.

Доклады инж. В. В. Гиршберга и А. В. Мозалевского были посвящены вопросам современного состояния производства аппаратуры автоматического пуска и регулирования для электроприводов, а также вопросам производства низковольтной аппаратуры на заводе «Электросила». В докладах была выявлена необходимость дальнейшего форсированного развития производства аппаратуры и внесены уточнения по номенклатуре этих аппаратов.

Кандидат техн. наук В. В. Солодовников доложил о разработанном им методе частотных характеристик для анализа переходных режимов следящих приводов. Метод дает возможность оценивать качество регулирования по построению приближенных характеристик переходных процессов. В прениях выступили доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, рассмотревший возможности использования для напряженных режимов работы в системе Леонарда форсирования скорости регулирования магнитных полей возбудителей; кандидат техн. наук Р. Л. Эттингер, остановившийся на перспективах применения ртутных выпрямителей для приводов прокатных станов; инж. В. С. Тулин, давший общую характеристику современного состояния горных электроприводов для шахтных подъемников, врубовых машин и других механизмов горной промышленности.

Заседание секции асинхронно-синхронного каскада было посвящено рассмотрению автоматических схем управления электроприводом вентиляторов мощных аэродинамических труб и рассмотрению входящих в такой привод электрических машин.

Кандидат техн. наук Н. А. Моносзон рассмотрел возможные системы мощных машин, входящих в асинхронно-синхронный каскад. Были изложены варианты видоизмененного каскада Шербиуса, Кремера и другие варианты. Доктор техн. наук, проф. В. К. Попов и доцент В. Г. Дранников доложили разработанную кафедрой электроприводов Ленинградского политехнического института им. Калинина совместно с ВНИТОЭ автоматическую схему управления мощным вентилятором аэродинамической трубы. Кандидат техн. наук Одинцов и кандидат техн. наук Л. В. Корнюшин описали схему автоматического управления асинхронно-синхронным каскадом, разработанную кафедрой электроприводов ЛЭТИ, совместно с ВНИТОЭ.

Кандидат техн. наук доц. Л. Н. Грузов доложил разработанные им вопросы устойчивости асинхронно-синхронного каскада. Теоретические данные подтверждены экспе-

риментами, произведенными в лабораториях ЛЭТИ и ВЭТА.

На теоретической секции были заслушаны следующие доклады: доктора техн. наук, проф. Л. Р. Неймана «Типы преобразовательных устройств для передачи энергии постоянным током и основные электромагнитные процессы в них», заслуженного деятеля науки и техники доктора техн. наук, проф. В. А. Толвинского «Опыт обобщенного физического рассмотрения электрических машин и построениях научной классификации и терминологии», инж. Е. Я. Казовского «Переходные режимы асинхронных машин при включениях и коротких замыканиях», кандидата техн. наук, доцента С. М. Фертника «Механические преобразователи сильного тока», кандидата техн. наук, доц. Н. П. Ермолина «Коммутация крупных машин постоянного тока» и проф. А. Я. Бергера «Некоторые вопросы теории и проектирования электрических машин».

Кроме этих докладов на секции были сделаны сообщения: кандидата техн. наук М. И. Земляного «Серия амплидинов ВЭИ» и кандидата техн. наук С. В. Крауза «Работы ВЭИ по реактивным катушкам с подмагничиванием постоянным током».

Перечисленные доклады и сообщения вызвали широкое обсуждение.

На трансформаторной секции были заслушаны доклады лауреата Сталинской премии инж. А. М. Чертина «Защита современных трансформаторов от перенапряжений», кандидата техн. наук Л. М. Шницера «Нагрузочная способность масляных трансформаторов», кандидата техн. наук Э. А. Манькина «Трансформаторное оборудование мощных выпрямительных установок», кандидата техн. наук Б. Б. Гальперина «Новые материалы—основа прогресса трансформаторостроения».

В прениях отмечалась необходимость повышения к. п. д. выпускаемых трансформаторов, необходимость освоения производства сухих негорючих трансформаторов, освоения выпуска комплектных подстанций и др.

В работе секции корабельных машин и электроприводов принимали участие свыше 150 специалистов военно-морского флота, электропромышленности, судостроительной промышленности, промышленности Министерства вооружения и научно-исследовательских институтов и организаций. На секции было заслушано 16 докладов, по которым выступило в прениях свыше 30 чел.

Секция заслушала доклады «О перспективах развития оборудования кораблей» инж.-капитана 2 ранга Л. В. Шадеева, «Современное состояние электрооборудования кораблей иностранного флота», инж.-капитана 2 ранга А. О. Луккен — «Особенности корабельных машин», кандидата техн. наук инж.-подполковника И. Р. Фрейдзона — «Особенности корабельных аппаратов», инж.-капитана 3 ранга И. И. Андрианова — «Современное состояние и перспективы развития электрооборудования артиллерийских кораблей», инж. Н. Н. Чистякова и др.

Кроме того, была заслушана серия докладов по современному состоянию и перспективам технического развития Министерством электропромышленности производства машин и электроаппаратов для флота.

На сессии были также заслушаны доклады по электрическим машинам для авиационной промышленности доктора техн. наук, проф. Б. П. Апарова, по силовым следящим системам корабельных приводов — кандидата техн. наук В. А. Скулябина, по вопросам электродвижения корабля на переменном токе — инж. Л. Я. Станиславского и кандидата техн. наук Б. Н. Алексеева и другие доклады.

В прениях выступили инж. А. И. Бертинов, осветивший основные технические перспективы развития электрооборудования для флота, инж.-подполковник В. И. Говорухин и др.

В ряде выступлений подчеркивалась необходимость при разработке общепромышленных серий машин и аппаратов учитывать потребности флота с тем, чтобы машины и аппараты для флота являлись только модификацией общепромышленного исполнения. Было признано, что важнейшим

элементом в проектировании и конструировании электрооборудования кораблей должна быть всемерная стандартизация и унификация как элементов оборудования, так и механизмов, схем и комплектов устройств.

На заключительном пленарном заседании сессии выступил заместитель министра электропромышленности СССР Г. В. Алексенко, сообщивший, что заводы министерства уже восстановили значительную часть довоенной номенклатуры и достигли некоторых успехов с точки зрения новой техники. Г. В. Алексенко, однако, признал, что производственная мощность и технический уровень электромашиностроения еще отстают от растущих требований, предъявляемых к электропромышленности народным хозяйством. К концу пятилетки электропромышленность должна увеличить выпуск продукции в два раза по сравнению с 1940 г. Производство турбо- и гидрогенераторов, крупных несерийных машин должно быть увеличено в три раза. В 1947 г. выпуск основных видов изделий по электромашиностроению должен превзойти довоенный.

Выступивший на пленарном заседании сессии председатель Всесоюзного бюро секции электрических машин ВНИТОЭ инж. Е. Я. Казовский доложил о работе секции электрических машин ВНИТОЭ и сообщил решение Всесоюзного бюро секции электрических машин и президиума Правления ВНИТОЭ о расширении состава Всесоюзного бюро. В состав Всесоюзного бюро секции электрических машин вошли: доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев, член коллегии Министерства электропромышленности СССР инж. А. И. Бергинов, инж. А. А. Булгаков (ХЭМЗ), лауреат Сталинской премии инж. Н. П. Иванов (завод Министерства

электропромышленности), лауреат Сталинской премии кандидат техн. наук Е. Г. Комар (завод «Электросила»), инж. Е. Я. Казовский, член-корреспондент Академии наук СССР, доктор техн. наук, проф. М. П. Костенко, доктор техн. наук Р. А. Лютер, лауреат Сталинской премии инж. С. И. Рабинович (Московский трансформаторный завод), инж. А. И. Рабинович (завод «Динамо»), кандидат техн. наук И. А. Сыромятников (Министерство электростанций) кандидат техн. наук, инж.-подполковник, доц. И. Р. Фрейдзон.

В резолюциях сессии отмечаются достижения в области восстановления электромашиностроения в послевоенные годы, в том числе в области создания крупных гидрогенераторов, турбогенераторов и высоковольтных трансформаторов. Наряду с этим отмечается, что ряд серий электродвигателей не удовлетворяет потребителей, главным образом в отношении эксплуатационной надежности и экономичности. Отсутствуют многие типы машин и аппаратов, нужных народному хозяйству страны. Возбудители турбогенераторов, выпускаемые отечественными заводами, обладают в ряде случаев недостаточной надежностью. Технология производства на электромашиностроительных заводах во многих процессах требует решительного улучшения.

Сессия отметила, что отставание некоторых смежных отраслей промышленности, отсутствие промышленного производства новых электроизолирующих материалов, электротехнических сталей повышенного качества и качественных электромагнитных щеток тормозит техническое перевооружение советского электромашиностроения и задерживает его подъем на более высокий технический уровень.

К. Е.



## ДИССЕРТАЦИИ

### Всесоюзный электротехнический институт

В ученом совете ВЭИ защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период июнь—декабрь 1946 г.:

Г. Н. Рохлин защитил 18 июня 1946 г. диссертацию на тему: «Тепловые процессы в ртутных разрядах сверхвысокого давления».

Официальные оппоненты: проф. Н. А. Никитин, кандидат техн. наук А. М. Шемяев.

Значительное внимание уделено термической теории и экспериментальной методике определения температуры дуги и дано расширение законов подобия на шаровые лампы сверхвысокого давления, а также предложен новый метод определения температуры в ртутных дугах сверхвысокого давления, основанный на измерении интенсивности непрерывного фона. Дается описание разработанной методики измерения инерционных свойств дуги, основанной на кратковременном периодическом выключении разряда и приводятся результаты измерения. Приведены результаты определения тепловых потерь в шаровой лампе СВДШ-250. Измерено распределение температуры по поверхности колбы и выводов, а также вдоль электродов лампы. На основе этих измерений определена величина не только суммарных тепловых потерь лампы, но и отдельно потери через верхний и нижний электроды, колбу и оценена величина конвекционных потерь. Для определения теплоотдачи с поверхности лампы в воздух применен метод Ленгмюра, основанный на существовании так называемого застойного слоя в непосредственной близости от поверхности нагретой лампы. Конвекционные потери определены, исходя из неравномерности в нагретой и нижней половине лампы. Дано описание экспериментов по свободному падению лампы СВДШ-250, позволивших установить влияние конвекции на оптические и электрические характеристики разряда. Установлено, что при устранении конвекции происходит: 1) значительное расширение светящегося канала, особенно его внешних частей (возрастание полуширины на 25—30%); 2) падение средней яркости до 0,8 начального значения; 3) рост градиента яркости до 12% и 4) уменьшение пика зажигания. Дано объяснение найденных зависимостей.

И. Г. Кесаев защитил 18 июня 1946 г. диссертацию на тему: «Проводимость разрядных промежутков в стадии деионизации».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф. В. Л. Грановский, кандидат техн. наук, проф. И. С. Джигит.

Исследуется изменение послеразрядной проводимости газа после импульсного высокочастотного разряда, происходящего между плоскими электродами в гелии, неоне, аргоне, водороде и воздухе. Измерения проводимости осуществляются с помощью малых импульсов напряжения высокой частоты, накладываемых на электроды после разряда в различные моменты времени. Как показали измерения, приобретаемая газовым промежутком в результате разряда проводимость может быть разложена на активную и реактивную составляющие, величины которых уменьшаются с течением времени. При этом, уменьшение активной составляющей протекает быстрее, вследствие чего проводимость разрядников по отношению к току высокой частоты, при больших временах деионизации, носит преимущественно характер реактивной проводимости. Эта реактивная проводимость, обусловленная значительным увеличением емкости разрядника в присутствии ионизированного газа. Восстановление непроводящего состояния разрядников протекает быстрее при высоких давлениях газов. Особенно быстро восстановление происходит в случае водорода и воздуха. Обнаруженные закономерности обсуждаются и оцениваются с точки зрения теории деионизации газов. Показывается, что путем соответствующего выбора конструктивных данных разрядника время восстановления непроводящего состояния может быть сделано меньшим, чем  $10^{-5}$  сек.

А. М. Бронштейн защитил 2 июля 1946 г. диссертацию на тему: «Гашение дуги твердым газогенерирующим дугогасителем в высоковольтных коммутационных аппаратах».

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Л. И. Сиротинский, доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, кандидат техн. наук А. И. Долгинов.

На основе экспериментального исследования отключающей способности цилиндрических газогенерирующих каналов малого диаметра со свободным и закрытым выходом для газов произведен критический обзор опубликованных в печати теорий гашения дуги твердым дугогасителем. Показано, что ни скорость спада давления, ни охлаждение столба дуги предельным потоком газа, выдвигаемые этими теориями как основные условия гашения дуги, не являются основными факторами, обеспечивающими деионизацию и гашение дуги. Исследования процесса роста сопротивления дугового промежутка, проведенные путем одновременной записи катодным осциллографом напряжения и тока в дуговом промежутке вблизи прохода тока через нуль, показали, что быстрый рост сопротивления дугового промежутка начинается приблизительно за  $100\text{--}200\text{ }\mu\text{с}$  до прохода тока через нуль и к моменту прохода тока через нуль сопротивление достигает величины порядка  $1\,000\text{--}5\,000\text{ }\Omega$  (для отключаемых токов до  $400\text{ А}$ ). Решающее значение на процесс изменения сопротивления имеет интенсивность газогенерации в течение нескольких сот микросекунд после прохода тока через нуль. Интенсивность газогенерации во время переходного процесса зависит, главным образом, от запаса тепловой энергии в газогенерирующей трубке и может увеличиваться за счет энергии, выделяющейся в остаточном дуговом столбе во время переходного процесса. Количество энергии, выделение которой обеспечивает гашение дуги, названо критической энергией дуги. Экспериментальные измерения энергии, выделяющейся в течение последнего полупериода дуги, показали, что между средней критической мощностью за полупериод и разрываемой мощностью имеется прямо-пропорциональная зависимость для отключаемых токов до  $200\text{--}300\text{ А}$ . Средняя критическая мощность при гашении дуги в цилиндрических трубках малого диаметра равна  $8\text{--}10\%$  разрываемой мощности. Эти данные показали, что способ гашения дуги в газогенерирующем канале путем растяжения дуги до критической длины может применяться эффективно только при отключении малых токов. Для отключения больших токов предложена дугогасительная камера, гашение дуги в которой производится поперечным потоком газа, предварительно накапливаемого в свободном объеме дугогасительной камеры. Экспериментально показано, что такие дугогасительные камеры способны отключать ток до  $20\,000\text{ А}$  при напряжениях  $6\text{ и }10\text{ кВ}$ . В заключительной части диссертации приводятся описание и характеристики высоковольтных коммутационных аппаратов—разъединителей мощности и выключателей—с твердым дугогасителем.

**А. В. Стукачев** защитил 2 июля 1946 г. диссертацию на тему: «О некоторых вопросах методики расчета импульсных генераторов».

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Л. И. Сиротинский, кандидат техн. наук Л. И. Иванов.

Возможность рассмотрения при проектировании внутренних колебаний импульсного генератора (особенно многоступенчатых на напряжение выше  $3\,000\text{ кВ}$ ) представляет весьма трудную задачу, которая, однако, не могла быть успешно разрешена, так как численные значения паразитных емкостей, входящих в этом случае в схему замещения и определяющихся пространственным расположением элементов конструкции импульсного генератора, аналитически определены быть не могут. Импульсный генератор рассматривается в качестве схемы с распределенными постоянными, для которой закон изменения напряжений во времени в наивысшей точке импульсного генератора описывается линейным дифференциальным уравнением 4-го порядка в частных производных, интеграл которого получен в виде спектра затухающих во времени гармоник. Излагается способ приближенного нахождения величин паразитных емкостей с помощью соответствующей модели и импульсного генератора, контрольные замеры на модели существующего трехмиллионного импульсного генератора ВЭИ показывают допустимость подобного рода измерений на моделях. Анализируются условия аperiodичности разряда импульсного генератора, представленного схемой с распределенными постоянными, причем наличие численных значений всех констант, входящих в расчетную схему замещения, позволяет установить величину демпфирующего сопротивления, необходимую для подавления внутренних колебаний проектируемого восьмимиллионного импульсного генератора. Вы-

бор надлежащей величины демпфирующего сопротивления должен производиться не только на основании удовлетворения условиям демпфирования внутренних колебаний, но также исходя из требований отсутствия внешних колебаний, т. е. колебаний, возникающих в системе импульсного генератора. Дается вывод приближенных формул, которыми надлежит пользоваться при анализе влияния различных параметров, входящих в схему замещения импульсного генератора, на форму волны, фронт волны, хвост волны, коэффициент искажения волны и коэффициент использования импульсного генератора. Кроме того, дается выражение для нахождения оптимального значения рабочей емкости импульсного генератора, позволяющего получить максимальный коэффициент использования при заданных условиях проведения эксперимента там, где это необходимо, указаны допустимые пределы применения рекомендуемых приближенных формул.

**Ф. А. Бугаева** защитила 9 июля 1946 г. диссертацию на тему: «Исследование резонансного излучения в люминесцентных лампах».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф. П. В. Тимофеев, доктор техн. наук, проф. А. П. Иванов.

В работе исследуются характеристики резонансного излучения в газовом разряде, происходящем в чистых парах ртути и в смеси паров ртути с аргоном. Разряд в смеси паров ртути с аргоном используется в люминесцентных лампах, как источник ультрафиолета, возбуждающего люминофор. Исследовались не только характеристики излучения, падающего на стенки разрядной трубки, но и их генерация излучений в объеме газового разряда. Для этой цели разработана экспериментальная методика применения люминесцирующих зондов в данных условиях. В результате измерений с люминесцирующими зондами получены объемные характеристики излучения: 1) распределение объемной плотности излучения по сечению разряда; 2) распределение радиальных потоков излучения (вектор Пойнтинга); 3) распределение дивергенции потока излучения или, что то же, распределение источников по сечению разряда; 4) эффективные длины свободного пробега фотонов. Полученные результаты дают наглядную картину оптических процессов, происходящих в плазме разряда, и отражают специфические особенности диффузии излучения в газе. Следует указать, что удалось раздельно исследовать объемные свойства обеих резонансных линий ртути. При этом

обнаружено различие в поведении линии  $1\,849\text{ Å}$  и  $2\,537\text{ Å}$  находится в согласии с соотношением атомных констант для этих линий. Путем сопоставления ряда экспериментов с люминофорами и селективными фильтрами было установлено, что в возбуждении люминофоров кварцевыми лампами низкого давления играет существенную роль линия  $1\,849\text{ Å}$ . После исследования излучения, входящего из кварцевых ламп, были проведены измерения уже непосредственно на внутренней стенке разрядной трубки при условиях разряда, соответствующих режиму люминесцентных ламп. Эти измерения показали, что примерно  $50\%$  светового потока люминесцентных ламп обусловлено действием линии  $1\,849\text{ Å}$ . Этот результат противоречит установившейся ранее в литературе точке зрения, согласно которой люминофор в люминесцентных лампах возбуждается практически только линией  $2\,537\text{ Å}$ . Учет роли линии  $1\,849\text{ Å}$  приводит к значительному повышению принципиального предела светотдачи люминесцентных ламп.

**В. Л. Савицкий** защитил 19 ноября 1946 г. диссертацию на тему: «Одноанодные ртутные выпрямители конструкции ВЭИ».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов, кандидат техн. наук М. Д. Трейвас.

Отмечаются преимущества и недостатки одноанодных ртутных выпрямителей в сравнении с выпрямителями многоанодной конструкции. Рассматривается работа двух типов выпрямителей: а) РМНВ— $200\times 6$  на  $1\,000\text{ А}$  при напряжении  $600\text{ В}$ ; б) РМНВ— $500$  на  $2\,500\text{ А}$  при напряжении  $825\text{ В}$ . Выпрямителей этих типов изготовлено более  $30$  штук. Значительная часть  $1\,000\text{-амперных}$  выпрямителей работает на шахтных подстанциях Подмосковского бассейна, обслуживая электросвободу откатку В расчетной части

дается расчет катода, анода, потерь в ртутнике и вакуумной системы. В последней части работы сообщаются итоги эксплуатационных испытаний на подстанции Метрополитена, на которой работали два ртутных выпрямителя: опытный на 2500 А и ртутный выпрямитель типа РМНВ—500×6, более поздней конструкции. По сравнению с ртутным выпрямителем РВ-40, являющимся основным типом на Метрополитене, отмечаются большие преимущества разработанной конструкции как в отношении к. п. д. перегрузочной способности, так и меньшего габарита, веса и легкости серийного производства. На основе проведенной работы ставятся задачи по дальнейшему развитию мощных ртутных выпрямителей.

**В. И. Калитвянский** защитил 19 ноября 1946 г. диссертацию на тему: «Электроизолирующие материалы на основе асбеста и цемента».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук Г. И. Сканава, доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, лауреат Сталинской премии, доктор техн. наук, проф. К. А. Андрианов.

Показано, что бурное развитие электроаппаратуры и автоматического электропривода потребовало применения новых электроизолирующих материалов для дугогасительных камер, а также панелей и щитов автоматических станций контроля и управления. Дано описание развития асбцементных электроизолирующих материалов (непротитанных и пропитанных) в Союзе и за границей. Показано влияние исходных материалов, в особенности асбеста, и технологических факторов на механические и электрические свойства асбцементов. Критически рассмотрены основные рецептуры, а также технологические процессы, применяемые при изготовлении электроизоляционных асбцементных плит и фигурных изделий и методы пропитки асбцементов с целью получения влагостойкого и теплостойкого электроизолирующего материала. Рассмотрены физические, механические и электрические свойства асбцементных электроизолирующих материалов, а также специфические методы их испытания. Приведено описание основных областей применения пропитанного и непропитанного асбцементов в электротехнических конструкциях (в СССР и за границей), основные требования, предъявляемые к асбцементным электроизолирующим материалам, сформулированные диссертантом на основе анализа условий работы асбцементов в электроаппаратах низкого напряжения, с учетом технологических и экономических факторов. Описаны работы В. И. Калитвянского по исследованию заграничных образцов электроизоляционного асбцементов, созданию советского электроизоляционного асбцементов и улучшению его свойств, пропитке асбцементов с целью получения влагостойкого, теплостойкого и недорогого электроизолирующего материала, а также по созданию нового электроизолирующего материала—битуминизированного асбцементов по методу автора.

**Т. С. Савинков** защитил 10 декабря 1946 г. диссертацию на тему: «Исследование механических переходных процессов электроприводов графическим методом».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, кандидат техн. наук И. И. Петров.

Изложены основные принципы графического метода Т. С. Савинкова в применении к решению задачи, когда график статических моментов механизма задан в функции времени. Кроме того, даны упрощенные способы построения графиков нагрузки двигателей с шунтовой характеристикой при работе на пиковую нагрузку при больших маховых массах электропривода. Приведен пример практического применения графического метода при исследовании горизонтально-ковочной машины АЯКС. Дано изложение графического метода в применении его к решению задач электроприводов, у которых график статических моментов задан в функции пути или угла поворота кривошита, но при этом приведенные маховые моменты привода остаются постоянными. В этом случае метод рассматривается для приводных двигателей как с шунтовой, так и серийной характеристикой. Рассмотрено применение графического метода к решению механических переходных режимов электроприводов с изменяющимися статическими моментами сопротивления в функции угла поворота, при переменных приведенных маховых массах электропривода. Одним из основных

преимуществ графического метода является то, что для каждого участка времени, на котором производится построение, составляется динамическое равновесие, при котором определяются значения одновременно всех переменных величин. Такая связь переменных дает возможность широкого практического применения графического метода.

**С. А. Зусмановский** защитил 10 декабря 1946 г. диссертацию на тему: «Разборные мощные генераторные лампы».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф. П. В. Тимофеев, доктор физико-математических наук, проф. Б. Н. Кларфельд.

Разработка 500 kW разборной лампы стала возможной после ряда разработок мощных отпаянных и нескольких типов разборных ламп, проведенных в лаборатории под руководством диссертанта. Содержанием диссертации является расчет, конструирование и испытание 500 kW разборной лампы. Дан краткий исторический обзор развития конструкций мощных ламп и сравнение эксплуатационных свойств ламп, отпаянных и разборных. Описываются существующие конструкции иностранных и отечественных разборных ламп. Дан расчет, описание конструкции и результаты испытания 500 kW лампы. Кроме того, приведен краткий расчет и основные данные разработанной диссертантом 750 kW генераторной лампы, рассмотрены условия дальнейшего повышения мощности разборных ламп, особенности путей пролета электронов в мощных лампах и их влияние на работу ламп при сверхвысоких частотах.

**И. Л. Рубинштейн** защитил 17 декабря 1946 г. диссертацию на тему: «Улучшение коэффициента мощности в выпрямительных установках».

Официальные оппоненты: действительный член Академии наук УССР, проф. С. А. Лебедев, кандидат техн. наук Г. А. Ривкин.

Рассматривается вопрос об ухудшении коэффициента мощности при регулировании напряжения ртутных преобразователей при помощи управляющих сеток. Анализируются факторы, влияющие на коэффициент мощности: ухудшение формы кривой первичного тока и сдвиг фазы основной волны тока по отношению к напряжению. Даны методы улучшения коэффициента мощности путем увеличения числа фаз преобразовательной установки и сужения пределов регулирования сетками. Рассматривается метод искусственной коммутации анодных токов, дающий возможность получения коэффициента мощности, равного единице, или опережающего сдвига в питающей сети; схемы искусственной коммутации с введением коммутирующей э. д. с. на стороне постоянного тока и применение переходных анодов как наиболее оптимальных. Трехфазная схема искусственной коммутации в выпрямительном режиме, а также анализ токов и напряжений и расчетные данные для отдельных элементов схемы; случай бесконечной индуктивности в цепи выпрямленного тока и отсутствия индуктивности рассеяния в анодных цепях; трехфазная схема Греча с искусственной коммутацией в выпрямительном режиме и применение схемы для передачи энергии постоянным током высокого напряжения. На основе анализа токов и напряжений определяются углы коммутации, емкость коммутирующего конденсатора, расчетная мощность трансформатора и другие параметры основных элементов схемы. Выводятся соответствующие расчетные формулы. Результаты расчетов сопоставляются с опытными данными, полученными на опытной установке с металлическим пипитроном. Проводится сравнительный расчет компенсации реактивной мощности при помощи статических или вращающихся компенсаторов и с помощью искусственной коммутации.

Резюмируются положительные стороны и недостатки метода искусственной коммутации анодных токов и указываются вопросы, подлежащие дальнейшему исследованию.

**И. М. Гуревич** защитил 17 декабря 1946 г. диссертацию на тему: «Межатомные соударения в парах ртути».

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф. П. В. Тимофеев, доктор физико-математических наук, проф. Г. В. Спивак.

Подробно описываются эксперименты диссертанта, ко-

которые с очевидностью приводят к установлению факта существования метастабильных атомов в оптически возбужденных парах ртути. Эти эксперименты были проведены на основе предложенного И. М. Гуревичем метода разделения фотоэлектрического тока и тока, вызываемого метастабильными атомами, состоящим в фильтрации резонансного излучения слоем ртутного пара переменной плотности и непосредственного измерения прозрачности слоя с помощью люминесцирующих экранов. В соответствии с условиями, определяемыми основной идеей эксперимента, была разработана экспериментальная трубка, представляющая также и самостоятельный интерес как селективный фотоэлемент для резонансной линии ртути 2537 Å. Была изготовлена и исследована ртутно-кварцевая капиллярная

лампа—наиболее интенсивный из известных в настоящее время источников резонансного излучения 2537 Å с узкой и малообращенной линией испускания. Рассмотрены процессы генерации и уничтожения метастабильных атомов в объеме и на поверхности электродов экспериментальной трубки, причем здесь использованы приближенный метод расчета распределения возбужденных атомов в поглощающем сосуде, предложенный Л. М. Биберманом, а также совместно с Б. М. Яворским рассчитана квантово-механическими методами вероятность вырывания электронов из поверхности металла метастабильными атомами ртути.

Кандидат техн. наук **И. С. КУНЦ**  
ученый секретарь Совета ВЭИ



## Томас Альва Эдисон

### К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

11-го февраля с. г. исполнилось сто лет со дня рождения знаменитого изобретателя Томаса Альвы Эдисона. Он прожил 84 года, из которых около 70 лет были им проведены в напряженной, неутомимой работе изобретателя, конструктора и технолога. Деятельность Эдисона развернулась в разных областях техники, но наиболее значительные работы его относятся к электротехнике.

В течение многих десятилетий имя Эдисона было одним из наиболее популярных в мире. В нашей стране имя Эдисона пользуется заслуженным уважением.

Деятельность Т. А. Эдисона может быть разделена на три периода. Первый—от начала его самостоятельной работы до 1876 г. Это—период молодости Эдисона, как изобретателя, время накопления опыта и выработки творческих методов. В эти годы Эдисон прославился, как выдающийся телеграфный оператор. Прожив несколько лет в разных городах в качестве телеграфиста, Эдисон поселился в Бостоне, а затем в Ньюарке, где полностью отдал себя изобретательству. Счетчик голосов, аппарат—указатель биржевых курсов, пишущая машинка мимеограф, электрическое перо, начало изысканий в области телефонии, усовершенствование дуплексной и квадруплексной телеграфии—вот итоги работ этого периода. Производственные мастерские Эдисона в Ньюарке строили изобретенные им приборы по заказам: здесь началась деятельность Эдисона, как предпринимателя.

Масштаб работ Эдисона постепенно так расширился, что ни относительно скромная лаборатория в Ньюарке, ни мастерские при ней не могли обеспечить его творческих планов. Эдисон переезжает в 1876 г. в Менло-Парк и создает там большую лабораторию. Здесь он жил и работал до 1887 г. Этот—второй период—был периодом расцвета его деятельности.

Здесь Эдисон усовершенствовал телефон Белла, введя в схему его действия индукционную катушку и угольный микрофон. Телефон заговорил громко и отчетливо, дальность передачи при этом заметно возросла. Позже Эдисон в Менло-Парке построил говорящий телефон (электромотограф), изобрел фонограф. Здесь были им сделаны выдающиеся работы в области электрического освещения. Используя принцип устройства лампы накаливания, ранее примененный и опробованный (в 1872—1873 гг.) нашим замечательным соотечественником А. Н. Лодыгиным, Эдисон после настойчивых и трудных изысканий построил практически пригодную лампу накаливания (21 октября 1879 г.

она была публично показана). Для системы электрического освещения Эдисон изобрел винтовой ламповый цоколь и патрон, выключатели, плавкие предохранители, счетчик и др. приборы; он вводит параллельное включение источников света, применяет трехпроводную систему канализации электроэнергии и строит также крупнейшие для того времени генераторы и пр. аппаратуру.

4-го сентября 1882 г. вступила в строй сооруженная Эдисоном первая в мире электростанция—на Пирль-стрит в Нью-Йорке. Это было событием большой важности в технике: с этого момента устройство систем электрического освещения и постройка электростанций общественного пользования получили громадное развитие во всем мире. Занимаясь изысканием других применений электрической энергии, Эдисон строит опытную установку по электрификации железной дороги, ведет опыты по электромагнитной сепарации руды и др.

С 1887 г. по день смерти—18 ноября 1931 г.—Эдисон прожил в Вест-Оранже. Этот третий период деятельности был периодом полного материального благополучия Эдисона, большие предприятия которого были созданы не только в Америке, но и во многих других странах. В Вест-Оранже Эдисон усовершенствовал фонограф, изобрел щелочной аккумулятор, построил головную лампу для шахтеров, кинетоскоп (прибор для наблюдения в течение короткого времени одним наблюдателем движущихся фотографических изображений), телескриб (диктовальная машина), трансофон (аппарат для записи телефонных разговоров) и др.

Еще в 1883 г. Эдисон обнаружил явление так называемого «эффекта Эдисона» в лампах накаливания, заключающееся в том, что между наклеенной нитью лампы и третьим электродом, впаянным в колбу, протекает ток даже при весьма сильном разрежении воздуха в колбе; этот ток может быть обнаружен в цепи, если соединить третий электрод с положительным полюсом патрона. Эдисон в свое время не обратил внимания на важность этого явления; впоследствии ему было придано Флемингом и другими учеными должное значение. От «эффекта Эдисона» ведут свое начало электронные лампы и др. электронные приборы, огромное значение которых для техники и, особенно, для радиотехники выяснилось через много лет после открытия «эффекта Эдисона».

Проф. Л. Д. БЕЛЬКИНД





## Новые электротехнические стандарты

В 1946 г. Всесоюзным комитетом стандартов при Совете министров СССР утвержден ряд новых электротехнических стандартов. Краткие аннотации этих стандартов приведены ниже.

**ГОСТ 3222-46. Машины электрические. Концы валов цилиндрические** (взамен ОСТ 3604 и ОСТ/НКТП 8856/2207). Утвержден 28 июня 1946 г. со сроком введения с 1 января 1947 г.

Стандарт устанавливает размеры цилиндрического конца вала со стороны привода и распространяется на все (как освоенные производством, так и вновь проектируемые) нормальные электрические машины общего применения. Для специальных и специализированных электрических машин стандарт является рекомендуемым.

До введения настоящего стандарта параллельно действовали два общесоюзных стандарта: один, введенный в 1932 г., обязательный для всех машин (ОСТ 3604) и второй, введенный в 1936 г., обязательный при проектировании новых машин (ОСТ/НКТП 8856/2207).

Существование двух параллельных стандартов было явно нецелесообразно и вносило путаницу, в связи с чем и был разработан новый единый стандарт.

В основу нового стандарта положен ОСТ/НКТП 8856/2207, который согласован с международным стандартом на концы валов машин и аппаратов.

Стандарт устанавливает шкалу диаметров (от 6 до 650 мм) и соответствующую ей шкалу длин (от 16 до 350 мм) конца вала. Из 71 значения диаметров, приведенных в стандарте, 29 отмечены в стандарте как предпочтительные. Длина конца вала при диаметре свыше 220 мм стандартом не нормируется, поскольку машины с такими концами вала, как правило, являются машинами индивидуального исполнения.

**ГОСТ 3256-46. Контроллеры барабанные и кулачковые.** Утвержден 29 июля 1946 г. со сроком введения с 1 апреля 1947 г.

Стандарт распространяется на силовые барабанные и кулачковые контроллеры переменного и постоянного тока на номинальные токи от 50 до 300 А и номинальные напряжения до 500 В переменного тока (частоты 50 Hz) и 440 В постоянного тока, с ручным приводом, предназначенные для пуска, реверсирования и регулирования числа оборотов электродвигателей промышленного применения, путем изменения схемы главной цепи или цепи возбуждения и величины включенных в электрическую цепь сопротивлений.

Стандартом предусмотрено изготовление контроллеров с реверсивной симметричной схемой, с реверсивной несимметричной схемой (для механизмов подъема) и с неревверсивной схемой. Номинальные токи контроллеров установлены в 50, 100, 150 и 300 А, а номинальные напряжения 220, 440 В для постоянного тока и 220, 380, 500 В для переменного тока.

Стандарт устанавливает номинальное число включений в час (120 для барабанных и 600 для кулачковых контроллеров), величину испытательного напряжения изоляции, допустимое превышение температуры токоведущих частей и дугогасительных катушек, требования к блокконтактам контроллера, а также ряд конструктивных требований, которым должны удовлетворять контроллеры.

Контроллеры должны выдерживать в соответствии со стандартом не менее 1 000 000 включений и отключений без тока, а их сменные контакты не менее 300 000 включений и отключений без тока.

Большое место в стандарте уделено методам испытаний контроллеров на коммутационную способность.

Стандартом установлены также правила приемки контроллеров и требования к их маркировке и упаковке.

**ГОСТ 3211-46. Автотрансформаторы пусковые трехфазные масляные. Технические условия.** Утвержден 21 июня 1946 г. со сроком введения с 1 апреля 1947 г.

Стандарт распространяется на пусковые масляные трехфазные автотрансформаторы с естественным охлаждением масла, служащие для понижения напряжения (частоты 50 Hz) на зажимах синхронных или короткозамкнутых асинхронных двигателей при пуске их в ход и предназначенные для установки в закрытых помещениях при температуре окружающей среды не выше  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Стандартом установлены три ступени вторичного напряжения при прямой и обратной схемах соединения обмоток и отношение вторичного напряжения к первичному на каждой из этих ступеней, причем напряжение на средней ступени принимается за номинальное.

За номинальный режим нагрузки пускового автотрансформатора стандартом принят режим 2-минутной периодической нагрузки током, соответствующим номинальной мощности. Период охлаждения, следующий за нагрузкой при систематических ежедневных пусках автотрансформатора, должен быть не менее 4 или 6 час. в зависимости от мощности автотрансформатора.

В стандарте приведены номинальные первичные напряжения пусковых автотрансформаторов (500, 3 000 и 6 000 В) и соответствующие им номинальные мощности для прямой и обратной схем.

В стандарте приведены: допустимое превышение температуры обмоток автотрансформаторов ( $135^{\circ}\text{C}$ ), величины испытательного напряжения изоляции, допустимое отклонение по коэффициенту трансформации и некоторые конструктивные требования к пусковым автотрансформаторам.

В стандарте приведены также правила испытаний и маркировки автотрансформаторов.

По сравнению с ранее действующим ведомственным стандартом (СТ/ГЭП-13/2564) в новом стандарте несколько изменена шкала вторичных напряжений. Изменение шкалы позволяет существенно упростить конструкцию обмоток и технологический процесс их изготовления, а также значительно сократить сортament проводов, требуемых для изготовления пусковых автотрансформаторов. Так, по старому ведомственному стандарту для всех типов автотрансформаторов на 3 и 6 кВ требовалось 47 различных профилей проводов. По новому стандарту для этих же типов автотрансформаторов потребуется лишь 11 различных профилей.

**ГОСТ 1843-46. Провода с резиновой изоляцией в металлических защитных оболочках** (взамен ГОСТ В-1843-42).

Утвержден 20 августа 1946 г. со сроком введения с 1 января 1947 г.

Стандарт распространяется на провода с медными жилами в металлических защитных оболочках марок ПРП (провод с резиновой изоляцией, панцирный), ПРШП (провод с резиновой изоляцией в шланге, панцирный) и ТПРФ (провод с резиновой изоляцией в трубочной, металлической фальцованной оболочке), предназначенные для неподвижной прокладки в электрических сетях при напряжении до 500 В переменного тока и до 1 000 В постоянного тока.

Стандарт устанавливает количество, сечение и конструкцию жил, требования к защитным покровам, радиальную толщину резиновой изоляции, наружный диаметр проводов, плотность оплетки, требования к материалам, применяемым для изготовления проводов, значения испытательного напряжения и строительную длину проводов.

В стандарте приведены также правила и методы испытаний проводов и требования к их маркировке и упаковке.

В новый стандарт включены помимо двух- и трехжильных проводов, имевшихся в старом стандарте, также и многожильные провода марок ПРП и ПРШП; увеличена гибкость жил, повышены значения испытательного напряжения и ужесточены требования к упаковке проводов.

**ГОСТ 1920-46. Провода с резиновой изоляцией для военно-полевой связи** (взамен ГОСТ В-1920-42). Утвержден 3 апреля 1946 г. со сроком введения с 1 января 1947 г.

Стандарт распространяется на провода с резиновой изоляцией для военно-полевой связи марок ПТФ-7 (полевой те-

лефонный из 7 проволок) и ПТГ-19 (полевой телеграфный из 19 проволок).

Стандарт устанавливает конструкцию токопроводящих жил, число и размер проволок (медных и стальных) в жиле, максимальный наружный диаметр и вес 1 км провода, величину электрического (активного) сопротивления и временного сопротивления разрыву токопроводящей жилы, сопротивление изоляции провода после 3-часового пребывания в воде, а также правила и методы испытаний проводов, требования к их маркировке и упаковке.

**ГОСТ 2112-46. Проволока медная круглая для электротехнических целей. Технические условия** (взамен ГОСТ В-2112-43). Утвержден 15 июля 1946 г. со сроком введения с 1 октября 1947 г.

Стандарт распространяется на круглую медную проволоку для электротехнических целей (для кабелей, проводов и шнуров, электромашино- и аппаратостроения и т. п.) марок МТ (твердая неотожженная) и ММ (мягкая отожженная).

Стандарт устанавливает допускаемые отклонения по диаметру проволоки, требования к наружной поверхности, временное сопротивление разрыву и относительное удлинение при растяжении, количество перегибов, которое без разрушений должна выдержать проволока, и электрическое (активное) сопротивление проволоки, а также правила приемки, методы испытаний, требования к упаковке и маркировке.

По сравнению с ранее действующим ГОСТ В-2112-43 в новом стандарте снижено для проволоки марки ММ примерно на 8—10% временное сопротивление разрыву и повышено на 20% относительное удлинение при растяжении. Кроме того, расширена область распространения стандарта (ГОСТ В-2112-43 распространялся только на проволоку для кабелей, проводов и шнуров).

**ГОСТ 2214-46. Лакоткань электроизоляционная (хлопчатобумажная и шелковая).** Взамен ГОСТ 2214-43. Утвержден 2 октября 1946 г. со сроком введения с 1 января 1947 г.

Стандартом предусмотрены 4 марки хлопчатобумажной лакоткани (ЛХ) и 5 марок шелковой лакоткани (ЛШ), а именно: ЛХ1 и ЛШ1 (нормальная с повышенными диэлектрическими свойствами), ЛХ2 и ЛШ2 (нормальная), ЛХМ (маслостойкая), ЛХС (специальная), ЛШС1 (специальная с повышенными диэлектрическими свойствами), ЛШС2 (специальная) и ЛШС (специальная тонкая).

Номинальные толщины хлопчатобумажной лакоткани — в пределах от 0,15 до 0,30 мм, а шелковой лакоткани — от 0,04 до 0,15 мм.

По сравнению с ранее действующим ГОСТ В-2112-43 (Электричество, № 1, 1946) в новом стандарте жесточены допускаемые отклонения по толщине для некоторых толщин и марок лакоткани, повышено требование к отдельным маркам лакоткани в отношении водопоглощаемости и нормирована водопоглощаемость лакоткани марки ЛШС, которая раньше не нормировалась. Несколько повышено временное сопротивление разрыву и понижено полное относительное удлинение при разрыве. Наименьшее значение среднего пробивного напряжения лакоткани марок ЛХ1, ЛХ2,

ЛШ1, ЛШ2, ЛХМ и ЛШС повышено от 10 до 25%, причем нормировано наименьшее значение среднего пробивного напряжения для лакоткани марки ЛШС толщиной 0,04 и 0,05 мм, которое раньше не нормировалось.

**ГОСТ 3223-46. Сопротивления постоянные непроволочные. Методы испытаний** (взамен ОСТ 40123). Утвержден 29 июня 1946 г. со сроком введения с 1 января 1947 г.

Стандарт устанавливает методы электрических и других испытаний постоянных непроволочных сопротивлений, применяемых преимущественно в радиоаппаратуре.

Электрические испытания: определение влияния пайки выводов на сопротивление; определение величины омического сопротивления; определение коэффициента напряжения, характеризующего зависимость величины омического сопротивления от напряжения; определение коэффициента нагрузки, характеризующего влияние электрической нагрузки на величину омического сопротивления; определение температурного коэффициента, характеризующего зависимость величины омического сопротивления от температуры; определение коэффициента увлажнения, характеризующего зависимость омического сопротивления от действия влажности при повышенной температуре; определение коэффициента старения, характеризующего влияние длительной электрической нагрузки на величину омического сопротивления; определение коэффициента устойчивости, характеризующего зависимость омического сопротивления от непрерывно следующих воздействий положительной и отрицательной температур, влажности и электрической нагрузки; определение коэффициента водостойкости, характеризующего зависимость омического сопротивления от действия электрической нагрузки при одновременном воздействии воды; определение коэффициента сохранности, характеризующего влияние на величину омического сопротивления условий складского хранения и определение электродвижущей силы шумов.

Прочие испытания: определение размеров и состояния наружной поверхности, определение механической прочности, определение прочности контрольного узла и определение прочности контактного вывода.

По сравнению с ранее действующим ОСТ 40123 в новом стандарте значительно расширена номенклатура испытаний.

**ГОСТ 3283-46. Арматура контактной сети для трамваев и троллейбусов. Зажим концевой клиновой. Основные размеры. Технические условия.** Утвержден 4 сентября 1946 г. со сроком введения с 1 июля 1947 г.

Стандарт распространяется на концевой зажим с плоским клином (без насечки), предназначенный для армировки контактных проводов при соединении их с анкерными тросами через соответствующую арматуру в контактных сетях трамвая и троллейбуса.

Стандарт является первым из ряда стандартов на арматуру для контактной сети трамваев и троллейбусов, разработка которых поручена Всесоюзным комитетом стандартов Министерству коммунального хозяйства РСФСР.

*Инж. У. М. ЛИТВАКОВ*



## Учебное пособие по электрооборудованию кузнечно-штамповочных машин для машиностроительных втузов

Проф. А. Т. ГОЛОВАН. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ МАШИН.  
Рекомендовано ГУУЗ НКТИ в качестве учебного пособия для машиностроительных втузов.  
Машгиз, 1945, 215 стр., 191 рис., ц. 20 руб.

Рецензируемая книга является вторым изданием учебного пособия, выпущенного ОНТИ в 1936 г. под наименованием «Электрооборудование кузнечно-прессовых машин». Во втором издании автором введены в книгу три новых главы, посвященные электрической аппаратуре и схемам управления двигателями (глава II), методам электрического измерения некоторых величин при испытаниях кузнечных машин (глава VI) и электронагреву в кузнечно-штамповочном производстве (глава VII). Значительно расширен раздел, касающийся механических характеристик асинхронных электродвигателей и их энергетических показателей, а также заново переработан раздел, посвященный расчетам маховиковых электроприводов. В остальном книга повторяет первое издание.

Будучи долгое время непосредственно связанным с практикой ведущих предприятий и организаций тяжелого машиностроения проф. А. Т. Голован имеет также многолетний опыт научно-педагогической работы в Московском энергетическом институте им. Молотова. Такое сочетание педагогической и инженерной деятельности в области электропривода кузнечно-прессовых машин позволило автору накопить значительный теоретический и практический материал для составления учебного пособия. Опыт использования в течение 8 лет первого издания книги показал, что она удовлетворяет основным требованиям машиностроительных втузов и в то же время является единственным серьезным учебным пособием по электрооборудованию кузнечно-штамповочных машин для студентов энергетических втузов, специализирующихся в области электрооборудования промышленных предприятий.

С построением книги, равно и с введением двух новых глав, посвященных вопросам электроаппаратуры и электронагреву в кузнечном производстве, можно вполне согласиться. Значительное расширение раздела о механических характеристиках асинхронных двигателей также следует считать правильным, так как в электроприводе машин с ударной нагрузкой этот тип двигателя имеет наибольшее распространение.

Предложенный автором новый метод аналитического выражения механической характеристики асинхронной машины, позволяющий заменить криволинейного треугольника в ее устойчивой (двигательной) части равнобедренным прямоугольным треугольником, для многих случаев практики является вполне целесообразным. Этот метод позволил автору найти в относительно простой форме окончательное выражение момента двигателя для приводов с ударной нагрузкой и избежать применения формулы Клосса, которая приводит к чрезвычайно сложным и громоздким выражениям. Вместе с тем указанный метод позволил автору при определении величины момента инерции маховика избежать значительных ошибок, которые могут иметь место при использовании упрощенной зависимости момента от скольжения с заменой криволинейной характеристики в двигательной части прямой, проходящей через номинальную точку действительной характеристики.

Представляют значительную ценность многочисленные кривые

выражающие зависимость отношения времени цикла к постоянной времени привода ( $\beta t_u$ ) от кратности максимального момента двигателя ( $\lambda$ ) и параметров нагрузочного графика ( $\alpha k$ ). Эти кривые максимально упрощают разработанные автором аналитические расчеты момента инерции маховика, исходя из условий устойчивости работы привода и допустимого нагрева двигателя. Заслуживает быть отмеченным и семейство кривых для определения максимального (критического) скольжения  $S_k$  в зависимости от номинального скольжения  $S_n$  при различных значениях кратности максимального и начального (пускового) моментов (рис. 88—91). Эти кривые значительно облегчают расчеты по нахождению  $S_k$  по уточненной формуле Клосса. Одновременно на основании теоретических и экспериментальных исследований автор доказывает необходимость введения в уточненную формулу Клосса поправочного коэффициента, учитывающего отклонение действительной кривой момента двигателя в зоне скольжения, близкой к единице от теоретической.

Автором достаточно полно охвачены все виды кузнечно-штамповочных машин и по каждому из них даны методы построения нагрузочных моментов и расчеты электропривода по нагреву и устойчивости. Однако, книга все же вызывает ряд замечаний, которые следовало бы учесть автору при дальнейшем ее издании.

Прежде всего вызывает сомнение необходимость введения в книгу главы VI, посвященной электрическим измерениям некоторых величин. Эта тема не имеет прямого отношения к курсу электропривода машин с ударной нагрузкой и с методической точки зрения включение ее в учебное пособие по этому курсу нецелесообразно.

Изучение студентами-механиками основных методов измерения скорости, ускорения, пройденного пути и других не электрических величин, характеризующих кузнечно-штамповочные машины, необходимо; однако, оно должно проводиться в специальных курсах, где наряду с другими средствами измерений этих величин должны быть описаны, и притом более полно, методы электрических измерений.

В главе I, посвященной механическим характеристикам асинхронных двигателей и их энергетическим показателям (стр. 3—18 и 26—34), автором незаслуженно мало уделено внимания короткозамкнутым двигателям с повышенным скольжением. Эти двигатели нашли широкое применение в мировой практике, главным образом для приводов с ударным характером нагрузки и для приводов с большой частотой пусков и реверсов. Было бы целесообразно остановиться более подробно на механических характеристиках этих двигателей, а также на оптимальной величине номинального и опрокидывающего скольжения, форме кривой момента и т. д.

Следовало бы также рассмотреть вопросы, связанные с применением двигателей с повышенным скольжением для приводов с частыми пусками и реверсами и увязать их с формулой для определения допустимой частоты включений (стр. 33—43). Приближенные расчеты показывают, что при номинальном скольжении в 10% можно потери в меди статора при переходных процессах (пуск, реверс) уменьшить в 2,5—3 раза, суммарные потери в

$$\beta t_u = f[\lambda, \alpha, k].$$



меди уменьшить на 30—40% и увеличить допустимое по нагреву число реверсов вхолостую в 3—4 раза.

В разделе, посвященном методам расчета мощности двигателя по нагреву (стр. 34—42) не нашли отражения некоторые существенные положения из современной теории нагрева электродвигателей. Автор не приводит наиболее распространенного при расчете двигателей по нагреву уравнения средних потерь и ограничивается лишь формулами среднеквадратичных величин (тока, момента, мощности), базирующиеся на этом уравнении. Уравнение же средних потерь исходит не из максимальной температуры перегрева двигателя, а из средней за цикл температуры. Это основное отличие практических формул расчета от расчетов, базирующихся на классическом уравнении нагрева, следовало бы отметить. Так как при любом переменном графике нагрузки средние потери всегда будут меньше потерь, определенных по максимальной температуре, то все расчеты по формулам среднеквадратичных величин приводят к преуменьшению мощности двигателей по сравнению с мощностью, полученной при расчете по максимальной температуре. Величина этих расхождений зависит от характера графика и продолжительности цикла и может быть весьма значительна.

Указанное есть следствие отклонения действительных кривых нагрева от экспоненциального закона, так как при циклической нагрузке действительные значения постоянной времени нагрева в периоды нагрузки всегда меньше значения, принимаемого в исходном уравнении нагрева. Было бы полезно привести в книге все эти положения и одновременно обосновать возможность применения формул среднеквадратичных величин к электроприводу кузнечно-прессовых машин, исходя из специфических особенностей их графиков нагрузки.

Поскольку автор довольно подробно останавливается на выборе мощности двигателей, работающих в условиях кратковременного режима, целесообразно было бы также указать, что значительное отклонение действительных кривых нагрева от экспоненциальных, наблюдаемое в начале процесса нагрева, имеет иногда решающее значение для выбора мощности двигателя.

В главе II, посвященной электрической аппаратуре и схемам управления, следует отметить ряд неудачных определений и не совсем правильных положений. На стр. 49 автор пишет, что пакетные выключатели имеют сравнительно высокую разрывную мощность и находят широкое применение в качестве ручных пускателей для короткозамкнутых двигателей. Это положение неверно, так как пакетные выключатели имеют незначительную разрывную мощность и применяются, главным образом, как линейные выключатели для отключения цепей без разрыва тока. Для реверсирования двигателей этот тип выключателей вовсе не применяется.

На стр. 51 автор указывает, что барабанные выключатели, как правило, имеют встроенные плавкие предохранители. В действительности эти выключатели снабжаются предохранителями очень редко.

При рассмотрении видов защиты двигателей (стр. 52) автор недостаточно полно определяет назначение нулевой защиты; ее главная цель состоит не только в предохранении механизмов от поломки при самопроизвольном пуске двигателей, но и в защите обслуживающего персонала от увечий.

На стр. 58 автор пишет, что регулировка теплового реле ТТ-10 производится специальным регулировочным вин-

том. Между тем у этого типа реле регулировочного винта нет. При описании контакторов постоянного тока (стр. 63) не указано, что помимо контакторов в однополюсном исполнении нашими заводами выпускаются блокирующие контакторы с числом главных контактов от 1 до 4. На стр. 68 автор не отмечает, что промежуточные реле, помимо указанных целей, широко применяются в схемах автоматики как промежуточный элемент.

Глава III касается методов расчета мощности двигателя и момента инерции маховика и является центральным разделом курса. Как уже указывалось выше, она составлена с большим знанием дела и содержит оригинальные выводы и формулы. Однако, нельзя согласиться с автором, что предложенный им метод расчета маховикового электропривода является точным (стр. 87); этот метод, несмотря на его оригинальность, является все же приближенным, так как автор пользуется упрощенным выражением для определения величины момента. Существуют действительно точные, правда, более громоздкие, методы расчета маховикового электропривода, предусматривающие графоаналитическое решение этих вопросов, без упрощения кривой момента электродвигателя. Отсутствие описания этих методов в рассматриваемом разделе курса следует считать определенным упущением автора книги.

Вызывают некоторое сомнение выводы автора о применении двигателей с повышенным скольжением для машин с ударной нагрузкой. Автор пишет, что с увеличением номинального скольжения двигателя уменьшается средняя цикловая скорость, что влечет за собой необходимость увеличения передаточного числа между валом двигателя и рабочим валом механизма; последнее же вызывает увеличение среднего момента и, как следствие этого, или увеличение габаритов двигателя или, при прежнем габарите, ощутимое увеличение маховика, что снижает эффект от применения двигателей с повышенным скольжением. Нам представляется, что эти выводы нуждаются в серьезной проверке, так как механические характеристики двигателей с повышенным скольжением сильно отличаются от характеристик нормальных двигателей. Окончательное суждение о целесообразности применения двигателей с повышенным скольжением может быть дано только на основании точных расчетов маховиковых электроприводов (с последующей экспериментальной проверкой). В заграничной практике двигатели с повышенным скольжением нашли себе широкое применение для привода машин с ударной нагрузкой, что косвенно подтверждает их преимущества по сравнению с нормальными двигателями. Естественно, что повышение величины номинального скольжения обусловит увеличение потерь в двигателе при нормальной его работе и, как следствие этого, снижение мощности двигателя в том же габарите. Однако, при правильном конструировании двигателей и соответствующем выборе формы крутящего момента понижение мощности двигателей с повышенным скольжением, как показывают данные инофирм, не будет превосходить 20—30%.

Следует отметить, что книга издана Машгизом весьма небрежно; в ней очень много опечаток, пропусков и т. д. В целом книга представляет значительный интерес, и выход ее в свет следует приветствовать.

*Кандидат техн. наук, доц. И. И. ПЕТРОВ*

*Заведующий кафедрой «Электрооборудование промышленных предприятий» ВЗИИ*



#### ПОПРАВКА

В информации о докладах на Всеукраинском совещании по вопросам электрификации сельского хозяйства (Электричество, № 12, 1946) на стр. 78, правый столбец, 20 строка снизу — следует читать: Б. А. Штурман — «О строительстве сельских высоковольтных и низковольтных электрических сетей».

В рецензии на книгу акад. В. Ф. Миткевича «Магнитный поток и его преобразования» (Электричество, № 1, 1947) на стр. 82, правый столбец, 23 строка сверху — следует читать: «Это — открытие нейтрона».

# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

НА 1947 ГОД

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

Основан в 1880 году Русским техническим обществом  
12 номеров в год по 12 печ. листов

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием всех отраслей электротехники и электрификации СССР

## В журнале принимают участие:

Доктор техн. наук, проф. К. А. Андрианов, доктор техн. наук, проф. Б. П. Апаров, член-корр. АН СССР В. К. Аркадьев, доктор техн. наук, проф. Р. Л. Аронов, доктор техн. наук, проф. Г. И. Атабеков, доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабат, доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд, академик А. И. Берг, доктор технических наук, проф. С. М. Брагин, член-корр. АН СССР И. С. Брук, доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, академик С. И. Вавилов, академик Б. А. Введенский, член-корр. АН СССР В. И. Вейц, академик А. В. Винтер, член-корр. АН СССР В. П. Вологдин, доктор техн. наук, проф. А. А. Воробьев, член-корр. АН СССР Б. М. Вул, доктор техн. наук, проф. А. А. Вульф, доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов, доктор техн. наук, проф. А. А. Горен, кандидат техн. наук, П. Н. Горшков, проф. П. Г. Грудинский, доктор техн. наук, проф. Л. И. Гутенмахер, проф. Д. В. Ефремов, доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов, доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский, доктор техн. наук, проф. А. Г. Иосифьян, академик А. Ф. Иоффе, доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов, инж. Е. Я. Казовский, доктор техн. наук, проф. П. Л. Калантаров, доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский, доктор техн. наук, проф. А. С. Кантер, инж. Я. А. Климовицкий, кандидат техн. наук Е. Г. Комар, член-корр. АН СССР В. И. Коваленков, член-корр. АН СССР М. П. Костенко, член-корр. АН СССР Т. П. Кравец, академик Г. М. Кржижановский, инж. С. И. Рабинович, член-корр. АН СССР К. А. Круг, академик В. С. Кулебакин, действительный член АН УССР С. А. Лебедев, доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель, доктор техн. наук, проф. Э. А. Меерович, академик В. Ф. Миткевич, доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов, доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман, академик В. П. Никитин, доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров, доктор техн. наук, проф. Л. М. Пиотровский, доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов, доктор техн. наук, проф. В. К. Попов, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич, доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд, доктор техн. наук, проф. Л. И. Сиротинский, доктор техн. наук, проф. И. С. Стекольников, кандидат техн. наук И. А. Сыромятников инж. А. И. Товстопалов, доктор техн. наук, проф. В. А. Толвинский, доктор физ.-мат. наук, проф. В. А. Фабрикант, доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чечет, член-корр. АН СССР М. А. Шателен, доктор техн. наук, проф. Е. Г. Шрамков, доктор техн. наук, проф. Г. И. Штурман, доктор техн. наук, проф. Н. Н. Щедрин и др.

Подписная цена на год 96 руб.

Подписка принимается в отделениях „Союзпечати“ и на почте