

1934

“Коммунизм — есть советская власть
илюс электрификация всей страны”

СЕН 1934

Л Е Н И Н

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 10

ИЮНЬ

ВЫПУСК II



МОСКВА
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.Booksite.ru

ОНТИ

Энергосиздат

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 ГОД

на ежемесячный научно-технический журнал Главэнерго

ТЕПЛО и СИЛА

ГОД ИЗДАНИЯ 19-3

ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА:

Борьба за создание советского энергооборудования, борьба за освоение энергоустановок и рациональную востановку их эксплоатации, помощь ИТР в деле повышения своей квалификации и помошь студентам вузов, основанная на увязке работ научно-исследовательских институтов, работы заводов-изготовителей и опыта эксплоатации станций и промустановок.

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА:

Советское энергооборудование и пути его развития. Освоение оборудования и нормальные режимы его эксплоатации. Эксплоатация энергоустановок, ее организация и обмен эксплоатационным опытом. Оценка конструкций оборудования с точки зрения надежности, экономичности и удобства эксплоатации. Потребление энергии и тепла в промышленности и разрешение проблемы теплоэлектроснабжения промкомбинатов. Комбинированное производство тепла и энергии, теплозлектроцентрали и тепловые сети. Топливо СССР и особенности его сжигания. Освоение местных топлив. Аварии, их предупреждение и ликвидация.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на 6 мес.—9 руб., на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

Подписку на журнал и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „Техпериодика“.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗа, всеми почтовыми отделениями и письмоносыцами.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ 1934 года: с 1-го января 1934 г. Главной конторой Техпериодики ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 г. обращайтесь непосредственно в адрес конторы. В 1934 г. все журналы ОНТИ будут экспедироваться по ярлычной (адресной) системе.

ОНТИ

ЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 ГОД

на ежемесячный научно-технический журнал

Электрические станции

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО

5-й ГОД ИЗДАНИЯ

12 НОМЕРОВ В ГОД

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА: Общие технико-экономические проблемы планирования. Освещение отдельных планов электрификации наиболее характерных районов Союза. Общий план электрификации. Технические проблемы электрификации. Критический анализ отдельных проектов крупного электростроительства. Стандартизация и типизация. Описание и критический разбор строительных и монтажных работ. Новые типы и конструкции оборудования. Описание аварий и методы их ликвидации. Организация эксплуатации. Подготовка кадров. Организация ремонтного хозяйства. Режим работы станций. Распределение нагрузки. Регулирование напряжений. Распределение энергии в крупных городах. Вопросы расхода на собственные нужды. Обеспечение надежности параллельной работы станций. Организация диспетчерской службы и опыт ее работы. Централизация управления и применение автоматических приборов. Статистика, информация, библиография, хроника.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН: на инженеров, квалифицированных техников, учащихся вузов, научно-исследовательские институты, проектирующие организации.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на 6 мес.—9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер 1 р. 50 к.

ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ и ДЕНЬГИ НАПРАВЛЯЙТЕ ПО АДРЕСУ: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „Техпериодика“.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ: отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗа, всеми почтовыми отделениями и письмоносыцами.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ 1934 г.: с 1 января 1934 г. Главной конторой Техпериодики ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 года обращайтесь непосредственно в адрес конторы.

В 1934 году все журналы ОНТИ будут экспедироваться по ярлычной (адресной) системе.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10

1934
ИЮНЬ

Орган ГЛАВЭНЕРГОПРОМА и ГЛАВЭНЕРГО НКТП, Энергетического института Академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерно-технической общественности (ВЭН-РНИТО)

Адрес редакции: Москва, Неглинный пр., 6/2. Тел. 65-84

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.		Стр.	
ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ			
Инж. Д. П. МОРОЗОВ—Параллельная работа генераторов постоянного тока агрегата Леонарда-Ильгнера	1	ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ	
Инж. Г. К. ЦВЕРАВА—Результаты эксплоатации преобразовательной установки Вэлховского алюминиевого комбината	12	Инж. А. С. ЛИБЕРМАН—Определение числа заводских трансформаторных подстанций	27
Инж. С. М. ГОХБЕРГ и инж. П. Н. БОЛЬШАКОВ—Однофазные трансформаторы с компенсирующими обмотками .	18	Инж. А. Б. ЧЕРНИН—Упрощенный американский метод расчета токов короткого замыкания	34
Инж. Е. Г. КОМАР—О выборе типа генератора повышенной частоты	25	Инж. А. М. МЕЛЬКУМОВ—О гашении дуги гасильной камеры масляного выключателя	43
		ХРОНИКА	45
		БИБЛИОГРАФИЯ	46
		ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ	48

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Параллельная работа генераторов постоянного тока агрегата Леонарда-Ильгнера¹⁾

(Аналитическое и экспериментальное исследование)

Инж. Д. П. Морозов
Москва, ВЭИ

1. Введение

Для питания двигателей прокатных станов обычно применяется маховичная мотор-генераторная преобразовательная группа Леонарда-Ильгнера и реже—безмаховичная Леонарда. Мощность постоянного тока, требуемая от преобразовательной установки для питания современных, стандартного типа, реверсивных двигателей составляет значительную величину (табл. 1), в силу чего наиболее распространенный тип преобразовательной установки выполняется при наличии двух генераторов, работающих параллельно. Условия надежного коммутиирования тока при высоких скоростях преобразовательного агрегата диктуют необходимость такого дробления мощности. Более высокая скорость преобразовательного агрегата, с одной стороны, разрешает вопрос о рациональном в экономическом и

техническом отношениях конструктивном выполнении машин, а с другой—понижает требуемую для выравнивания графика нагрузки величину инерционных масс. Одновременно с этим возникает проблема одинакового токораспределения между обоими генераторами, особо сложная в данном случае, так как ток, напряжение и мощность генераторов в режиме работы на прокатный двигатель периодически меняют свою величину и знак, причем частота таких изменений достигает значительной величины ($500 \div 600$ в час). На рис. 1 представлена осциллографическая запись тока, напряжения, мощности и скорости вращения прокатного двигателя за один пропуск прокатки на блюминге. Настоящая работа содержит сравнение различных способов выравнивания нагрузки при параллельной работе генераторов на основе экспериментальных данных и теоретической разработки. Последовательное соединение генераторов, при котором данная проблема не имеет места, в настоящее время в силу значительной мощности преобразовательных усилителей не является важной.

¹⁾ По материалам экспериментального исследования, проведенного под руководством автора бригадой инж. Таюкина на Стадинском

Таблица 14)

Колич.	Генераторы преобразовательной установки			Двигатель преобразовательного агрегата			Прокатный двигатель		Привод и место установки	Фирма
	Мощн. kW	Напряжение V	Ток A	Мощн. л. с.	Ско- рость об/мин	Тип двигателя	Мощн. л. с.	Ско- рость об/мин		
2	3 500	800	4 375	5 000	375	Асинхронный	7 000	0—50—120	Блюминг, Магнитогорск и Сталинск	General Elektric Co
2	2 500	600	4 170	7 500	500	Синхронный	6 200	80—160	Стан 800 рельсовый, Сталинск	Metropoliten Vickers Co
2	3 000	750	—	7 000	375	Асинхронный	7 000	0—50—120	Блюминг, Златоустинский завод	«Электросила»

2. Потенциометрическая схема

Фирмой General Elektric Co и заводом «Электросила» принята схема, изображенная на рис. 2. Назначение отдельных машин и обмоток, а также номинальные данные агрегата Ильгнера и прокатного двигателя,

быстропеременном режиме нагрузки реверсивного двигателя может произойти в результате действия следующих причин:

1. Неидентичности намагничивающих характеристик генераторов, которая даже при совершенной сборке магнитной системы и якоря может иметь место бла-

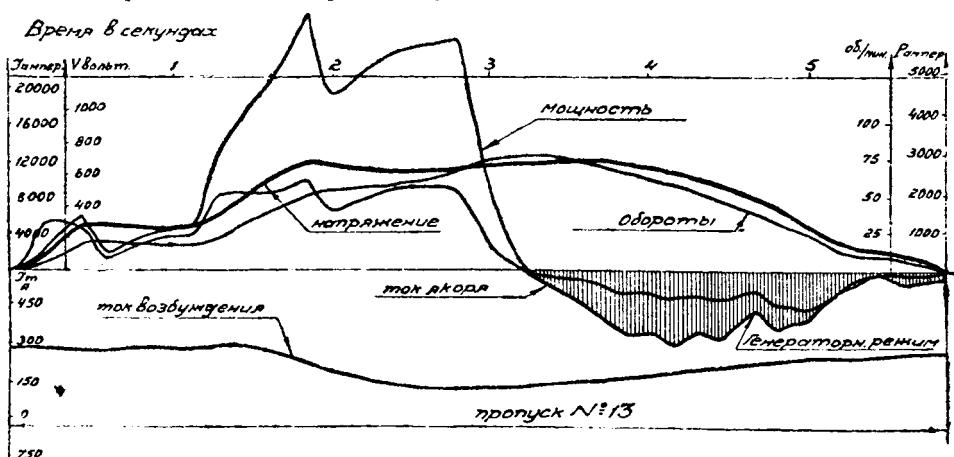


Рис. 1. Осциллографическая запись тока и напряжения, тока возбуждения и оборотов прокатного двигателя блюминга. Мощность построена как произведение $I \cdot E$

установленных для привода блюминга с диаметром валков 1 150 мм, указаны на рис. 2. Принцип действия устройства для выравнивания нагрузки генераторов в основном состоит в следующем:

Цепь обмоток компенсационной и дополнительных полюсов двигателя разделена на две группы, соединением которых с соответствующим генератором осуществляется включение двигателя. На основных полюсах обоих генераторов расположены дополнительные, имеющие малое число витков (один или два на каждый полюс), так называемые уравнительные или дифференциальные обмотки A и B. Эти обмотки соединены между собой последовательно и нанесены на полюс таким образом, что при прохождении по ним тока этот последний будет для одного генератора подмагничивающим и размагничивающим для другого. Концы обмоток присоединены к точкам a и b главной цепи машин (см. упрощенную схему на рис. 3).

Если в силу тех или иных причин ток генератора 2 будет по величине больше, чем ток генератора 1, то между точками a и b возникнет разность потенциалов, в дифференциальных обмотках потечет ток, поле более нагруженного генератора будет ослаблено, а поле генератора 1 усилено, благодаря чему произойдет выравнивание нагрузки. Неодинаковое токораспределение между обоями генераторами при

годаря неодинаковому сопротивлению магнитопроводов отдельных генераторов.

2. Неточной сборки отдельных частей машин и неравномерного воздушного зазора по окружности якоря, вызывающих усиленную работу эквипотенциальных соединений и искажающих намагничивающую характеристику при нагрузке.

3. Неодинаковой величины «постоянных времени» главных цепей отдельных генераторов.

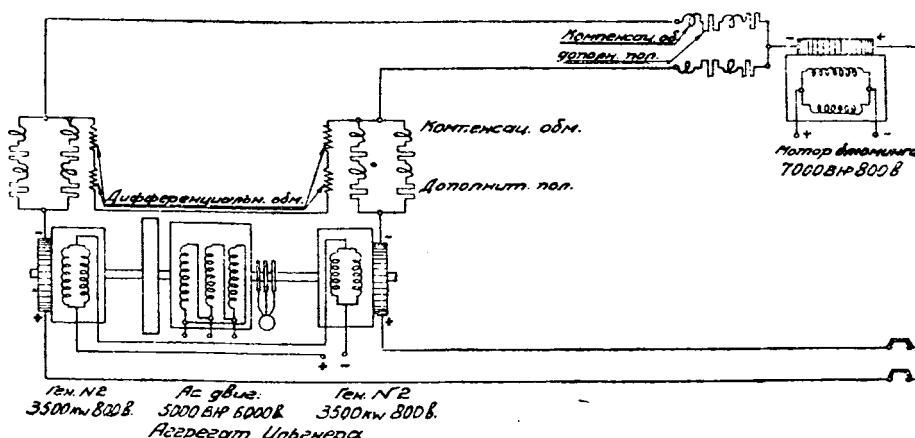


Рис. 2. Принципиальная схема соединений машин агрегата Ильгнера и прокатного двигателя, установленных на Сталинском металлургическом заводе фирмой General Elektric Co

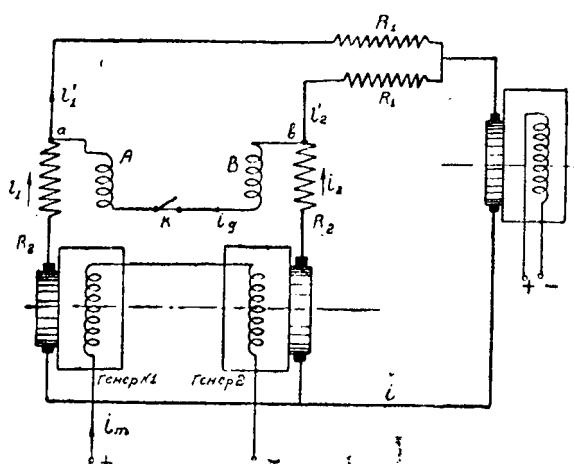


Рис. 3. Обозначения и упрощенная схема потенциометрического способа выравнивания нагрузки

4. В случае параллельного соединения обмоток возбуждения генераторов—различия в постоянных времени этих обмоток.

Математический анализ работы уравнительных обмоток при учете всех перечисленных факторов не представляется возможным, поэтому в дальнейшем исследование мы будем предполагать, что различие в токораспределении вызывается неодинаковым сопротивлением магнитных систем генераторов, в силу чего намагничивающие характеристики имеют вид, показанный на рис. 4.

Далее, мы будем предполагать, что генераторы вплоть до номинального напряжения работают на прямолинейной части своих намагничивающих характеристик, что в действительности имеет место для рассматриваемых нами машин. На рис. 5 даны кривые для прямого и обратного ходов намагничивающей характеристики генератора 3500 кВт, 800 В, полученные экспериментальным путем. Согласно обозначениям рис. 4 уравнение характеристики холостого хода генератора 1 будет иметь вид

$$e_1 = a i_m, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{E_n}{I_{mn1}}$$

и
номинальные напряжение и ток возбуждения генератора 1. Далее э. д. с. генератора 2

$$e_2 = \gamma a i_m, \quad (1')$$

где

$$\gamma a = \frac{E_n}{I_{mn2}}$$

$$\gamma = \frac{I_{mn1}}{I_{mn2}}.$$

Под номинальными токами возбуждения I_{mn1} и I_{mn2} мы здесь подразумеваем те их числовые значения, при которых э. д. с. генераторов при холостом ходе равны номинальной величине.

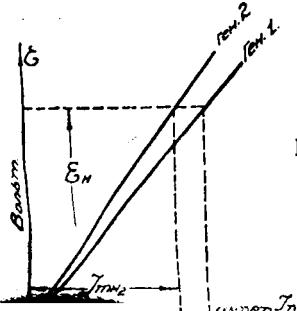


Рис. 4. Протекание намагничивающих характеристик генераторов 1 и 2

Исследуем вначале наиболее простой случай работы уравнительных обмоток по схеме рис. 3, в котором предполагаем, что при отключенных уравнительных обмотках ток возбуждения I_m и токи в главной цепи машин имеют установившееся значение при моменте статического сопротивления на валу двигателя = const.

Замыкание рубильника k вызовет процесс выравнивания токов, скорость и результат которого постараемся выразить аналитически.

Введем обозначения:

i_2, i_2', i_1, i_1' —токи в главной цепи машин, согласно обозначениям рис. 3,

R_2 —суммарное сопротивление главной цепи одного генератора,

R_1 —сопротивление одной группы вспомогательных обмоток двигателя,

i_d —ток дифференциальной обмотки,

Генератор агр. Чубенера
3500 квт. 800 В.

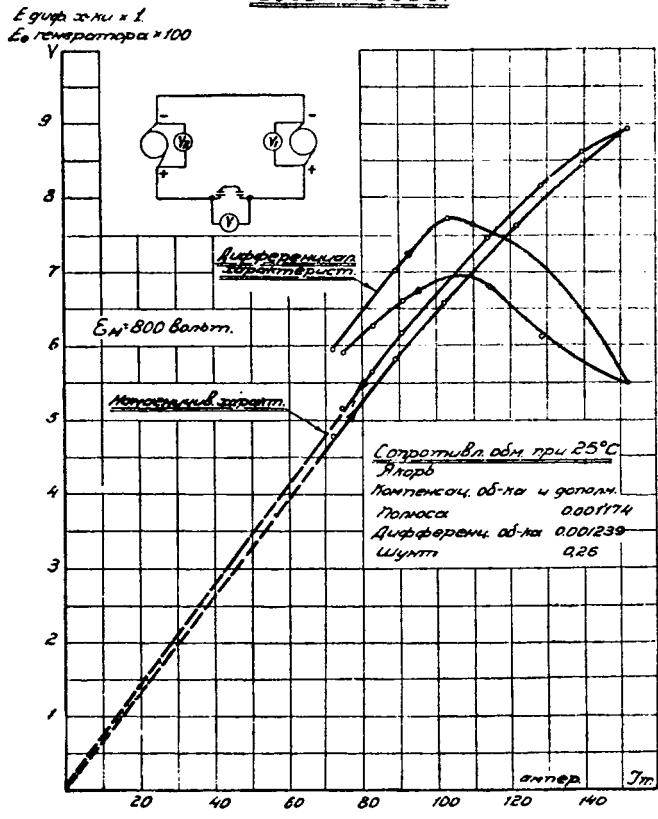


Рис. 5. Характеристики холостого хода и дифференциальная для генераторов схемы рис. 2

r_d и L_d —омическое сопротивление и индуктивность ее же,

W_m, W_a —число витков основного возбуждения и уравнительной обмотки для одного генератора.

Электродвижущая сила генератора 2 с большей э. д. с. и более нагруженного в результате действия ампервитков от основной и уравнительной обмоток может быть выражена:

$$e_2 = \gamma a I_m - \gamma a \frac{W_a}{W_m} i_d. \quad (2)$$

Электродвижущая сила генератора 1

$$e_1 = a I_m + a \frac{W_a}{W_m} i_d. \quad (2')$$

Напишем далее два уравнения равновесия э. д. с. одно для внутреннего замкнутого контура, образованного главными цепями обоих генераторов, и для контура, содержащего обмотки R_1, R_2 .

Первое уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \gamma a I_m - \gamma a \frac{W_a}{W_m} i_\partial - a I_m - \\ - a \frac{W_a}{W_m} i_\partial = i_2 R_2 + i_2' R_1 - i_1' R_1 - i_1 R_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как

$$\begin{aligned} -\frac{i_2}{i_1} &= i_2'' + i_\partial \\ \frac{i_1}{i_1'} &= i_1'' - i_\partial \\ (i_2 - i_1) &= (i_2' - i_1') + 2i_\partial, \end{aligned}$$

то в связи с этим уравнение (3) преобразовывается в

$$\begin{aligned} a(\gamma - 1) I_m - \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) - 2R_1 \right] i_\partial = \\ = (R_1 + R_2)(i_2 - i_1). \end{aligned} \quad (3')$$

Если бы цепи возбуждения генераторов были соединены параллельно, то в них протекали бы еще токи от потоков взаимоиндукции между уравнительными обмотками и обмотками основного возбуждения. При последовательном соединении обмоток основного возбуждения и уравнительных, как это имеет место в нашем случае как в цепи обмоток возбуждения, так и в цепи уравнительных обмоток, результирующая величина э. д. с. взаимоиндукции равна нулю. Последовательное соединение обмоток возбуждения, как это будет показано ниже, имеет большое значение для благоприятной работы уравнительных обмоток. Индуктивностью от потоков рассеяния в главной цепи машин здесь мы пренебрегаем.

Второе уравнение

$$(i_2' - i_1') R_1 = 2r_\partial i_\partial + 2L_\partial \frac{di_\partial}{dt}. \quad (4)$$

Заменяя опять $i_2' - i_1' = i_2 - i_1 - 2i_\partial$, получим после необходимых преобразований

$$i_2 - i_1 = \frac{2(r_\partial + R_1)}{R_1} \cdot i_\partial + \frac{2L_\partial}{R_1} \frac{di_\partial}{dt}. \quad (4')$$

Сопоставив уравнения (3') и (4'), будем иметь

$$\begin{aligned} a(\gamma - 1) I_m = & \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + 2R_2 \right] i_\partial + \\ & + 2L_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{di_\partial}{dt}. \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначив $a(\gamma - 1) I_m$ через A , а постоянные коэффициенты перед i_∂ и $\frac{di_\partial}{dt}$ соответственно через B и C , получим дифференциальные уравнения вида

$$A = B \cdot i_\partial + C \frac{di_\partial}{dt}.$$

Так как при поставленных условиях при $t=0$, $i_\partial=0$, то решение этого уравнения

$$i_\partial = \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right), \quad (6)$$

По величине она равна:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{C}{B} = \frac{2L_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}{a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + 2R_2} = \\ &= \frac{2L_\partial (R_1 + R_2)}{a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) R_1 + 2r_\partial (R_1 + R_2) + 2R_1 \cdot R_2} = \\ &= \frac{2L_\partial}{a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + 2r_\partial + \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \\ &= \frac{2L_\partial}{a \cdot \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) \cdot \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + 2r_\partial + \left(2R_2 - \frac{2R_2}{R_1 + R_2} \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Постоянная времени θ , определяющая скорость нарастания тока в дифференциальных обмотках, а значит, и скорость выравнивания, должна быть выбрана с расчетом получения наименьшей ее величины. Как это видно из уравнения, для достижения быстрого выравнивания токораспределения генераторов необходимо выбирать дифференциальные обмотки с возможно большим числом витков W_a^2 , большим сопротивлением r_∂ и меньшей индуктивностью L_∂ ; сопротивление R_1 для достижения той же цели должно быть возможно большим. Из уравнения (7) следует непосредственно, что скорость выравнивания от нагрузки не зависит.

Установившийся максимальный ток уравнительной обмотки по уравнению (6) будет

$$I_{\partial \max} = \frac{A}{B} = \frac{a(\gamma - 1) I_m}{a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + 2R_2}. \quad (8)$$

Очевидно, что его величина пропорциональна току возбуждения и не зависит от нагрузки; $I_{\partial \max}$ уменьшается с увеличением числа витков уравнительной обмотки и ее сопротивления; с увеличением R_2 и при уменьшении R_1 установившийся ток дифференциальной обмотки уменьшается.

Далее, изменение во времени разности между токами генераторов может быть получено, если подставить в уравнение (4') значения i_∂ и $\frac{di_\partial}{dt}$ из уравнения (6):

$$\begin{aligned} i_2 - i_1 &= \frac{2(r_\partial + R_1)}{R_1} \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + \\ &+ \frac{2L_\partial}{R_1} \frac{A}{C} e^{-\frac{t}{\theta}} = \frac{2(r_\partial + R_1)}{R_1} I_{\partial \max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + \\ &+ \frac{a(\gamma - 1) I_m}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\theta}}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$i_2 - i_1 = \frac{a(\gamma - 1) I_m}{R_1 + R_2} \quad (9a)$$

и при $t = \infty$ при установившемся режиме

$$\begin{aligned} i_2 - i_1 &= \frac{2(r_\partial + R_1)}{R_1} I_{\partial \max} = 2 \left(1 + \frac{r_\partial}{R_1}\right) I_{\partial \max} = \\ &= \frac{a(\gamma - 1) I_m 2 \left(\frac{r_\partial + R_1}{R_1}\right)}{a \cdot \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + 2R_2}. \end{aligned} \quad (9b)$$

Очевидно, что идеального токораспределения быть не может; при $r_\partial = 0$ токи генераторов разнились бы друг от друга на двойную величину установившегося тока дифференциальной обмотки. Интересно отметить, что абсолютная разность между токами генераторов при установившемся режиме не зависит от нагрузки также согласно уравнению (9), что означает увеличение относительной степени выравнивания при больших нагрузках.

Резюмируя все сказанное, можно отметить, что для получения наибольшей степени выравнивания необходимо стремиться к выполнению уравнительных обмоток с возможно малым установившимся током и возможному меньшему соотношению $\frac{r_\partial}{R_1}$.

Быстрое установление минимальной разности между токами генераторов требует, как видно из уравнения (9), возможно меньшей величины ϑ .

Работа реверсивного двигателя протекает при быстро меняющейся его скорости, причем регулировка последней осуществляется, главным образом, путем ступенчатого изменения сопротивлений в цепи возбуждения генераторов. В этом случае ток возбуждения изменяется по закону экспоненциальных функций.

Исследуем процесс выравнивания нагрузки при пуске прокатного двигателя в ход, когда э. д. с. генераторов растет по закону:

$$\begin{aligned} e_2 &= \gamma a \cdot i_m = \gamma \cdot a \cdot I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \\ e_1 &= a \cdot i_m = a \cdot I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь i_m — переходный, а I_m — установившийся ток цепи возбуждения, а T — постоянная времени обмоток возбуждения обоих генераторов.

В процессе пуска ток в обмотке возбуждения нарастает по закону:

$$i_m = I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

причем процесс нарастания зависит только от параметров обмотки возбуждения. Влияние взаимоиндукции между обмотками уравнительными и основными, как уже указывалось выше, исключено благодаря последовательному соединению обмоток возбуждения обоих генераторов между собою и дифференциальных между собою.

Для аналитического исследования напишем вновь равновесия э. д. с. по двум замкнутым контурам, как и в предыдущем случае. Очевидно, новые уравнения будут получены, если в уравнения (3') и (4') подставить вместо неизменного тока I_m выражение для переходного тока

Таким образом, первое уравнение примет вид

$$\begin{aligned} a(\gamma - 1) I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \\ - \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) - 2R_1\right] \cdot i_\partial = (R_1 + R_2)(i_2 - i_1), \end{aligned} \quad (11)$$

а второе уравнение напишется без изменения:

$$i_2 - i_1 = \frac{2(r_\partial + R_1)}{R_1} i_\partial + \frac{2L_\partial}{R_1} \frac{di_\partial}{dt}. \quad (12)$$

Исключая из уравнения (11) $(i_2 - i_1)$ и производя упрощения, получим

$$\begin{aligned} a(\gamma - 1) I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + \right. \\ \left. + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + 2R_2\right] i_\partial + 2L_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{di_\partial}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Вновь введем прежние обозначения:

$$\begin{aligned} A &= (\gamma - 1) a I_m; \\ B &= \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + 2R_2\right]; \\ C &= 2L_\partial \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right); \\ \vartheta &= \frac{C}{B}, \end{aligned}$$

после чего получим дифференциальное линейное уравнение первого порядка

$$A \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = Bi_\partial + C \frac{di_\partial}{dt}$$

или

$$\frac{di_\partial}{dt} + \frac{i_\partial}{\vartheta} = -\frac{A}{C} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (13')$$

интеграл которого, по общему правилу:

$$\begin{aligned} i_\partial &= e^{-\int \frac{dt}{\vartheta}} \left[e^{\int \frac{dt}{\vartheta}} \frac{A}{C} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) dt + C_I \right] = \\ &= e^{-\frac{t}{\vartheta}} \left[\int \frac{A}{C} e^{\frac{t}{\vartheta}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) dt + C_I \right] = \\ &= e^{-\frac{t}{\vartheta}} \left[\int \frac{A}{C} e^{\frac{t}{\vartheta}} dt - \int \frac{A}{C} e^{\frac{(T-\vartheta)t}{T\vartheta}} dt + C_I \right] = \\ &= e^{-\frac{t}{\vartheta}} \left[\frac{A\vartheta}{C} e^{\frac{t}{\vartheta}} - \frac{AT\vartheta}{C(T-\vartheta)} \cdot e^{\frac{(T-\vartheta)t}{T\vartheta}} + C_I \right] = \\ &= \frac{A\vartheta}{C} - \frac{AT\vartheta}{C(T-\vartheta)} e^{-\frac{t}{\vartheta}} + C_I e^{-\frac{t}{\vartheta}}. \end{aligned}$$

При $t = 0$ $i_\partial = 0$, в силу чего

$$C_I = -\frac{A\vartheta}{C} + \frac{AT\vartheta}{C(T-\vartheta)}.$$

Приняв во внимание также, что $\vartheta = \frac{C}{B}$, получим окончательно: научная библиотека

Последнее уравнение разрешает проследить работу уравнительных обмоток при нестационарном режиме агрегата. Оно отличается от уравнения (6) присутствием во второй части нового члена, который и при $T > 0$, $T < 0$ и при $T = 0$, как это не трудно убедиться, представляет положительную величину, в силу чего во всех этих случаях процесс нарастания тока в дифференциальных обмотках тормозится.

Детальное исследование функции по уравнению (14) показывает, что при заданном ϑ процесс будет протекать тем быстрее, чем меньше T .

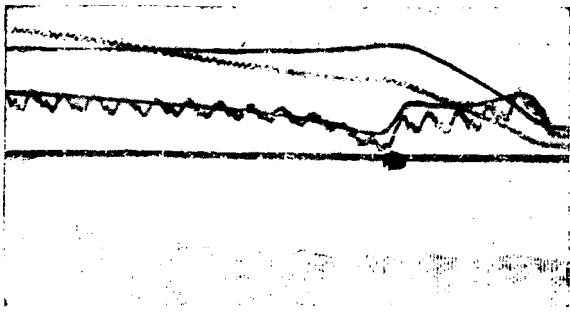


Рис. 6. Работа уравнительных обмоток при пуске в ход двигателя блюминга

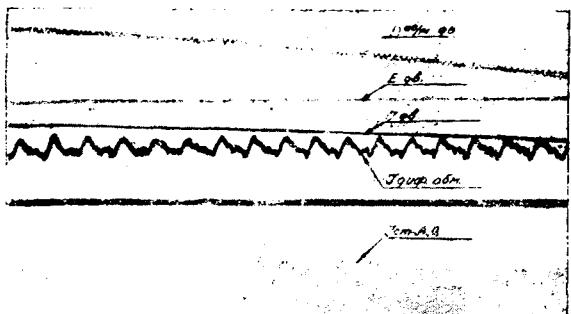


Рис. 7. Ток дифференциальной обмотки при прокатке

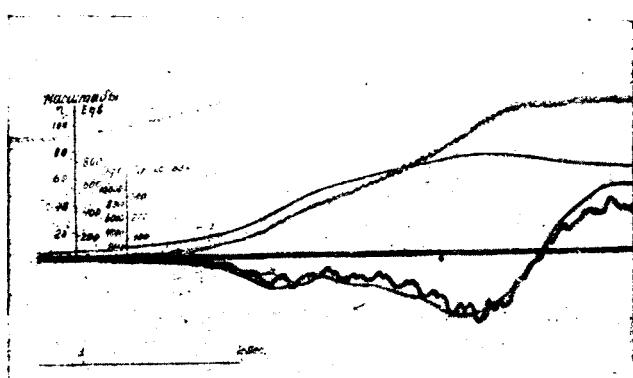


Рис. 8. Ток дифференциальной обмотки при торможении двигателя в генераторном режиме

При $T = 0$, что физически означает включение нагрузки при постоянстве величины э. д. с. генераторов, ток дифференциальной обмотки будет нарастать по закону

$$i_d = \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{t}{\vartheta}} \right),$$

выведеному нами ранее. При заданном и неизменном T процесс выравнивания нагрузки будет происходить тем быстрее, чем меньше ϑ . Наивыгоднейшее значение i_d будет очевидно при $\vartheta = 0$, стремление к нему при

Если по уравнению (12) проследить процесс установления разницы токов генераторов $i_2 - i_1$, то получим запаздывание во времени процессов выравнивания. При установившемся режиме ток дифференциальной обмотки $I_{d \max}$ и разность токов генераторов здесь, как и в предыдущем случае, выражаются формулами:

$$I_{d \max} = \frac{A}{B} = \frac{a(\gamma - 1) I_m}{a \frac{W_o}{W_m} (\gamma + 1) + 2r_d \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + 2R_2},$$

$$\Delta I = I_2 - I_1 = 2 \left(1 + \frac{r_d}{R_1} \right) I_{d \max}.$$

Все выведенные нами ранее положения о выборе параметров дифференциальной обмотки остаются в силе и еще более подчеркивается необходимость достижения возможно меньшей величины ϑ . Это положение подтверждается тем соображением, что установившийся ток дифференциальной обмотки от нагрузки не зависит, что наибольшее выравнивание происходит при установившемся токе $I_{d \max}$. Значит, вне зависимости от того, по какому закону изменяется ток, потребляемый двигателем, установление тока i_d должно быть возможно быстрым.

Приводимый ниже экспериментальный материал относится к работе генераторов Ильгнера, снабженных уравнительными обмотками по потенциометрической схеме.

На осциллограммах рис. 6, 7 и 8 приведено протекание тока дифференциальной обмотки при пуске в ход, работе и торможении в генераторном режиме прокатного двигателя блюминга, причем все три осциллограммы дают один непрерывный процесс, начало которого видно из рис. 6, продолжение — из рис. 7 и конец — из рис. 8. Весь процесс в целом изображен на рис. 9. На этих осциллограммах записаны скорость вращения прокатного двигателя, его ток и напряжение и ток дифференциальной обмотки. Снятый здесь же ток асинхронного двигателя агрегата Ильгнера служит масштабом времени. Анализ осциллограммы показывает достаточно четкую работу дифференциальной обмотки.

Имеющиеся на всем протяжении осциллограммы колебания высшего порядка в токе дифференциальной обмотки можно объяснить колебаниями коэффициента γ за один оборот двигателя. Действительно, при торможении, когда скорость агрегата Ильгнера наибольшая, частота этих колебаний увеличивается, что можно проследить по осциллограмме.

На осциллограмме рис. 10 дано протекание токов обоих генераторов, тока двигателя и тока дифференциальной обмотки за некоторый режим работы. В правой части осциллограммы кончается прокатка, далее следует торможение, пуск и работа двигателя в обратном направлении и вновь торможение. По осциллограмме можно проследить синхронное изменение токов обоих генераторов вместе с их суммарным током — током двигателя. Токораспределение удовлетворительное при одновременном прохождении через O всех токов. Величина коэффициента γ , принятая нами постоянной, на самом деле в сильной степени зависит от величины тока возбуждения I_m и, кроме того, она испытывает колебания и за время одного оборота двигателя при одном и том же токе возбуждения.

На рис. 5 показана так называемая дифференциальная характеристика генераторов за прямой и обратный ход характеристики холостого хода. Она представляет генераторов $E_o - E_1$ и може

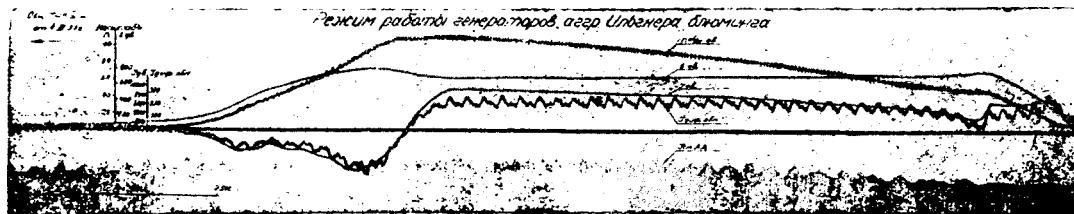


Рис. 9. Пуск в ход прокатки и торможение двигателя бломинга

схемы, приведенной на том же рис. 5. Эта кривая может дать суждение только о средней разности между э. д. с. генераторов, так как за время одного оборота эта разность претерпевает изменения. На осциллограмме рис. 11 записаны ток дифференциальной обмотки, ток и напряжение двигателя при холостом ходе (левая часть) и при пуске. Период изменения основной гармоники в колебаниях тока дифференциальной

потому, что вследствие индуктивной связи между уравнительными обмотками и обмотками основного возбуждения в этих последних наводятся э. д. с. и возникают токи, искажающие процесс регулирования и работу автоматической аппаратуры. Указанное явление в данной схеме будет иметь место и при последовательном и при параллельном соединении обмоток основного возбуждения обоих генераторов.

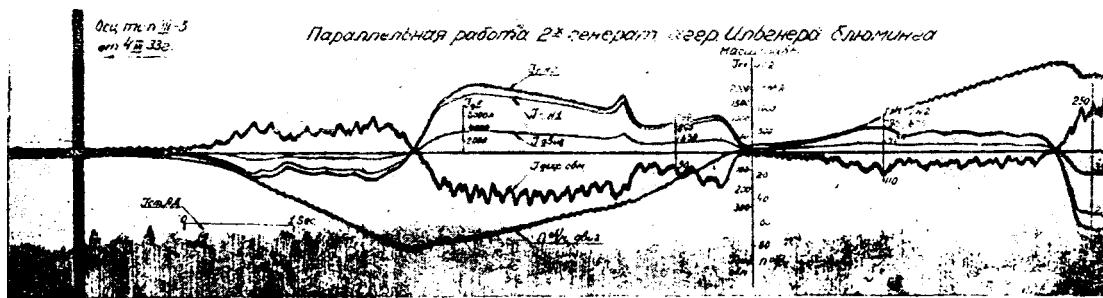


Рис. 10. Токи генераторов, двигателя и дифференциальной обмотки за режим прокатки

обмотки соответствует времени одного оборота агрегата, если это проследить по частоте переменного тока, подводимого к статору асинхронного двигателя агрегата, снятому на той же осциллограмме. Число пульсаций более высокого порядка соответствует примерно числу полюсов генераторов постоянного тока. Отсюда с очевидностью вытекает, что конструктирование дифференциальной обмотки на возможно быстрое установление тока в ней необходимо для получения удовлетворительной ее работы.

3. Схема с серийными обмотками

На рис. 14 изображена имевшая прежде большое распространение и оставленная теперь схема с уравнительными компаундными обмотками, принцип действия которых ясен из рисунка. Для ответственных приводов с резко переменной и реверсивной нагрузкой эта схема не может быть применяема, во-первых, потому, что уравнительные обмотки сообщают генераторам компаундную характеристику, а во-вторых,

4. Схема с перекрещенными серийными обмотками

Схема на рис. 15 является усовершенствованием схемы рис. 14. На основных полюсах расположены дифференциальные (противокомпаундные) обмотки *A* и *B*, обтекаемые током своего генератора, и компаундные *C* и *D*, обтекаемые током второго генератора. Если по тем или иным причинам э. д. с. генератора 2 более, чем генератора 1, то ток *i₂* более размагнитит свой генератор и более подмагнитит генератор 1; влияние тока *i₁* будет обратное сказанному. В результате такого их действия нагрузка генераторов обязана выравняться.

Исследуем аналитически работу схемы вначале для установленвшегося режима, вновь приняв в основу анализа протекание намагничивающих характеристик согласно рис. 4.

Электродвижущая сила более нагруженного генератора 2 при установленемся режиме и токе *I₂* будет равна

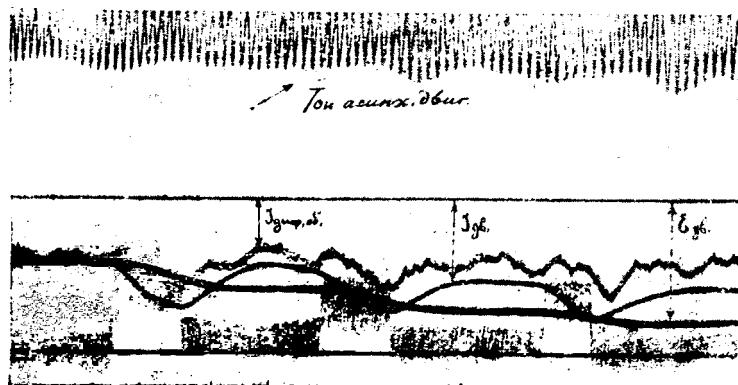


Рис. 11. Осциллограмма тока дифференциальной обмотки при пуске асинхронного двигателя

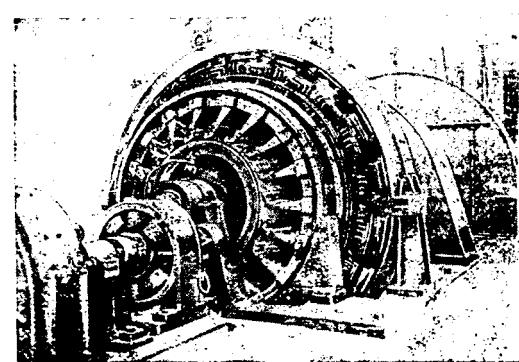


Рис. 12. Генератор 3500 kW (схема рис. 2). В верхней части основные обмотки

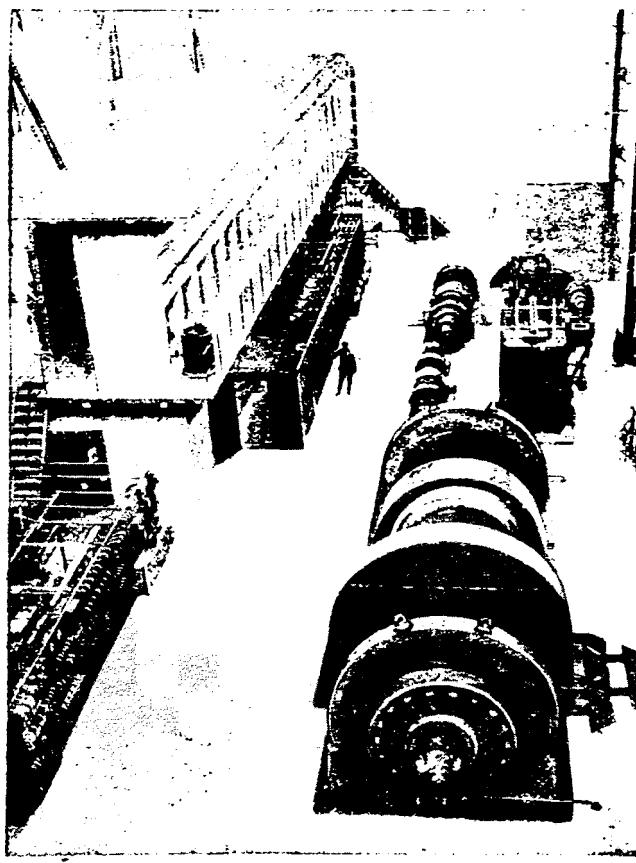


Рис. 13. Общий вид машинного помещения агрегата Ильгнера (в процессе монтажа)

$$E_2 = \gamma a I_m - \gamma a \frac{W_a}{W_m} I_2 + \gamma a \frac{W_a}{W_m} I_1. \quad (15)$$

То же для генератора 1:

$$E_1 = a I_m - a \frac{W_a}{W_m} I_1 + a \frac{W_a}{W_m} I_2. \quad (16)$$

Здесь γ , a , I_m , W_m сохраняют прежние определения, а W_a означает число витков одной уравнительной обмотки.

Обозначив через R общее сопротивление главной цепи одного генератора, напишем уравнение э. д. с. для внутреннего замкнутого контура генераторов для установившегося режима

$$E_2 - E_1 = (I_2 - I_1) R$$

или

$$a I_m (\gamma - 1) - a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) (I_2 - I_1) = (I_2 - I_1) R \quad (17)$$

или

$$(I_2 - I_1) \left[R + a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) \right] = a I_m (\gamma - 1). \quad (17')$$

$i_{g\text{бур.}}$

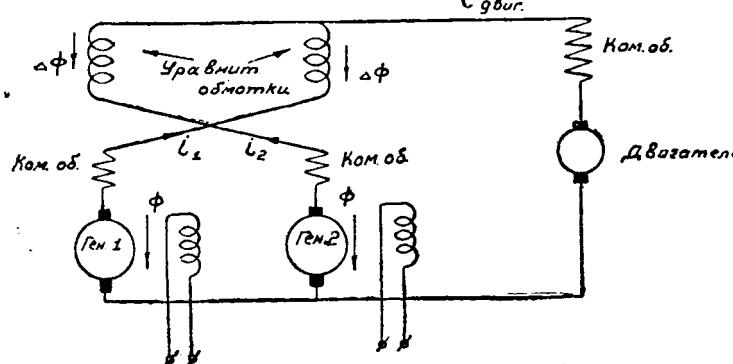


Рис. 14. Схема параллельной работы генераторов с компаундными

Решая это последнее уравнение относительно разности токов $I_2 - I_1$, будем иметь:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{a(\gamma - 1) I_m}{R + a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1)}. \quad (18)$$

Полученное выражение позволяет заключить, что идеальное выравнивание здесь также не имеет места, так как правая часть уравнения (18) обращается в 0 только при $\gamma = 1$, т. е. при полной идентичности намагничивающих характеристик обоих генераторов. Далее, разность в токах обоих генераторов при установившемся режиме не зависит от нагрузки, что опять означает улучшение относительной степени выравнивания с увеличением общего тока, отдаваемого генераторами. Сопротивление уравнительных обмоток является здесь положительным фактором, улучшающим выравнивание, однако вряд ли можно пойти на увеличение их сопротивления, если учсть возрастание в связи с этим потерь. Единственной величиной, которая устанавливает степень выравнивания, является число витков уравнительной обмотки W_a .

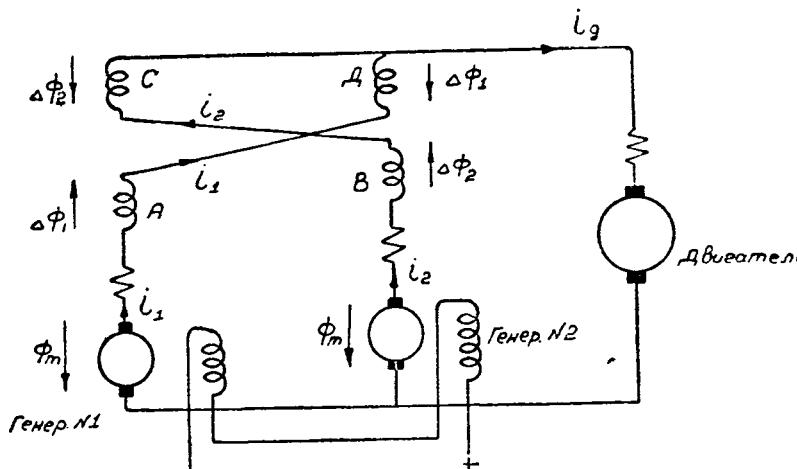


Рис. 15. Схема выравнивания параллельной работы генераторов при помощи серийных перекрещенных обмоток

При неизменном токе возбуждения I_m э. д. с. генератора, например, 2, по уравнению (15) равна при установленном режиме

$$E_2 = \gamma a I_m - \gamma \frac{W_a}{W_m} a (I_2 - I_1) = \\ = \gamma a I_m - \frac{a^2 \frac{W_a}{W_m} \gamma (\gamma - 1) I_m}{R + a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1)} = \text{const}, \quad (19)$$

т. е. генераторы сохраняют полностью шунтовую характеристику, и при данном токе I_m при всех нагрузках э. д. с. генератора сохраняет неизменную величину.

Перейдем к исследованию данной схемы при нестационарном процессе нарастания тока возбуждения по закону экспоненциальной кривой, причем будем полагать, что обмотки возбуждения обоих генераторов соединены последовательно.

Если обозначить через L общую индуктивность всех обмоток в главной цепи одного генератора, то равновесие э. д. с. для внутреннего замкнутого контура [уравнение (17)] для рассматриваемого режима получит вид

$$a i_m (\gamma - 1) - a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) (i_2 - i_1) = \\ = (i_2 - i_1) R + L \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right). \quad (20)$$

Обозначим

$$i_2 - i_1 = i_\Delta$$

и

$$\frac{d}{dt}(i_2 - i_1) = \frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} = \frac{di_\Delta}{dt}.$$

Заметив также, что

$$i_m = I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

будем иметь

$$a(\gamma - 1)I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - a(\gamma + 1) \frac{W_a}{W_m} i_\Delta = R i_\Delta + L \frac{di_\Delta}{dt},$$

или

$$\frac{di_\Delta}{dt} + \frac{1}{L} \left[R + a \cdot \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) \right] i_\Delta = \frac{1}{L} a(\gamma - 1)I_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (21)$$

Индуктивная связь между обмотками основного возбуждения и обмотками дифференциальными равна нулю благодаря последовательному соединению обмоток возбуждения между собою и последовательному и обратному соединению уравнительных обмоток между собою. В силу только что сказанного ток i_m в обмотках возбуждения нарастает по закону, определяемому исключительно параметрами этих последних и величиной приложенного напряжения.

Введем обозначения:

$$B' = R + a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1),$$

$$A = a(\gamma - 1)I_m,$$

$$\vartheta' = \frac{L}{B'}.$$

Уравнение (21) преобразовывается

$$\frac{di_\Delta}{dt} + \frac{B'}{L} \cdot i_\Delta = \frac{A}{L} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (22)$$

Последнее уравнение подобно уравнению (13'), вследствие чего мы сразу выпишем результат интегрирования

$$i_\Delta = (i_2 - i_1) = \frac{A}{B'} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \frac{AT}{B'(T - \vartheta')} \left(e^{-\frac{t}{T}} - e^{-\frac{t}{\vartheta'}}\right). \quad (23)$$

Анализ этого уравнения, так же как и раньше, подчеркивает, что для быстрейшего установления выравнивания необходимо соблюдение требования минимального значения для ϑ' .

5. Схема с перекрещенными серийными обмотками при параллельном соединении обмоток возбуждения

Уже на основании теории, изложенной нами выше, возможно отметить, что параллельное соединение обмоток возбуждения генераторов, работающих совместно на общую нагрузку, не может быть признано желательным, так как индуктивная связь между обмотками уравнительными и возбуждения может, во-первых, исказить и замедлить процесс выравнивания, во-вторых, исказить основной процесс режима машин, установившегося в результате параллельной работы генераторов.

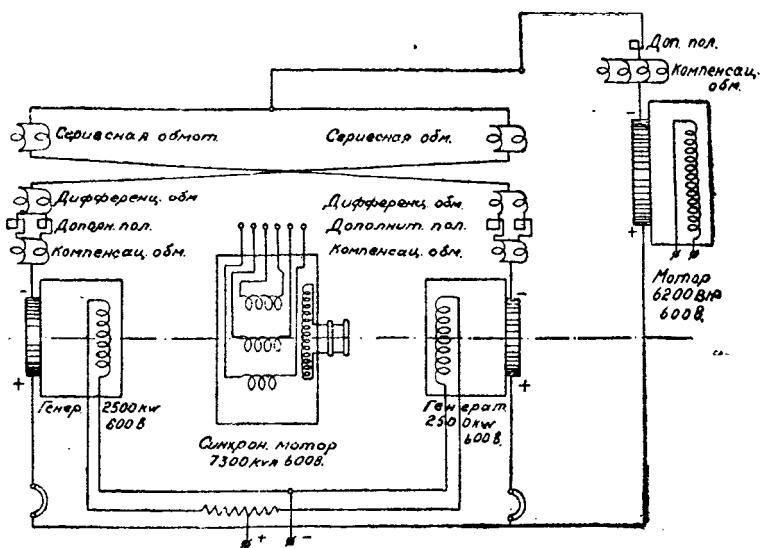


Рис. 16. Принципиальная схема соединения обмоток агрегата Леонарда для питания прокатного двигателя рельсового стана 800 тнн

рис. 16 дана такая схема, примененная у агрегата Леонарда, служащего для питания рельсового стана 800 тнн на Кузнецком металлургическом заводе. Анализическое исследование процесса выравнивания нагрузок при нестационарном режиме здесь представляет известные трудности вследствие необходимости учета индуктивной связи между обмотками, расположеными на одних и тех же полюсах.

Обозначим:

i_{m2} , I_{m2} — переходный и установившийся токи в обмотке возбуждения генератора 2;

i_{m1} , I_{m1} — то же для генератора 1;

r_m , L_m — сопротивление и индуктивность цепи возбуждения одного генератора;

R , L — сопротивление и индуктивность главной цепи одного генератора;

i_2 , I_2 и i_1 , I_1 — нестационарный и установившийся токи соответствующих генераторов;

M — коэффициент взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и любой из уравнительных обмоток при оставлении вне внимания рассеяния обмоток.

Электродвижущая сила более нагруженного генератора 2 может быть выражена, как и ранее:

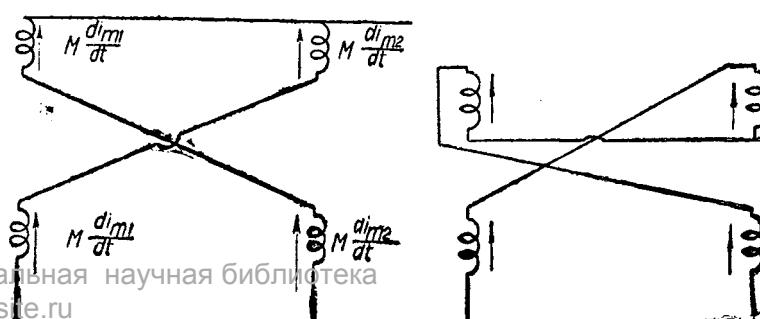
$$e_2 = a \gamma i_{m2} - \gamma a \frac{W_a}{W_m} (i_2 - i_1); \quad (15)$$

то же для генератора 1:

$$e_1 = a i_{m1} + a \frac{W_a}{W_m} (i_2 - i_1). \quad (16)$$

Разность э. д. с. по внутреннему замкнутому контуру обоих генераторов

$$e_2 - e_1 = a(\gamma i_{m2} - i_{m1}) - \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1)\right] (i_2 - i_1) \quad (24)$$



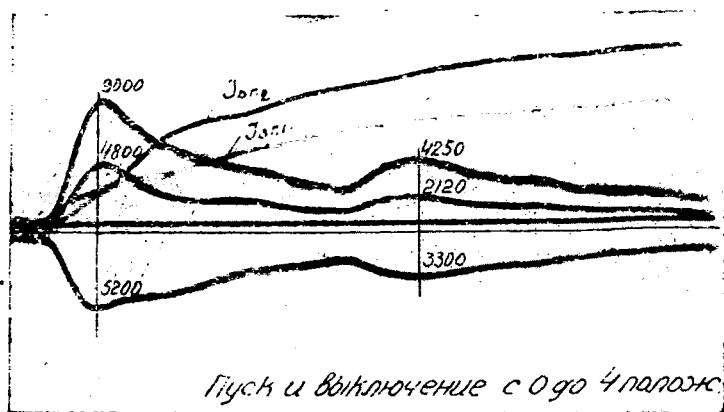


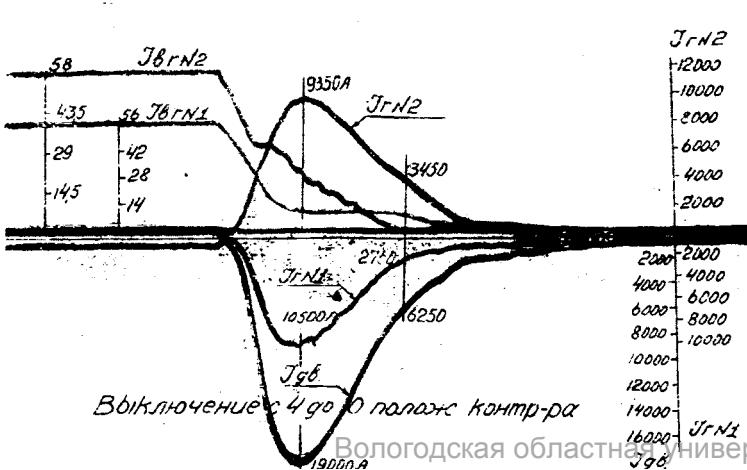
Рис. 19. Пуск в ход прокатного двигателя

должна уравновеситься падением напряжения в омическом сопротивлении, э. д. с. самоиндукции обмоток в главной цепи машин и э. д. с. взаимоиндукции, на-водимыми в уравнительных обмотках благодаря изменению токов в обмотках возбуждения:

$$e_2 - e_1 = i_2 R - i_1 R + L \frac{di_2}{dt} - L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_{m2}}{dt} + M \frac{di_{m1}}{dt} - M \frac{di_{m2}}{dt} + M \frac{di_{m1}}{dt}. \quad (25)$$

Правильность написанного равенства подтверждается схемами рис. 17 и 18. Действительно, если бы все четыре уравнительные обмотки были согласно рис. 17 компаундными, то в замкнутом внутреннем контуре генераторов э. д. с. взаимоиндукции в сумме дали бы нуль. Так как действительная схема аналогична изменению присоединения концов у двух верхних обмоток, то результирующая э. д. с. может быть равна нулю лишь при последовательном соединении обмоток, когда $i_{m_1} = i_{m_2} = i_m$.

Теперь о знаке перед M . Изменение тока возбуждения в обмотке генератора 2 наводит в противокомпаундной уравнительной обмотке э. д. с. взаимоиндукции $M \frac{di_{m2}}{dt}$. Ток, вызываемый этой последней, будет стремиться подмагничивать генератор, значит, э. д. с. $M \frac{di_{m2}}{dt}$ будет иметь направление, совпадающее с направлением э. д. с. данного генератора от основного потока. Электродвижущая сила $M \frac{di_{m2}}{dt}$, наводимая в компаундной обмотке, будет направлена против



э. д. с. генератора. При обходе замкнутого контура обе эти э. д. с. войдут в правую часть уравнения со знаком минус.

Сопоставляя уравнения (24) и (25), получим

$$a(\gamma i_{m2} - i_{m1}) - \left[a \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) \right] (i_2 - i_1) = R(i_2 - i_1) + \\ + L \cdot \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) - 2M \left(\frac{di_{m2}}{dt} - \frac{di_{m1}}{dt} \right)$$

К этому уравнению можно присоединить равновесие э. д. с. в контуре цепи возбуждения каждого генератора.

Для второго генератора будем иметь

$$U_m = r_m \cdot L_m + L_m \cdot \frac{di_{m2}}{dt} - M \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right). \quad (27)$$

Знак перед M поставлен на основании рассуждений, приведенных выше.

Для первого генератора будем иметь

$$U_m = r_m \cdot i_{m1} + L_m \frac{di_{m1}}{dt} + M \left(\frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right). \quad (28)$$

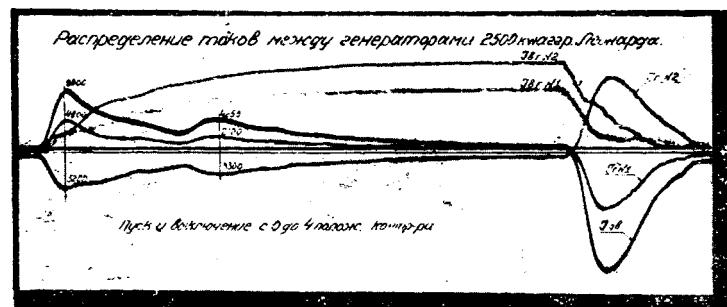


Рис. 21. Пуск в ход и торможение двигателя согласно схеме рис. 16

Если обозначить

$$i_2 - i_1 = i_{\Lambda}$$

TO

$$\frac{d}{dt}(i_2 - i_1) = \frac{di_2}{dt} - \frac{di_1}{dt} = \frac{di_\Delta}{dt}.$$

Изменив уравнения (26), (27) и (28) и продифференцировав каждое из них по t , получим окончательно шесть уравнений, разрешение которых может позволить определить величину зависимости

$$i_{m2} = f(t), \quad i_{m1} = f_1(t)$$

17

$$i_\Delta = i_2 - i_1 = \mathfrak{e}_\Delta(t).$$

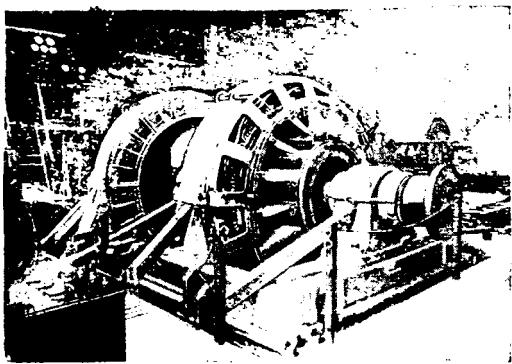


Рис. 22. Моторгенераторная группа (схема рис. 16) на испытательном стande

$$-2M \left(\frac{di_{m2}}{dt} - \frac{di_{m1}}{dt} \right). \quad (a)$$

$$a \left(\gamma \cdot \frac{di_{m2}}{dt} - \frac{di_{m1}}{dt} \right) - \left[a \cdot \frac{W_a}{W_m} (\gamma + 1) + R \right] \frac{di_{\Delta}}{dt} -$$

$$-L \frac{d^2 i_{\Delta}}{dt^2} - 2M \left(\frac{d^2 i_{m2}}{dt^2} - \frac{d^2 i_{m1}}{dt^2} \right). \quad (b)$$

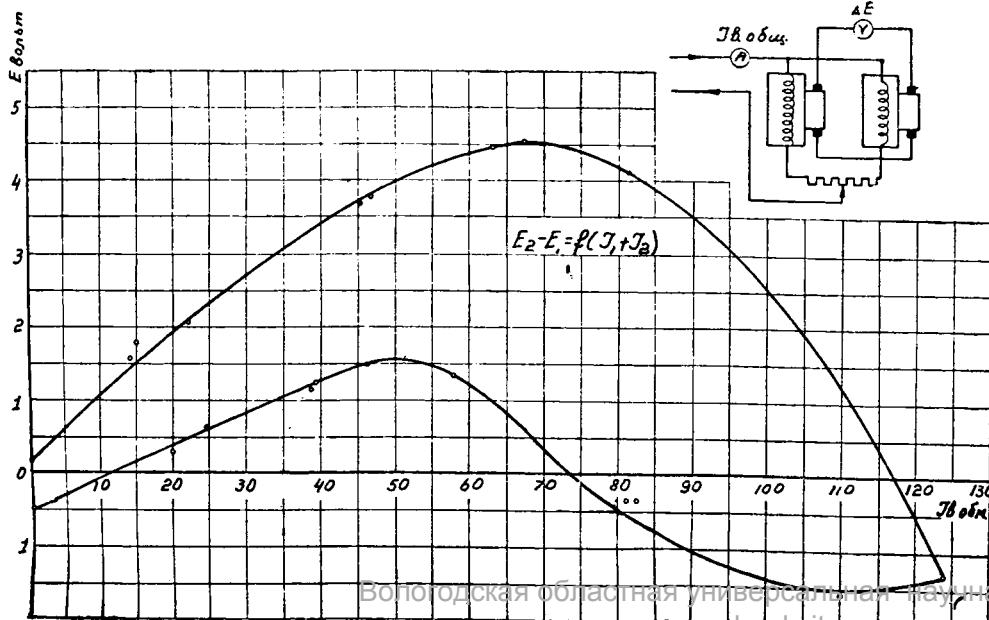
$$U_m = r_m i_{m2} + L_m \frac{di_{m2}}{dt} - M \cdot \frac{di_{\Delta}}{dt}. \quad (c)$$

$$0 = r_m \frac{di_{m2}}{dt} + L_m \frac{d^2 i_{m2}}{dt^2} - M \frac{d^2 i_{\Delta}}{dt^2}. \quad (d)$$

$$U_m = r_m i_{m1} + L_m \frac{di_{m1}}{dt} + M \cdot \frac{di_{\Delta}}{dt}. \quad (e)$$

$$0 = r_m \frac{di_{m1}}{dt} + L_m \frac{d^2 i_{m1}}{dt^2} + M \cdot \frac{d^2 i_{\Delta}}{dt^2}. \quad (f)$$

После исключения лишних неизвестных в конечном счете для определения $i_{m2} = f(t)$ или $\Delta i = f(t)$ будет получено дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами, правая часть которого будет величиной постоянной, так что интеграл этого уравнения может быть взят. Мы не будем проводить этого решения вследствие его громоздкости, а качественный анализ проведем следующим образом:



При $t = 0$, если рассматривать пуск в ход неподвижного двигателя, когда возбуждение генераторов растет с нулевого значения, разность токов в главной цепи генераторов $i_{\Delta} = i_2 - i_1$ равна нулю. Эта разность растет по некоторому закону, определяемому функцией, общий вид которой может быть написан так:

$$i_{\Delta} - i_2 - i_1 = f(C_I e^{-t}, C_H e^{Bt}).$$

Во всяком случае, в начальный период первая производная от этой функции положительна. Производные для $\frac{di_{m2}}{dt}$ и $\frac{di_{m1}}{dt}$ также положительны.

Теперь обратимся к уравнениям (c) и (e). В правой части первого из них э. д. с. взаимоиндукции входит со знаком минус, а у второго—со знаком плюс. Так как левые части этих уравнений одинаковы, то отсюда мы можем заключить, что рост тока i_{m2} должен быть интенсивнее, чем тока i_{m1} . Ток i_{m2} есть ток возбуждения генератора с большей э. д. с., отсюда, конечно, вытекает, что процесс выравнивания нагрузки будет заторможен, а токи i_{m2} и i_{m1} будут искажены вследствие индуктивной связи между обмотками уравнительными и основного возбуждения. Подтверждением изложенной теории являются помещаемые ниже осциллографические записи, полученные при исследовании работы агрегата Леонарда на Сталинском металлургическом заводе (схема рис. 16).

На осциллограммах рис. 19, 20 и 21 показан пуск в ход и торможение прокатного двигателя; при торможении генераторы работают в двигательном режиме. При пуске ток i_{m2} растет интенсивнее, чем i_{m1} (кривая первого тока выпукла к оси абсцисс и кривая i_{m1} вогнута). При спадании тока главной цепи после достижения пускового максимума картина, как видно из осциллограммы, меняется. Колебания тока главной цепи отражаются на характере протекания токов возбуждения³⁾. При торможении ток i_{m2} падает интен-

³⁾ Несовпадения суммы токов обоих генераторов и тока двигателя обясняются неточностью определения масштабов, причем корректирование преднамеренно не произведено.

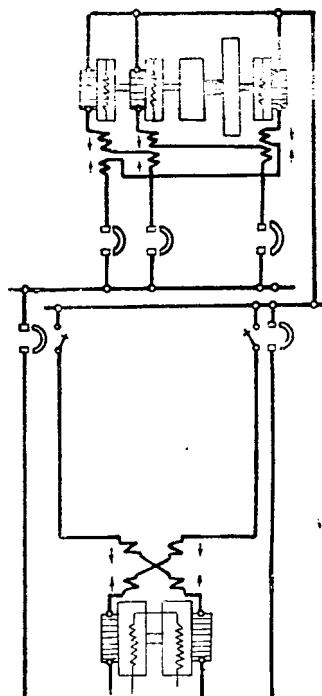


Рис. 24. Схема уравнительных перекрестенных обмоток для параллельного соединения трех

сивнее, чем ток i_{m1} ; после перехода через наибольший отрицательный ток торможения картина опять меняется. При этом, конечно, неизбежны искажения в большей или меньшей степени выравнивания токораспределения между обоими генераторами, причем это искажение будет зависеть не только от величины суммарной нагрузки, но также от начальных параметров переходного процесса и от характера установленного режима.

Наблюдения по точным приборам и анализ осцилограмм показали, что разница в токораспределении может достигать $30 \div 40\%$, причем отклонения носят незакономерный и непостоянный характер, так как зависят, как отмечено выше, от характера процесса и от начальных параметров его. В силу всего сказанного параллельное соединение обмоток возбуждения генераторов не может быть рекомендовано для всех рассмотренных нами методов улучшения параллельной работы генераторов. Вследствие возможного неравенства параметров обмоток возбуждения отдельных генераторов (r_m и L_m), вызываемого как конструктивным выполнением, так и эксплуатационными условиями (неодинаковое охлаждение), параллельное соединение не может быть рекомендовано также и по этой причине.

На рис. 23 дано протекание разностной характеристики $E_2 - E_1$ в функции общего тока возбуждения обоих генераторов, работающих по схеме рис. 16, за прямой и обратный ход намагничивающей характеристики. Здесь налицо расхождение (и большое) в разностной характеристике при возрастании и спадании напряжения, что предъявляет особые требования к работе уравнительных обмоток. Отметим здесь вновь, что эта характеристика дает только средние величины. Истинная картина может быть получена путем осциллографирования, если в схеме рис. 23 вместо вольтметра включить шлейф осциллографа и при врачаю-

щихся с нормальной скоростью генераторах включить, а затем снять возбуждение.

Общие выводы

Необходимость в устройстве для достижения одинакового токораспределения (в целях защиты генераторов от перегрузок и от последствий в связи с этим неисправной коммутации) очевидна. Чтобы облегчить работу уравнительных обмоток, которая при быстропрерывном режиме работы чрезвычайно ответственна, необходима постановка требований к возможно совершенной идентичности генераторов, участвующих в параллельной работе как в отношении конструктивного выполнения, так и в отношении электрическом. Во всех случаях, рассмотренных нами, обмотки возбуждения генераторов должны быть соединены последовательно, параллельное соединение обмоток может быть допущено, как исключение при работе машин на постоянную или мало и медленно меняющуюся нагрузку.

Как схема с потенциометрическими уравнительными обмотками, так и схема с перекрещенными серийными обмотками могут дать удовлетворительную параллельную работу, и исчерпывающего преимущества друг перед другом не имеют.

Так и другие схемы идеального выравнивания дать не могут; степень и быстрота выравнивания соответствующим выбором параметров обмотки может быть установлена в достаточной мере высокой. Потенциометрическая схема, конечно, проще, дешевле; ее обмотка рассчитывается на малый ток ($10 \div 15\%$ от номинального), в связи с чем ее монтаж и изоляция упрощаются. Отметим также, что увеличение сопротивления главной цепи машин отрицательно влияет на скорость роста и падения оборотов прокатного двигателя.

22/IV 1934 г.

Результаты эксплоатации преобразовательной установки Волховского алюминиевого комбината

Инж. Г. К. Цверава
Волховской алюминиевый комбинат

В предыдущей статье¹⁾ мы дали краткое описание преобразовательной подстанции, не вдаваясь в вопросы эксплоатации. Сейчас, когда прошло почти два года со дня пуска первого агрегата, небезынтересно подвести итоги и поделиться практическим опытом эксплоатации.

1. Общие указания

Как уже было указано, мотор-генераторы были заказаны фирме AEG в январе 1931 г. Первый агрегат былпущен 12 мая 1932 г., второй вступил в работу 15 июня 1932 г. и третий—6 сентября 1932 г. Пуски производились в присутствии представителей фирмы, все же произошли две неполадки, которые следует отметить:

1. При включении масляного выключателя агрегата № 2 из синхронного двигателя пошел густой дым с характерным запахом лака. До выяснения причин представители фирмы прекратили пуск. Оказалось, что включение производилось при пониженном напряжении сети, порядка 9 kV, поэтому пусковые токи были сравнительно большими, вследствие чего произошел перегрев обмоток. Это же явление наблюдалось и у двух других двигателей, но в такой же степени.

2. При пуске агрегата № 1 синхронный двигатель не трогался с места и сильно гудел, хотя напряжение сети было нормальное, т. е. 10,5 kV. Расследование показало, что у пускового автотрансформатора было неверное включение вторичных ответвлений, так что вместо требуемых 4,2 kV пусковое напряжение равнялось 3180 V, что было недостаточным для разворота.

Как уже сообщалось, подстанция рассчитана на питание двух серий электролизных ванн, число которых в серии может доходить до 80. В силу особенностей технологического процесса электролиза алюминия и некоторых экономических причин ванны пускались в работу не сразу все, а в известной последовательности (см. табл. 1).

В настоящее время в работе находятся 74 ванны первой серии; в январе 1934 г. предполагался пуск второй серии, но из-за напряженного состояния системы Ленэнерго пуск отложен до апреля. Чтобы судить об энергоемкости производства алюминия, достаточно сказать, что в 1933 г. потреблено около $70 \cdot 10^6$ kWh энергии²⁾ для выплавки металла, а в нынешнем году

Таблица 1

Количество энергии, израсходованное на выплавку алюминия в 1933 г.

Месяцы	Число работающих ванн	Расход энергии kWh	Удельный расход kWh/t
Январь	36	3 884 682	24 869
Февраль	36	3 558 475	25 472
Март	36	3 838 494	24 558
Апрель	36	3 845 691	24 355,7
Май	52	5 094 933	25 711
Июнь	66	5 952 967	24 773
Июль	70	6 895 352	23 279
Август	72	7 171 514	23 606
Сентябрь	72	7 151 794	24 669
Октябрь	72	7 327 851	23 799
Ноябрь	72	7 155 039	23 035
Декабрь	74	7 472 291	22 977
Итого		69 349 083	

запроектировано израсходовать около $130 \cdot 10^6$ kWh (см. табл. 1).

Мотор-генераторы работали на серию попеременно, причем продолжительность нормальной непрерывной работы каждого равна $30 \div 35$ суткам, после чего агрегат поступал в плановый ремонт или осмотр. Ясно, что при работе двух серий, когда под нагрузкой будут два преобразователя, режим придется изменить в сто-

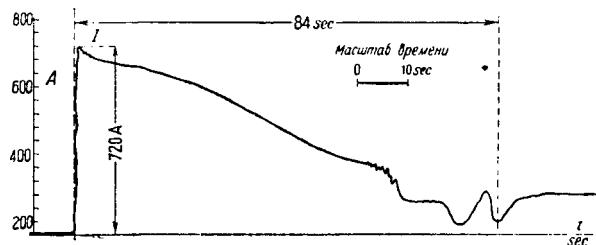


Рис. 1. Кривая изменения тока при пуске синхронного двигателя

рону увеличения срока непрерывной работы каждой единицы.

По договору с Ленэнерго резервные агрегаты очень часто вращались вхолостую в качестве синхронных компенсаторов. Активная энергия, затраченная в 1933 г. на эти цели, равна $1 \cdot 10^6$ kWh.

2. Работа машин

Ввиду новизны установки (помимо приемочных) был произведен еще целый ряд испытаний агрегатов, распределительного устройства и защиты, которые продолжаются и по настоящее время.

В октябре 1932 г. были произведены приемочные испытания, имевшие своей целью установить соответствие агрегатов условиям заказа. Определение потерь двигателя и генераторов и к. п. д. всего агрегата показало, что полученные данные мало чем отличаются от заводских. Сводку потерь и к. п. д. для мотор-генератора № 1 см. в табл. 2. Процесс пуска двигателя иллюстрирует кривая рис. 1, где ясно виден эффект синхронизации, наступающий через 60 сек. после включения масляника. Пусковой ток достигает кратности 1,08 от номинального тока и равняется 720 А; время, потребное для приближения к полному синхронизму, равно 84 сек.

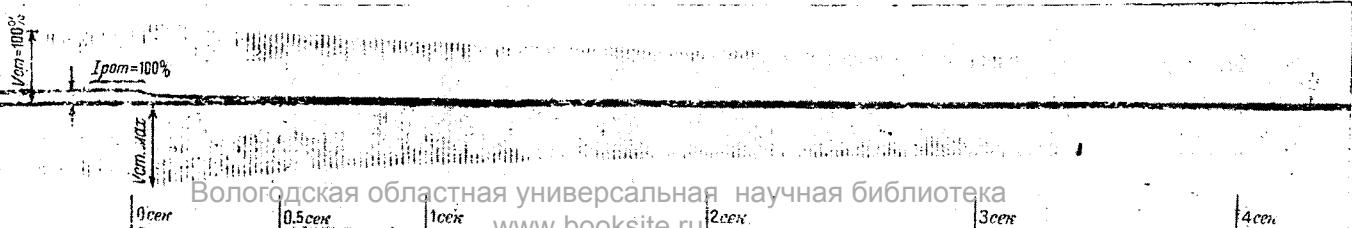
Установившийся ток при трехфазном коротком замыкании на зажимах двигателя при работе его генератором равен 198% от номинального тока вместо гарантийного значения 1·2,1.

Как известно, гашение поля рассматриваемого синхронного двигателя при любом отключении масляника состоит в введении последовательно с обмоткой ротора омического сопротивления порядка $1,34 \Omega$ при $R_{rot} = 0,357 \Omega$. Проверка гашения была произведена при перевозбуждении двигателя, так как этот режим часто применяется для улучшения $\cos \varphi$ сети и, кроме того, является наиболее тяжелым с точки зрения гашения поля; двигатель при испытании работал вхолостую и ток возбуждения был равен 400 А. Проверка производилась посредством осциллографа, который фиксировал изменения величин напряжения статора, тока и напряжения ротора. По осциллограмме (рис. 2) видно, что процесс затухания напряжения статора происходит очень медленно, достигая в конце 5-й сек. от начала гашения примерно 62÷64% от того напряжения, ко-

Таблица 2

Потери и коэффициент полезного действия мотор-генератора № 1

№	Наименование потерь	Нагрузка				
		$1/4$	$3/4$	$2/4$	$1/4$	
1	Генераторы № 1 и № 2	Потери в железе + потери на возбуждение	89,4	88	86,6	85,15
2		Потери в меди якорей	231,6	130	57,9	14,5
3		, контакте щеток	52	39	26	13
4		Добавочные потери	45,5	25,6	11,4	2,85
5	Мотор № 1	Потери в железе статора + + потери на возбуждение	177,2	160,4	145,8	133,8
6		Потери в меди статора	78,6	44,3	19,6	4,9
7		Добавочные потери	27,3	15,4	6,8	1,7
8	Агрегат	Механические потери	231,6	231,6	231,6	231,6
9		Потери на вентиляцию	30	30	30	30
10		Сумма всех потерь	963,2	764,3	615,7	517,5
11		Полезная мощность	9 110	6 830	4 550	2 275
12		Потребляемая мощность	10 073,2	7 496,3	5 165,7	2 792,5
13		к. п. д.	90,43	89,94	88,08	77,25
14		Гарантийный к. п. д.	98,62	88,40	—	—



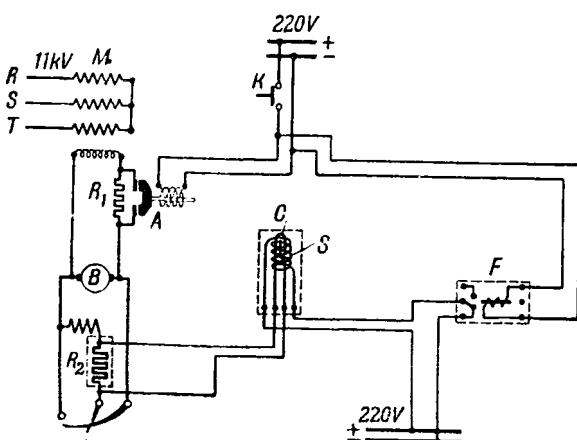


Рис. 3. Схема гашения поля синхронного двигателя. Пунктиром обведены элементы дополнительного устройства

торое было приложено до размыкания масляника, т. е. около 6,2 kV. Затем снижение напряжения происходит настолько медленно, что почти не имеет практического значения. Несмотря на то, что процесс гашения поля при коротком замыкании внутри двигателя протекает быстрее, чем при холостом ходе вследствие размагничивающего действия реакции якоря, все же существующее устройство гашения не может гарантировать быстрое снижение напряжения статора до требуемой величины в 1 kV, которое не могло бы поддержать образовавшуюся при коротком дугу.

Так как сопротивление гасителя используется во время пуска также и для ослабления влияний короткозамкнутой обмотки возбуждения на скорость вращения двигателя при его разворачивании, то повысить сопротивление не представлялось возможным и поэтому был сделан соответствующий запрос AEG. Последняя предложила дополнительное устройство, состоящее в том, что одновременно с включением упомянутого сопротивления в цепь ротора вводится добавочное сопротивление также и в цепь возбуждения возбудителя.

Рис. 3 изображает схему полного гашения поля. При нормальной работе двигателя автомат A включен, сопротивление R_1 шунтируено; ток возбуждения возбудителя проходит через ртутную трубку специального реле Cutax C-S (рис. 4), т. е. сопротивление R_2 зашунтируено. При любом отключении масляника замыкаются блокировочные контакты K, срабатывают сигнальные реле F и, таким образом, оживляется катушка S ртутного реле, под действием которой ртуть втягивается вверх и, разрывая при этом цепь возбуждения, вводит сопротивление R_2 . Одновременно с этим выключается автомат A, вводится в цепь индуктора сопротивление R_1 , и таким образом получается более интенсивное как бы двойное гашение. Добавочное устройство в настоящее время находится в стадии монтажа, и польза его действия еще не проверена.

Испытания коммутации генераторов дали хорошие результаты и производились методом возвратной работы. Дальнейший опыт показал, что коллекторы ведут себя удовлетворительно при всех имеющихся режимах. Искрение под щетками не могло быть устранено совершенно по следующим причинам:

В обстановке алюминиевого производства работа коллектора

духе взвешенных частиц окиси алюминия, боксита, пыли, а также различных газов, которые, проникая сквозь щели здания в машинный зал, загрязняют и окисляют коллектор и являются причиной сильного искрения. В летние месяцы, когда окна машинного зала открыты для лучшего охлаждения агрегатов, налет глинозема на генераторах достигает значительной степени, коллектор приобретает фиолетовый оттенок и работа его ухудшается. Кроме того, есть основания полагать, что тепловой режим окружающего коллектор воздуха также влияет на искрение в том смысле, что резкие колебания температуры изменяют сопротивление коллекторных пластин³⁾.

Очень остро стоит вопрос со щетками, так как применяющиеся до сих пор импортные щетки уже на исходе, а щетки, заказанные заводу „Электроуголь“, не выдержали испытания. Один из параллельно работающих генераторов был снабжен отечественными щетками, причем после 13 час. работы на электролиз оказалось, что из общего числа 408 щеток у 33 нарушилось соединение между поводком и углем, произшедшее вследствие сильного нагревания. Измерения температур щеток сведены в табл. 3. Было высказано

Таблица 3

Нагрев щеток и коллектора генераторов при применении отечественных и импортных щеток

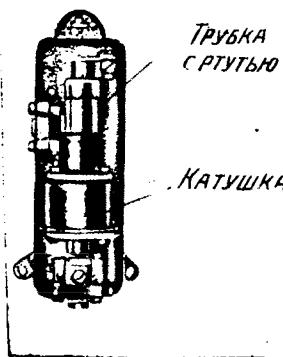
Температура щеток			Температура коллектора			
Электроуголь	AEG	Δ	Электроуголь	AEG	Δ	Температура воздуха
155° C	64° C	91° C	95° C	65° C	30° C	20° C
150° C	65° C	85° C				

предположение, что щетки завода „Электроуголь“ графитовые, а не электрографитовые (гораздо мягче), как у AEG. В ответ на запрос завод „Электроуголь“ ответил, что эти щетки сняты с производства и в скором времени пришлет новую партию.

Подшипники являются ответственнейшими частями преобразователей, и поэтому следует остановиться на их работе. Особое значение имеет давление масла в подшипнике при пуске, которое создается ручным насосом. Масло засасывается из масляного бака в колонке подшипника и накачивается насосом под поддерживающие части, благодаря чему последние приподнимаются и облегчают трогание с места машины. В сентябре 1933 г. произошло расплавление двух крайних подшипников мотор-генератора № 2, в результате чего последний вышел из строя; авария возникла вследствие халатности дежурного машиниста, не сумевшего создать нужного давления в подшипниках при пуске агрегата. Максимальное превышение температур подшипников по фирменным данным равно 45° C при температуре окружающей среды в 30° C. Однако это условие в летние месяцы часто не выдерживается; превышения достигают 52–55° C, и приходится работать при сработавших сигнальных реле температурного щита⁴⁾.

³⁾ Принимая во внимание длину коллектора (860 мм), можно считать это влияние вполне вероятным. Оговариваюсь, что опытной проверки этого заявления не было.

⁴⁾ Каждый агрегат имеет температурный щит, на котором установлены термометры и сигнальные реле действующие на сирену, когда



Хуже всего положение было с подшипниками агрегата № 3, где превышения равнялись 55°C . Причиной перегрева считали колебания фундаментов, однако испытания, проведенные в мае 1933 г., показали что:

1) фундаменты состоят из пространственной железобетонной рамной конструкции, закрепленной в железобетонной плите, которая покоятся на скале (плотные известняки) с введением между плитой и скалой подсыпки из крупнозернистого песка толщиной 0,5 м;

2) число свободных (собственных) колебаний фундаментов лежит значительно выше числа оборотов агрегата и тем самым исключается возможность появления резонанса⁵⁾;

3) амплитуды вынужденных колебаний фундаментов при их измерении вибрографом Гейгера не могли быть зафиксированы, и при 12-кратном увеличении вибромагниты получались в виде прямых линий. Это показывает, что величина амплитуд меньше 0,01 мм и фундамент можно считать практически неподвижным. Очевидно, причины ненормального нагрева подшипников следует искать в конструктивных дефектах и низком качестве масла.

Испытания на нагревание при номинальной нагрузке генераторов показали, что превышение температур различных частей железа и обмоток машины не доходит до технически допустимого предела. Летом температура выходящего из машины воздуха бывает иногда равной 57°C вместо положенных 55°C , однако при правильной эксплуатации вентиляционных устройств этого превышения можно избежнуть. В зимнее время температура входящего воздуха бывает ниже нуля,

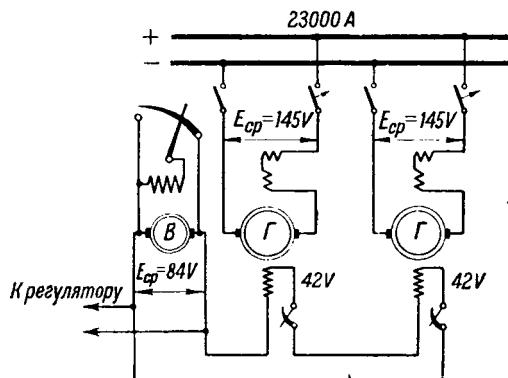


Рис. 5. Искусственная схема возбуждения генераторов (обмотки возбуждения соединены последовательно)

что может иметь вредные последствия для обмоток синхронного двигателя. В целях устранения этого явления предусмотрено дополнительное устройство шиберов у приточных камер вентиляционных агрегатов, которые дают возможность теплому воздуху из обходного канала смешиваться с наружным. Регулируя открытие шиберов, достигается поддержание постоянной температуры ($5 \div 10^{\circ}\text{C}$) входящего воздуха. Измерения люфтметром, произведенные у жалюзей в месте выхода отработанного теплого воздуха, показали, что количество охлаждающего воздуха при температуре 11°C равно $980 \text{ m}^3/\text{min}$ для двигателя и $1410 \text{ m}^3/\text{min}$ для обоих генераторов вместо соответственно 1000 и $1600 \text{ m}^3/\text{min}$ согласно условиям заказа.

3. Регулирование напряжения и перегрузки

Быстро действующий регулятор Тирриля мог быть включен только в октябре 1932 г. и то при искусственной схеме возбуждения генераторов. Это объясняется тем, что минимальное напряжение возбуждения

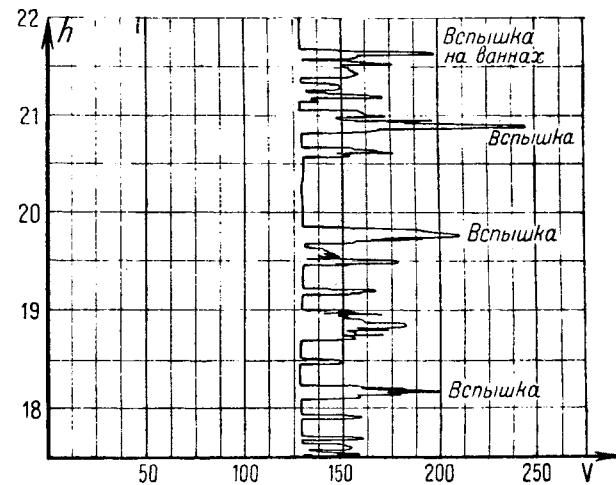


Рис. 6. График напряжения генератора при ручном регулировании

при котором регулятор может работать, равно 75 V, и поэтому в случае нормальной схемы, когда индукторы обоих генераторов включены параллельно в цепь возбуждения, необходимо, чтобы напряжение на зажимах возбудительной машины поддерживалось не ниже 80 V. Однако такое напряжение может быть только при 36 включенных ваннах, когда среднее напряжение генераторов равно 185 V. Так как включение этого количества ванн ожидалось не скоро, а ручное регулирование имело весьма понятные дефекты⁶⁾, то решено было уже при работе 28 ванн, т. е. при $E_{\text{ген}} = 145 \text{ V}$ и $E_{\text{возб}} = 45 \text{ V}$ включить регулятор Тирриля как ограничитель тока и напряжения с применением измененной схемы возбуждения. По этой схеме (рис. 5) возбуждение генераторов включено последовательным так, чтобы при напряжении на зажимах возбудителя в $80 \div 90 \text{ V}$ на каждый генератор приходилось по $40 \div 45 \text{ V}$. Нормальную схему оказалось возможным восстановить лишь в феврале 1933 года, когда число включенных ванн стало равным 36, среднее напряжение генераторов 183,6 V, минимальное напряжение 175 V и напряжение возбуждения 90 V. Рис. 6 и 7 представляют графики напряжения генераторов при ручном и автоматическом регулировании, откуда ясно преимущество последнего способа.

Хотя по условиям заказа предусмотрена двухчасовая десятипроцентная перегрузка двигателя, все же наличие регулятора мощности оказалось весьма целесообразным ввиду его успакивающего действия на

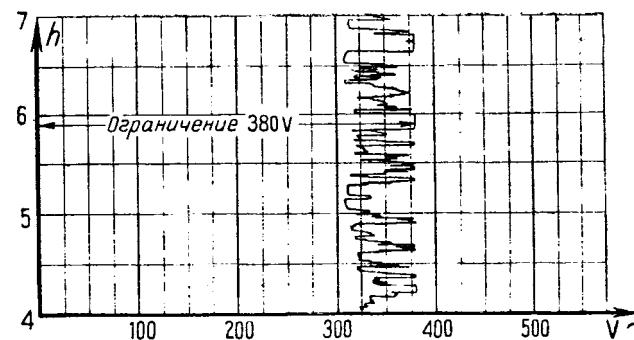


Рис. 7. График напряжения генератора при автоматическом регулировании

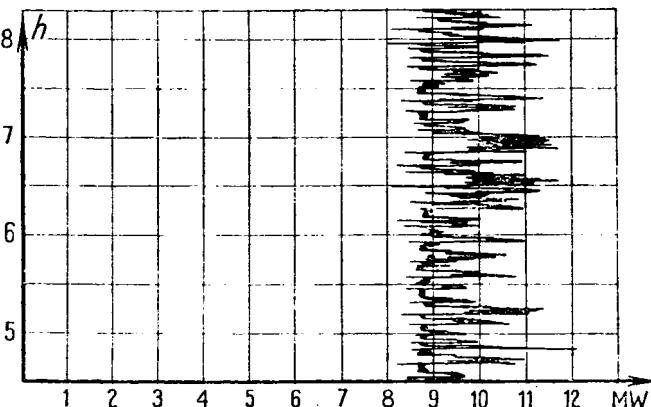


Рис. 8. График мощности двигателя при невключенном регуляторе мощности

пиковый характер работы (рис. 8 и 9). По некоторым техническим и формальным причинам регулятор мощности пущен в работу только в январе 1934 г. В настоящее время (февраль 1934 г.) установки на ограничителях следующие: напряжение 474 В, ток 11 800 А (на одном генераторе) и мощность 10,8 MW. Данные о суточной работе преобразователя за 16 февраля 1934 г. таковы:

среднее напряжение постоянного тока	400,7 V
средняя сила тока, потребляемого ваннами	23 841 A
средняя потребляемая из сети мощность	10 166,6 kW
передано в электролиз электроэнергии	244 000 kWh

Приемочные испытания 1932 г. происходили в то время, когда число работающих ванн было недостаточным для производственных испытаний в условиях работы на электролиз при номинальной нагрузке. В течение года эксплоатации выяснилось, что с точки зрения работы ванн желательно поддерживать ток, проходящий через электролизеры, возможно более постоянным, или в крайнем случае свести до возможного минимума случаи снижения тока ограничителем напряжения. Так как толчки нагрузки, обусловленные повышением напряжения во время анодного эффекта (вспышек) на ваннах, делятся сравнительно недолго и, кроме того, агрегаты имеют в тепловом отношении некоторый запас, то появилась мысль повысить верхний предел напряжения генераторов и тем самым получить более редкие снижения величины тока. Требуемый электролизом режим работы сведен в табл. 4.

Из этой таблицы видно, что при толчках нагрузка превосходит не только номинальную мощность генераторов (9,1 MW), но и гарантированную перегрузку, т. е. 10 MW. Поэтому в декабре 1933 г. производились вторичные испытания, имеющие целью установить, допустимы ли для агрегатов вышеуказанные ре-

Таблица 4
Желательный режим работы для электролизного цеха

№ режима	Время года	Число ванн	Ток A	Минимальное напряжение V	Максимальное напряжение V	Максимальная мощность обоих генераторов MW
1 {	Зима . . .	72	23 000	360	500	11,5
	Лето . . .	72	23 500	360	500	11,25
2 {	Зима . . .	72	24 000	335	480	11,5
	Лето . . .	72	24 000	335	480	11,5

жими, когда получающиеся перегрузки превышают предусмотренные договором, но делятся меньшее время.

Испытания велись непрерывно в течение 27 час. при напряжении в 505 V и токе 23 000 A. Результаты оказались следующими:

1. Мощность, потребляемая синхронным двигателем, колебалась в пределах от 7 до 13,2 MW. Средняя мощность за 27 час. равна 9,32 MW.

2. Максимальный ток двигателя 806 A, т. е. в 1,2 раза больше номинального.

3. Напряжение на зажимах генераторов изменялось от 356 до 505 V.

4. Превышения температур обмотки статора двигателя оказались равными 56°C при допустимой предельной температуре 70°C.

5. Превышения температуры якорей генераторов были равны 52,2°C вместо 60°C.

Таким образом подтвердилось, что агрегаты могут работать с перегрузками, причем последние не создавали превышений температур, выходящих за нормы, и не представляли опасности ни в отношении устойчивости синхронного двигателя, ни в отношении коммутации генераторов.

4. Защита

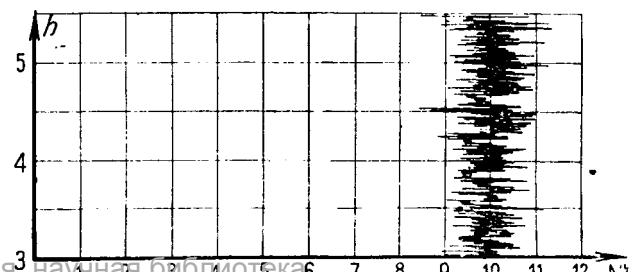
Испытания защиты со стороны переменного тока производились путем превращения синхронного двигателя в генератор и разворачивания его генераторами постоянного тока.

Во время испытаний дифференциальной защиты синхронного двигателя № 3 при трехфазном коротком замыкании вне зоны и номинальном токе $I=670$ A были замерены следующие токи небаланса дифференциального реле

$$\begin{aligned} \text{фаза } R & < 5 \text{ mA} \\ \text{фаза } S & < 5 \text{ mA} \\ \text{фаза } T & 44 \text{ mA (!)} \end{aligned}$$

При трехфазном же коротком в зоне защиты амперметр, включенный в фазу T , показал отсутствие тока в ней. Проверка показала, что трансформатор тока у выводов двигателя фазы T смешен на 180° путем переключения концов его вторичной обмотки. Благодаря наличию двух заземлений (рис. 10) большая фаза обоих трансформаторов оказалась зашунтируированной, и в реле ответвлялся весьма ничтожный ток. Очевидно, что двойное заземление в цепях дифференциальной защиты не только бесполезно, но и, как показывает данный случай, затрудняет выявление монтажных ошибок. Из этих соображений сняты вторичные заземления у всех двигателей.

Чаще всего двигатель автоматически отключался под действием реле минимального напряжения, которое срабатывает при 7 kV с выдержкой в 1,3 сек. Дифференциальное реле, элемент времени которого зашунтирован, сработало только один раз (в январе



1934 г.) из-за оплошности монтера, задевшего рукой подводящие шины ⁷⁾). Отключения происходили также от максимальных и центробежного реле. Следует отметить, что отсутствие земляной защиты на двигателе

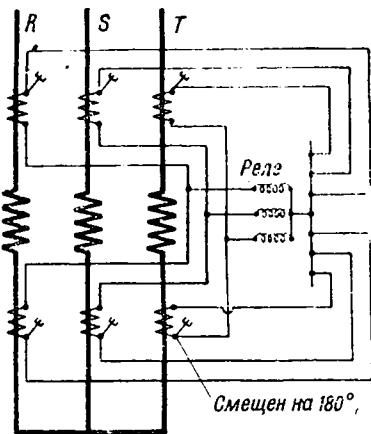


Рис. 10. Неверная схема включения дифференциальной защиты двигателя

лях мощностью 10 MW является большим недостатком. Вероятно, в ближайшем будущем эта защита будет установлена.

Испытание защиты генераторов производилось методом возвратной работы, и результаты получились удовлетворительные. Ввиду наличия сильных магнитных полей и влияния их на магнитные реле обратного тока, расположенных в коридоре распределительного устройства постоянного тока, оказалось целесообразным присоединить катушки напряжения этих реле к независимому источнику тока (батарее), так как напряжение генераторов при работе с различным числом ванн разное, и в случае присоединения этих катушек к генераторному напряжению градуировка реле была невозможна.

Из-за этих же полей счетчики амперчасов, установленные в том же коридоре, давали неверные показания. Перестановка счетчиков в машинный зал, осуществленная в феврале 1934 г., благоприятно отразилась на их точности, и теперь учет энергии постоянного тока ведется по упомянутым счетчикам.

5. Заключение

5. Опыт показал, что выбор аппаратуры как пусковой, так и постоянного тока вполне оправдал себя. Особенно зарекомендовали себя трешальтеры посто-

⁷⁾ Благодаря моментальному отключению пострадавший потерял лишь руку; для двигателя особых последствий не было.

янного тока, так как даже в летнее время температура нагрева их контактов не превышала $60 \pm 65^{\circ}\text{C}$ (при пределе 80°C).

Установка преобразователей мотор-генераторного типа уже не является спорным вопросом — предпочтение отдают ртутным выпрямителям благодаря их большей экономичности. Но, принимая во внимание отсутствие опыта СССР в электролизе глинозема в крупных масштабах, мотор-генераторы, имеющие широкий диапазон регулирования напряжения ⁸⁾ на постоянном токе, большие мощности в одном агрегате и ряд других преимуществ, оказались вполне целесообразными для установки на преобразовательной подстанции Волховского алюминиевого комбината. В будущем для строительства новых преобразовательных станций придется, вероятно, принятьком промисное решение ⁹⁾, т. е. наряду с ртутными выпрямителями устанавливать также мотор-генераторы, являющиеся агрегатами, удобными для пуска новых ванн.

Главным недостатком всех вращающихся преобразователей являются большие потери на преобразование. В условиях комбината, когда потери мотор-генераторов достигают 10%, этот недостаток приобретает актуальное экономическое значение, и поэтому усилия эксплоатационников преобразовательной подстанции в настоящее время направлены к изысканию мероприятий по снижению потерь в агрегатах. Уменьшить потери можно следующими путями:

- 1) увеличением к. п. д. агрегата при работе двигателя с перегрузкой, т. е. при мощности около 10,3 MW;
- 2) уменьшением потерь на возбуждение при работе с недовозбужденным двигателем и $\cos\phi = 1$;
- 3) поддержанием наименее возможного рабочего сопротивления в магнитных регуляторах генераторов, в которых теряется до 1,2 kW на агрегат.

В связи с применением все более высоких напряжений на одну серию ванн, доходящих на некоторых заграничных заводах до 700 V, возникает проблема заземления шинопровода постоянного тока. Даже в условиях Волховского завода, где среднее напряжение на серию равно 400 V и может быть доведено до 500 V, этот вопрос с точки зрения безопасности имеет немаловажное значение. Но ввиду большой величины тока, протекающего по шинам, задачу заземления высоковольтных и высокоамперных устройств постоянного тока нельзя решить обычными способами. Решением этого вопроса должны заняться научно-исследовательские организации Союза.

25 февраля 1934 г.

⁸⁾ В этом отношении наличие независимого возбуждения генераторов является решающим фактором.

⁹⁾ На первые 5–10 лет, пока иного вида конструкции преобразователей не будут усовершенствованы.

Однофазные трансформаторы с компенсирующими обмотками¹⁾

Инж. С. М. Гохберг и инж. П. Н. Большаков
Ленинград

Введение

В однофазных трансформаторах нормальной конструкции, где первичная и вторичная обмотки расположены на обоих сердечниках, требуется изолировать обмотку высшего напряжения от сердечника и от обмотки низшего напряжения на рабочее напряжение трансформатора. С повышением напряжения выполнение изоляции обмотки высшего напряжения становится весьма затруднительным, особенно в трансформаторах небольшой мощности, поэтому был предложен ряд схем, в которых напряжение, действующее на изоляцию обмоток друг относительно друга и относительно корпуса, меньше рабочего напряжения. Особенностью этих схем является наличие нескольких отдельных трансформаторов, у которых обмотки высшего напряжения соединены между собой последовательно и изолированы относительно сердечника на частичное напряжение, самый же сердечник должен быть при этом изолирован от земли. Подобные соединения получили название каскадных трансформаторов.

Дальнейшее уменьшение напряжения, действующего на изоляцию, может быть получено, если применить раздельное расположение обмоток, т. е. обе обмотки расположить на разных сердечниках или же обмотку низшего напряжения расположить на одном сердечнике, а обмотку высшего напряжения на двух сердечниках. В обоих случаях сумма ампервитков, находящихся на одном сердечнике, не равна нулю, поэтому возникающие при нагрузке потоки рассеяния получаются чрезмерными, и такие трансформаторы обладали бы недопустимым с практической точки зрения падением напряжения, значительными добавочными потерями и местными нагревами.

Для уменьшения потоков рассеяния на каждом из сердечников устраивают по одной дополнительной обмотке, которые мы будем называть компенсирующими обмотками. Их делают с одинаковым числом витков и включают встречно. При холостом ходе трансформатора, когда потоки рассеяния ничтожны, компенсирующие обмотки пронизываются почти одинаковыми потоками, поэтому в их цепи ток ничтожно мал. При нагрузке трансформатора вследствие наличия потоков рассеяния потоки, пронизывающие первичную и вторичную обмотки, не равны между собой, следовательно, будут неодинаковыми и потоки, проходящие по обоим сердечникам, и э. д. с., индуцируемые в компенсирующих обмотках. Это нарушение равновесия э. д. с. компенсирующих обмоток вызывает ток в этих обмотках, который стремится уменьшить потоки рассеяния.

В некоторых конструкциях каскадных трансформаторов первичная и вторичная обмотки лежат не на разных сердечниках, а на одном и том же, но сдвинуты друг относительно друга по оси сердечника. В электромагнитном отношении такое расположение эквивалентно расположению обмоток на разных сердечниках, поэтому подобные конструкции также нуждаются в компенсирующих обмотках, которые по отношению к первичной и вторичной обмоткам должны быть расположены так же, как и в первоначально упомянутой конструкции.

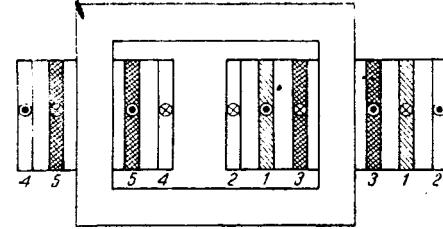
Если каскадный трансформатор осуществляется из

форматоров, причем первичные и вторичные цепи каждого из этих автотрансформаторов расположены на разных сердечниках или сдвинуты на одном и том же сердечнике, то такие автотрансформаторы также нуждаются в компенсирующих обмотках.

Каскадное соединение трансформаторов как обычной конструкции, так и с раздельным расположением обмоток и с соответствующими компенсирующими обмотками впервые применено Dessaегом (л. 1, 2, 5) для питания рентгеновских установок и испытательных трансформаторов.

В дальнейшем идея каскадного соединения с разобщением обмоток была использована при конструировании измерительных трансформаторов (л. 6, 8, 9, 11). В последнее время акад. А. А. Чернышевым был выдвинут проект применения каскадного трансформатора для электропередач сверхвысокого напряжения (л. 12, 13).

Рис. 1



Надлежит отметить, что в недавнее время (1926 г.) фирмой Brown-Boveri был построен для швейцарских электрических железных дорог трехобмоточный трансформатор на 15/66/132 кВ, в котором обмотки на 66 и 132 кВ были расположены на разных сердечниках, а обмотка на 15 кВ была выполнена из четырех параллельных ветвей, расположенных по две на каждом из сердечников (л. 10). Так как по условиям работы установки бывают периоды, когда при посредстве этого трансформатора энергия передается из сети на 132 кВ в сеть на 66 кВ, то в эти периоды 15-киловольтная обмотка трансформатора выполняет роль компенсирующей обмотки вышеупомянутых каскадных трансформаторных схем.

Теоретическое рассмотрение роли компенсирующей обмотки впервые было сделано Witz'ом (л. 8, 9). Рассмотрение делалось применительно к каскадным измерительным трансформаторам. Анализ роли компенсирующей обмотки в испытательных трансформаторах и трансформаторах энергетических, т. е. предназначенных для передачи энергии по схеме акад. А. А. Чернышева, может быть сделан значительно проще, чем у Witz'a, так как здесь при учете падения напряжения можно так же, как и в обычном двухобмоточном трансформаторе, пренебречь намагничивающим током.

Такому анализу роли компенсирующей обмотки и посвящена настоящая статья. В ней первоначально рассматривается трансформатор (рис. 1) с компенсирующими обмотками 3 и 5, в котором первичная обмотка 1 расположена на одном сердечнике, а вторичная состоит из двух последовательно соединенных одинаковых обмоток 2 и 4, расположенных на разных сердечниках. Такой тип трансформатора с компенсирующими обмотками в дальнейшем для краткости будем называть трансформатором с частичным разоб-

¹⁾ Поскольку в статье имеется ряд спорных положений относительно рассеяния между обмотками, расположенными на разных сер-

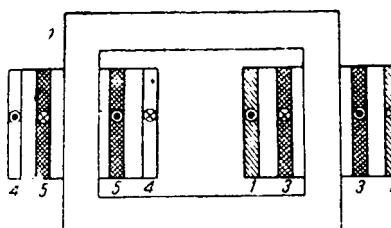


Рис. 2

Затем рассматривается трансформатор (рис. 2) с компенсирующими обмотками 3 и 5, у которого первичная обмотка 1 расположена на одном сердечнике, а вторичная 4—полностью на другом сердечнике. Этот тип трансформатора с компенсирующими обмотками будем называть трансформатором с полным разобщением рабочих обмоток. На рис. 3 и 4 те же трансформаторы даны в условном изображении и с указанием схем электрических соединений отдельных обмоток.

2. Обозначения. В соответствии с рис. 1 и 2 обозначим через U_1 —напряжение на зажимах первичной обмотки 1; U_2 —напряжение на зажимах вторичной цепи (обмотки 2 и 4); E —э. д. с., индуцируемая в каждой из обмоток общим потоком, проходящим по железу; I_1, I_2, I_3, I_4 и I_5 —токи в обмотках 1, 2, 3, 4 и 5; r_1, r_2, r_3, r_4 и r_5 —активные сопротивления этих обмоток.

В отличие от теории обычного двухобмоточного трансформатора здесь мы не можем пользоваться понятиями о рассеянии одной обмотки, так как часть потоков первичной обмотки, являющихся потоками рассеяния для какой-либо из вторичных обмоток многообмоточного трансформатора (например, поток Φ_4 для обмотки 4 на рис. 5), может сцепляться с другими вторичными обмотками. Поэтому в дальнейшем из всех потоков, проходящих по воздуху и сцепляющихся с какой-либо обмоткой, например, обмоткой 1, мы будем отличать потоки, общие для обмоток 1—2, 1—3 и т. д. Реактивное сопротивление, обусловленное всеми потоками, которые сцепляются с отдельными обмотками, обозначим через x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 , т. е. с индексом, соответствующим номеру обмотки, а реактивное сопротивление, обусловленное потоками, общими из двух данных обмоток, обозначим соответственно через $x_{12}, x_{13}, \dots, x_{15}$. Здесь индексы указывают номера обмоток, с которыми сцепляются потоки.

Для какой-либо пары обмоток, например, обмоток 1 и 2, $x_{12} = x_1 - x_{12}$ и $x_{13} = x_2 - x_{12}$ представляют реактивности от потоков рассеяния каждой из обмоток 1 и 2.

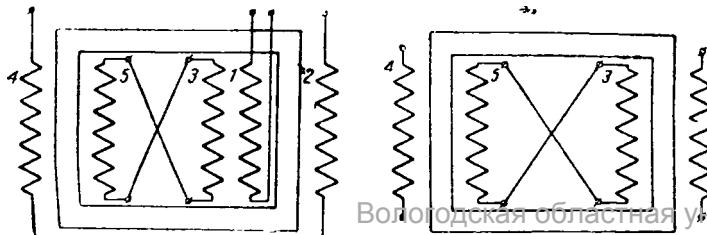
Как известно из теории двухобмоточного трансформатора, сопротивление при коротком замыкании

$$x_{k12} = x_{12} + x_{23};$$

следовательно, при примененном здесь разделении потоков

$$x_{k12} = (x_1 - x_{12}) + (x_2 - x_{12}) = x_1 + x_2 - 2x_{12}. \quad (1)$$

Аналогичными формулами связаны реактивные сопротивления $x_{k13}, x_{k14}, x_{k15}, x_{k23}, x_{k24}, x_{k25}, x_{k34}, x_{k35}$,



x_{k45} , получаемые при коротком замыкании обмоток 1 и 3, 1 и 4 и т. д.

I. Трансформатор с частичным разобщением рабочих обмоток

3. Вывод основных уравнений. Ради упрощения выкладок предположим, что каждая из вторичных 2 и 4, компенсирующих 3 и 5, и первичная 1 (рис. 1) обмотки имеют одно и то же число витков w .

Пренебрегая намагничивающим током, мы можем написать условие равновесия м. д. с. трансформатора в следующем виде:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0. \quad (2)$$

Как видно из рис. 3, при заданном соединении вторичных обмоток имеем

$$I_2 = I_4, \quad (3)$$

а в компенсирующих обмотках вследствие встречного соединения их

$$I_3 = -I_5. \quad (4)$$

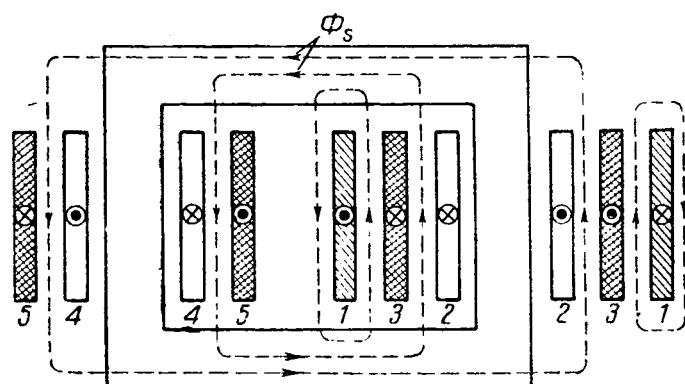


Рис. 5

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем соотношение между первичным и вторичным токами

$$I_1 = -2I_2. \quad (5)$$

Далее напишем в символическом виде уравнения э. д. с. для всех трех электрических цепей нашего трансформатора. Для первичной цепи, состоящей из обмотки 1, имеем:

$$-\dot{U}_1 = \dot{E} - I_1 r_1 - j I_1 x_1 - j I_2 x_{12} - j I_4 x_{14} - j I_5 x_{15}. \quad (6)$$

Напряжение на вторичной цепи, состоящей из обмоток 2 и 4, равняется сумме всех э. д. с. и падений напряжения, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 = & 2\dot{E} - I_2 r_2 - I_4 r_4 - j I_2 x_2 - j I_4 x_{24} - j I_4 x_4 - \\ & - j I_2 x_{24} - j I_{11} x_{12} - j I_1 x_{14} - j I_3 x_{32} - j I_5 x_{34} - \\ & - j I_5 x_{25} - j I_5 x_{45}. \end{aligned} \quad (7)$$

Пользуясь вторым законом Кирхгофа и учитывая, что обмотки 3 и 5 включены встречно, получим для компенсирующей цепи следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \dot{E} - I_3 r_3 - j I_3 x_3 - j I_5 x_{35} - j I_1 x_{13} - j I_2 x_{32} - \\ - j I_4 x_{34} - \dot{E} + I_5 r_5 + j I_5 x_5 + j I_3 x_{35} + \\ + j I_1 x_{15} + j I_2 x_{25} + j I_4 x_{45} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив выражения (3) и (4), введя реактивности короткого замыкания (1) и решая уравнение (8), находим

$$\frac{1}{2} j(x_{k23} + x_{k43} + 2x_{k15} - x_{k26} - x_{k45} - 2x_{k18}). \quad (9)$$

Из уравнения (7), используя выражения (6), (9) и (1), получаем

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_1' - \dot{I}_2 Z. \quad (10)$$

Здесь $\dot{U}_1' = 2\dot{U}_1$ — первичное напряжение, приведенное к вторичной цепи, а $Z = R + jX$ представляет эквивалентное сопротивление исследуемого трансформатора, причем

$$R = 4r_1 + r_2 + r_4 + \frac{1}{4} \frac{(r_3 + r_5)(x_{k28} + x_{k43} + 2x_{k15} - x_{k25} - x_{k45} - 2x_{k18})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2}; \quad (11a)$$

$$X = 2x_{k12} + 2x_{k14} - x_{k24} - \frac{1}{4} \frac{x_{k35}(x_{k28} + x_{k43} + 2x_{k15} - x_{k25} - x_{k45} - 2x_{k18})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2}. \quad (11b)$$

Уравнение (10) совпадает по виду с уравнением для вторичного напряжения обычного двухобмоточного трансформатора. Поэтому в данном случае при рассмотрении вопросов о падении напряжения, о токах короткого замыкания, о параллельной работе и т. п. возможно пользоваться методами, применяемыми для обычных двухобмоточных трансформаторов, но только необходимо вместо сопротивления короткого замыкания подставить значение эквивалентного сопротивления Z .

Интересно отметить, что в случае, когда цепь компенсирующей обмотки разомкнута ($r_3 + r_5 = \infty$), реактивная составляющая эквивалентного сопротивления Z становится равной

$$x_1 = 2x_{k12} + 2x_{k14} - x_{k24} \quad (12)$$

и представляет собой реактивность короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, у которого первичная обмотка расположена на одном сердечнике, а вторичная на двух сердечниках. Так как в уравнении (11b) числитель последнего члена всегда положителен, то $X_1 > X$,

т. е. вследствие наличия компенсирующей обмотки реактивность рассматриваемого трансформатора уменьшается.

4. Определение эквивалентного сопротивления. Для экспериментального определения эквивалентного сопротивления достаточно проделать опыт короткого замыкания трансформатора с компенсирующей обмоткой. Из уравнения (10) следует, что при коротком замыкании, когда $U_2 = 0$,

$$\dot{U}_1' = -\dot{I}_2 Z, \text{ т. е. } Z = \frac{\dot{U}_1'}{\dot{I}_2}.$$

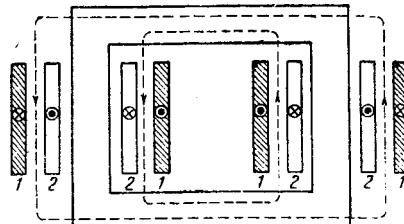
Взяв значения, приведенные к первичной цепи, можем написать

$$Z' = \frac{U_1}{I_1}.$$

Активная и реактивная составляющие этого сопротивления определяются обычным способом по опытным данным короткого замыкания.

При расчетном определении эквивалентного сопротивления Z необходимо, вычислив реактивности короткого замыкания x_{k12} , x_{k18} и т. д., воспользоваться уравнением (11). Реактивности короткого замыкания

Рис. 7



для обмоток, находящихся на одном сердечнике (величины x_{k12} , x_{k18} , x_{k23} , x_{k45}), можно вычислить по обычным формулам. Для вычисления реактивностей короткого замыкания обмоток, находящихся на разных сердечниках, необходимо предварительно подсчитать проводимость для потоков рассеяния, проходящих между этими обмотками.

Кроме того, эквивалентное сопротивление Z можно вычислить приближенно, не вводя в расчет сопротивления короткого замыкания для обмоток, находящихся на разных сердечниках, как то следует из дальнейшего.

Как известно из теории двухобмоточного трансформатора, приведенные проводимости для потоков обмоток 1 и 2, 2 и 4 и т. д. пропорциональны площадям трапеций $efgk$, $abcd$ и т. д. (рис. 6). Если предположить, что длины силовых линий при всех этих коротких замыканиях одни и те же, то высоты трапеций также будут равны между собой.

Так как реактивность x_{k14} пропорциональна площади трапеции mnp , которая равна сумме площадей трапеций $abcd$ и $efgk$, реактивность x_{k24} пропорциональна площади трапеции $abcd$, а реактивность x_{k12} пропорциональна площади трапеции $efgk$, то, следовательно, можно написать, что

$$x_{k14} = x_{k24} + x_{k12}.$$

Аналогично для других обмоток (рис. 3) получим:

$$\left. \begin{array}{l} x_{k35} = x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18}; \\ x_{k15} = x_{k24} + x_{k45} + x_{k12}; \\ x_{k43} = x_{k24} + x_{k12} + x_{k18}; \\ x_{k25} = x_{k24} + x_{k45}; \\ x_{k23} = x_{k12} + x_{k18}. \end{array} \right\} \quad (13)$$

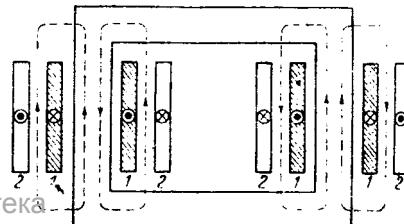
Подставив эти значения реактивностей короткого замыкания в уравнения (11), имеем:

$$\left. \begin{array}{l} R = 4r_1 + r_2 + r_4 + \frac{(r_3 + r_5)(2x_{k12} + x_{k24})^2}{(r_3 + r_5)^2 + (x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})^2}; \\ X = 4x_{k12} + x_{k24} - \frac{(x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})(2x_{k12} + x_{k24})^2}{(r_3 + r_5)^2 + (x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})^2}. \end{array} \right\} \quad (14)$$

Так как обычно $r_3 + r_5$ мало по сравнению с $(x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})$, то уравнение (14) можно переписать в следующем виде:

$$\left. \begin{array}{l} R = 4r_1 + r_2 + r_4 + \frac{(r_3 + r_5)(2x_{k12} + x_{k24})^2}{(x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})^2}; \\ X = 4x_{k12} + x_{k24} - \frac{(x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})(x_{k12} + x_{k24})^2}{(x_{k24} + x_{k45} + x_{k12} + x_{k18})^2}. \end{array} \right\} \quad (15)$$

Рис. 8



Принимая во внимание, что реактивности x_{k12} , x_{k18} и x_{k45} одного и того же порядка и значительно меньше реактивности x_{k24} , мы после ряда преобразований можем приближенно получить:

$$R \approx 4r_1 + r_2 + r_4 + r_8 + r_5; \quad (16)$$

$$X \approx x_{k12} + x_{k18} + x_{k45}. \quad (17)$$

Если принять, что в мощных высоковольтных трансформаторах реактивность короткого замыкания бывает порядка 8–12%, то для пары обмоток, находящихся на одном сердечнике, эта реактивность будет порядка 4–6%, следовательно, для трансформатора с компенсирующей обмоткой реактивность короткого замыкания будет не меньше, чем

$$x_{k12}\% + x_{k18}\% + x_{k45}\% \approx 3 \cdot (4 \div 6) = 12 \div 18\%.$$

По сравнению с обычным трансформатором реактивность короткого замыкания будет, таким образом, как минимум, в 1,5 раза больше.

активное сопротивление обмоток равно нулю, толщина обмоток бесконечно мала и намагничивающий ток равен нулю. Все рассмотрение будет сделано для случая короткого замыкания вторичной обмотки, так как при этом все потоки являются потоками рассеяния.

а) Двухобмоточный трансформатор. При коротком замыкании вследствие сделанного предположения, что $r_2=0$ вторичная обмотка подобна сверхпроводящему контуру, характерным свойством которого является способность не пропускать через себя переменных потоков²⁾, так как при $r_2=0$ должна быть равна нулю индуцируемая в контуре э. д. с. Что касается первичной обмотки, которая приключена к сети, то в ней должна индуцироваться э. д. с., уравновешивающая приложенное напряжение, поэтому первичную обмотку будет пронизывать поток, индуцирующий требуемую э. д. с.

В случае расположения первичной обмотки снаружи (рис. 7) эти линии не могут проникнуть в сердечник, так

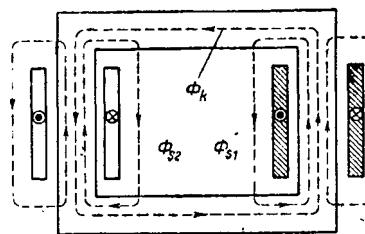


Рис. 9

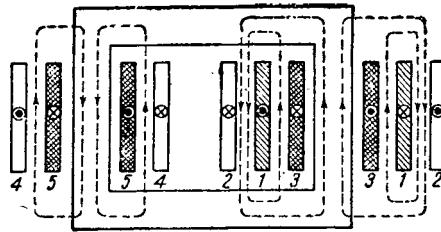


Рис. 10

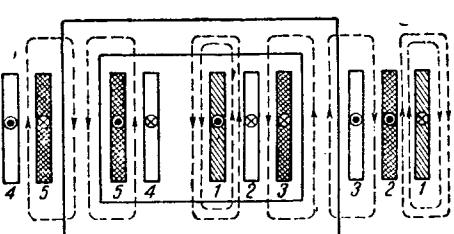


Рис. 11

Для эквивалентного активного сопротивления исследуемого трансформатора при вышеуказанных допущениях

$$R \approx 4r_1 + r_2 + r_4 + r_8 + r_5 = R'_1 + R_2 + R'_3. \quad (18)$$

Здесь $R'_1 = 4r_1$ — активное сопротивление первичной обмотки, приведенное к числу витков вторичной обмотки, R_2 — активное сопротивление всей вторичной обмотки (обмотки 2 и 4), R'_3 — активное сопротивление всей компенсирующей обмотки (обмотки 3 и 5), приведенное к числу витков вторичной обмотки.

Полагая приближенно, что приведенные активные сопротивления всех обмоток одинаковы, получаем активное сопротивление короткого замыкания равным $3R_2$, т. е. в 1,5 раза больше, чем в двухобмоточном трансформаторе, у которого при идентичных обмотках это сопротивление равно $2R_2$.

5. О потоках рассеяния. В обычном двухобмоточном трансформаторе потоки рассеяния проходят по железу трансформатора и в пространстве между обмотками. В случае когда обе обмотки расположены на различных сердечниках, потоки рассеяния могут проходить в окне трансформатора, а замыкаться через бак и другие части, окружающие трансформатор. Последнее распределение потоков рассеяния является не желательным, так как при этом возникают дополнительные потери и дополнительные местные нагревы. Естественно, возникает вопрос, не будет ли потоков рассеяния, которые проходят в пространстве, окружающем трансформатор и в рассматриваемом специальном трансформаторе (рис. 1), когда часть вторичной обмотки находится на сердечнике, на котором нет первичной обмотки.

Так как применяемый ниже метод рассмотрения указанного вопроса не получил достаточного освещения в русской технической литературе, то для большей ясности мы предварительно рассмотрим этим методом пути потоков рассеяния в двухобмоточном трансформаторе. Для того чтобы не затенять явления побочных обмоток отражением в баке, предполагают, что

как он окружен короткозамкнутой обмоткой, поэтому они замкнуты через ярмо трансформатора. Если же снаружи расположена вторичная обмотка (рис. 8), то силовые линии должны пройти через сердечник, чтобы сцепиться с первичной обмоткой. В последнем случае весь путь потока находится внутри вторичной обмотки, следовательно, результирующий поток, сцепляющийся со вторичной обмоткой, равен нулю.

Приведенное выше рассмотрение расходится с тем, которое обычно приводится в теории двухобмоточных трансформаторов. В ней считается, что при коротком замыкании вторичную обмотку пронизывает поток, индуцирующий э. д. с., которая идет на преодоление реактивного падения напряжения во вторичной обмотке. Поскольку такое представление не противоречит математическим соотношениям между параметрами и облегчает расчеты, оно стало общепринятым, несмотря на фиктивность его с точки зрения физики явления. Физически представление об одновременном существовании потока рассеяния вторичной обмотки Φ_4 и потока Φ_k , компенсирующего э. д. с. от потоков рассеяния, является неверным, так как оба эти потока должны были бы проходить в различных направлениях по одному и тому же сечению. В этом легко убедиться, рассматривая направления потоков Φ_k и Φ_4 в двухобмоточном трансформаторе с разобщенными обмотками (рис. 9).

б) Трансформатор по схеме рис. 1. При коротком замыкании обмоток 2 и 4 поток, пронизывающий эти обмотки, должен быть равным нулю, а с попечерной обмоткой 1 должен сцепляться полный поток. Компенсирующие обмотки 3 и 5 должны пронизываться одинаковыми потоками, так как э. д. с. этих обмоток одинаковы. По отношению к обмотке 1 обмотка 3 является вторичной, поэтому поток, пронизывающий обмотку 3, должен совпадать по направлению с м. д. с.

обмотки 1. По отношению к обмотке 4 обмотка 5 является питающей, поэтому поток, пронизывающий обмотку 5, направлен по м. д. с. обмотки 5. Соответственно этим условиям на рис. 10 и 11 нанесены направления потоков для двух типичных случаев взаимного расположения обмоток. При нанесении потоков следует иметь в виду, что вследствие встречного соединения обмоток 3 и 5 токи по ним проходят в различных направлениях. Из этих рис. 10 и 11 видно, что в зависимости от расположения обмоток поток может в некоторых случаях (рис. 11) проходить в пространстве, окружающем трансформатор. Практически имеет значение случай, когда обмотки высшего напряжения 2 и 4 расположены снаружи (рис. 10), а при этом потоки рассеяния проходят в пространстве между катушками.

Аналогичные картины можно построить и при питании обмоток 2 и 4 и коротком замыкании обмотки 1. На рис. 12 изображено распределение потоков при

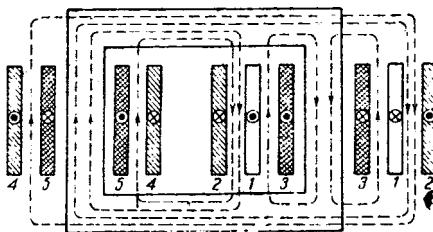


Рис. 12

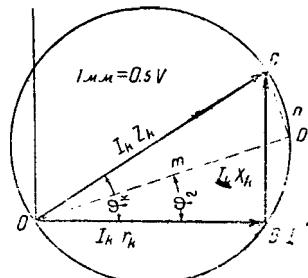


Рис. 13

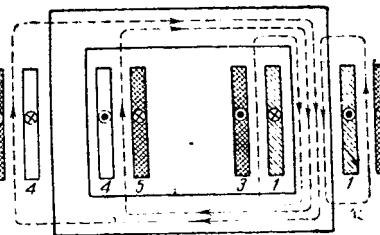


Рис. 14

внешнем расположении обмоток высшего напряжения; при этом, как видно из рис. 12, потоки рассеяния также проходят между катушками, не замыкаясь на бак.

6. Мощность компенсирующей обмотки. Для оценки величины тока I_3 преобразуем уравнение (9), введя в него вместо реактивностей x_{k13} , x_{k43} и т. д. реактивности короткого замыкания обмоток, находящихся на одном сердечнике, и реактивность x_{k24} (см. § 4). Производя соответствующие преобразования, получим

$$I_3 = I_2 \frac{j(2x_{k12} + x_{k24})}{(r_3 + r_5) + j(x_{k24} + x_{k12} + x_{k13} + x_{k45})}. \quad (19)$$

Приняв во внимание, что $r_3 + r_5$ мало по сравнению с $j(x_{k24} + x_{k12} + x_{k13} + x_{k45})$, а отношение $(x_{k24} + 2x_{k12}) : (x_{k24} + x_{k12} + x_{k13} + x_{k45}) \approx 1$, получим

$$I_3 \approx I_2. \quad (20)$$

Таблица 1

Сводка результатов опытов короткого замыкания при исследовании каскадного трансформатора по схеме рис. 1

№ обмоток	коротко-замкнутая обмотка	Измерено			Значения x_k , приведенные к обмотке № 1	Примечание
		Z_k	r_k	x_k		
первичная обмотка		Ω	Ω	Ω	Ω	
1	2	0,138	0,0895	0,105	0,105	
1	3	0,258	0,248	0,070	0,070	
1	4	3,820	0,863	3,720	3,720	
1	5	3,72	0,973	3,600	3,600	
2	4	0,863	0,245	0,830	3,760	
3	5	0,701	0,247	0,657	3,560	
1	2-4	1,010	0,322	0,959	0,959	Короткое замыкание без компенсирующей обмотки
1	2-4	0,186	0,155	0,103	0,103	Короткое замыкание с компенсирующей обмоткой

Такое соотношение между потоками I_3 и I_2 получилось потому, что выше мы исходили из равенства числа витков вторичной и компенсирующих обмоток. Ясно, что при различном числе витков этих обмоток получим равенство приведенных значений токов обмоток, следовательно, будут равны ампервитки и веса меди вторичной и компенсирующей обмоток.

7. Экспериментальная проверка. Экспериментальная проверка полученных теоретическим путем результатов производилась на однофазном двухобмоточном трансформаторе фирмы Siemens-Schuckert Werke мощностью в 5 kVA, 220/110 V, 25/50 A, 50 Hz, причем на каждый из двух сердечников трансформатора была наложена дополнительная обмотка, напряжение холостого хода которой получилось равным 95 V при первичном напряжении 220 V. При опытах первичной обмоткой (1) служила половина обмотки на 220 V, вторичными (2 и 4)—обмотка на 110 V и компенсирующими (3 и 5)—обмотка на 95 V.

$$Z = \left[4r_1 + r_2 + r_4 + \frac{(r_3 + r_5)(x_{k15} - x_{k13})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2} \right] + \\ + j \left[2x_{k12} + 2x_{k14} - x_{k24} - \frac{x_{k35}(x_{k15} - x_{k13})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2} \right]. \quad (11')$$

Что касается определения активной составляющей эквивалентного сопротивления, следует отметить, что в тех опытах короткого замыкания, где обмотки находились на разных сердечниках, рассеяние получалось весьма значительным, вследствие чего возникали большие добавочные потери, которые отсутствуют при нормальной работе трансформатора с компенсирующей обмоткой. Поэтому опыты отдельных коротких замыканий могут служить только для определения соответствующих реактивностей.

С достаточной точностью можно принять, что отношение активного сопротивления к омическому при работе с компенсирующей обмоткой будет таким же, как при коротком замыкании двух обмоток, находящихся на одном сердечнике. В нашем случае активные сопротивления при работе двухобмоточным трансформатором и при работе с компенсирующей обмоткой весьма незначительно отличались от омических сопротивлений. Вследствие этого при подсчете Z были взяты омические сопротивления, значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сводка результатов измерений омических сопротивлений обмоток трансформатора

№ обмоток	Измерено r Ω	Значения r , приве- денных к обмотке Ω	Примечание
1	0,0981 2	0,0981 2	При измерении обе половины обмотки на 220 В были включены последовательно
2+4	0,0161	0,0736	
3+5	0,0683	0,371	

Подставляя в формулу (11') значения активных и реактивных сопротивлений, полученных из опытов короткого замыкания отдельных пар обмоток, получаем полное эквивалентное сопротивление короткого замыкания трансформатора с частичным разобщением рабочих обмоток, приведенное к вторичной цепи:

$$Z = 0,631 + j0,427.$$

Приведенное к первичной цепи полное сопротивление короткого замыкания, очевидно, будет равно

$$Z' = \frac{Z}{\left(\frac{w_2 + w_4}{w_1}\right)^2} = 0,158 + j0,106 = 0,190 \Omega.$$

Опыт короткого замыкания вторичной цепи при наличии компенсирующих обмоток по схеме рис. 1 дал $Z' = 0,155 + j0,103 = 0,186 \Omega$. Расхождение расчетных данных с опытом, как видим, не превышает 3%.

Кроме этих опытов был произведен ряд опытов с нагрузкой трансформатора при работе с компенсирующей обмоткой. На основании этих опытов было определено падение напряжения как непосредственно из опыта, так и по диаграмме короткого замыкания (рис. 13). Данные опытов и соответствующих подсчетов приведены в табл. 3. Расхождение опытных данных с теоретическими получилось незначительным.

II. Трансформатор с полным разобщением рабочих обмоток

8. Вывод основных уравнений. Для получения основных зависимостей между токами и напряжениями здесь можно так же, как это было сделано в предыдущем случае, исходить из условий равновесия м. д. с. и э. д. с. Но тот же результат мы можем получить, полагая, что в трансформаторе с двумя вторичными обмотками (рис. 3) число витков обмотки 2 уменьшено до нуля. При таком рассмотрении r_2 и все реактивности, имеющие индекс 2, также становятся равными нулю и вместо основных уравнений (2), (5), (6), (7), (8) получим аналогичные уравнения, но не содержащие членов с индексом 2.

Уравнение м. д. с. получится теперь в следующем виде

$$i_1 + i_3 + i_4 + i_5 = 0. \quad (21)$$

Из схемы рассматриваемого трансформатора (рис. 4) следует, что и в данном случае уравнение (4) полностью сохраняется. Подставляя значения i_3 и i_5 в уравнение (21), получаем

$$i_1 = -i_4. \quad (22)$$

Уравнение э. д. с. для первичной обмотки (обмотка 1) примет такой вид:

Аналогично для вторичной обмотки (обмотка 4) получаем

$$\dot{U}_2 = \dot{E} - i_4 r_4 - j i_4 x_4 - i i_1 x_{14} - j i_5 x_{45} - j i_3 x_{43}. \quad (24)$$

Для компенсирующей обмотки (обмотки 3 и 5)

$$\dot{E} - i_3 r_3 - j i_3 x_3 - j i_1 x_{13} - j i_4 x_{43} - j i_5 x_{35} - \\ - \dot{E} + i_5 r_5 + j i_5 x_5 + j i_1 x_{15} + j i_4 x_{45} + j i_3 x_{35} = 0. \quad (25)$$

Подставляя в уравнение (25) значения i_3 и i_1 , находим ток в компенсирующей обмотке i_3 в зависимости от вторичного тока i_4 :

$$i_3 = i_4 \frac{\frac{1}{2} j (x_{k43} + x_{k15} - x_{k45} - x_{k13})}{(r_3 + r_5) + j x_{k35}}. \quad (26)$$

Используя уравнения (1), (23), (24) и (26), находим из уравнения (24) уравнение (27), аналогичное (10),

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_1 - i_4 Z, \quad (27)$$

где $Z = R + j X$ представляет эквивалентное сопротивление исследуемого трансформатора, причем

$$\left. \begin{aligned} R &\approx r_1 + r_4 + \frac{1}{4} \frac{(r_3 + r_5)(x_{k43} + x_{k15} - x_{k45} - x_{k13})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2} \\ X &\approx x_{k14} - \frac{1}{4} \frac{x_{k35}(x_{k43} + x_{k15} - x_{k45} - x_{k13})^2}{(r_3 + r_5)^2 + x_{k35}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Так как уравнение (27) по виду совпадает с уравнением (10), то все выводы § 4 применимы и в данном случае.

Полагая аналогично тому, как это было сделано в предыдущем случае, $r_3 + r_5 = \infty$ (компенсирующая обмотка разомкнута), получим из уравнения (28) сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора с обмотками, расположенными на разных сердечниках:

$$Z_1 = r_1 + r_4 + j x_{k14} = R_1 + j X_1. \quad (29)$$

Сравнивая значения X_1 и X , легко убедиться, что и в трансформаторе по схеме рис. 4 вследствие наличия компенсирующей обмотки реактивность короткого замыкания уменьшается.

9. Определение эквивалентного сопротивления. Экспериментальное определение эквивалентного сопротивления так же, как и в предыдущем

Таблица 3
Данные определения падения напряжения трансформатора по диаграмме короткого замыкания и из опыта погрузки при разных $\cos \varphi_2$

Первичное напряжение U_1 V	Сила первичного тока I_1 A	Приведенное вторичное напряжение U_2 V	$\cos \varphi_2$	Данные диаграммы			Падение напряжения диаграмма %	Падение напряжения опыт %
				m%	n%	n^2 %		
98,6	24,2	94,7	1,0	3,76	2,53	0,032	3,79	3,98
98,9	23,2	94,7	1,0	3,94	1,83	0,017	3,96	4,25
99,6	18,2	96,8	1,0	2,80	1,88	0,018	2,82	2,82
104,5	14,7	102,0	0,98	2,40	0,965	0,005	2,40	2,39
109,0	10,2	107,0	0,85	1,73	0,07	0	1,73	1,83
97,6	24,0	93,6	0,67	4,4	1,10	0,006	4,4	4,10
100,0	22,5	95,7	0,747	4,16	0,56	0,002	4,16	4,30
88,9	16,7	86,2	0,648	3,34	0,95	0,005	3,34	3,04
103,0	12,04	101,0	0,614	2,04	0,70	0,003	2,04	1,94
98,0	20,9	94,2	0,82	3,95	0	0	3,95	3,88
99,5	21,5	95,8	0,743	3,95	0	0	3,95	3,72
100,0	21,7	96,5	0,653	3,86	1,1	0,006	3,87	3,5
101,6	21,5	98,2	0,553	3,61	1,48	0,01	3,62	3,35

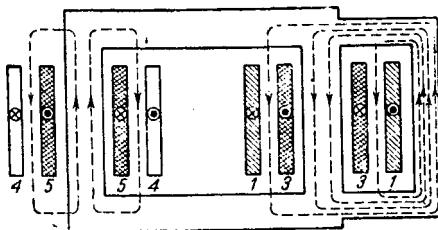


Рис. 15

случае, производится на основании данных опыта короткого замыкания. Что касается расчетного определения Z , то его можно вычислить по отдельным сопротивлениям короткого замыкания обмоток 1 и 2, 2 и 3 и т. д., пользуясь уравнением (28).

Приняв допущения, сделанные в § 4, получим следующую приближенную формулу для реактивного сопротивления трансформатора:

$$X = x_{k14} - \frac{1}{4} \frac{(x_{k13} + x_{k45} + x_{k14})(2x_{k14})^2}{(r_3 + r_5)^2 + (x_{k13} + x_{k45} + x_{k14})^2}.$$

Так как обычно $(r_3 + r_5)^2$ мало по сравнению с $(x_{k13} + x_{k45} + x_{k14})^2$ и $x_{k13} + x_{k45}$ мало по сравнению с x_{k14} , то можно считать

$$X \approx x_{k13} + x_{k45}, \quad (30)$$

т. е. реактивность короткого замыкания рассматриваемого трансформатора с полным разобщением рабочих обмоток примерно в два раза больше реактивности обычного двухобмоточного трансформатора.

10. О потоках рассеяния. Приняв во внимание замечания относительно потоков, пронизывающих различные обмотки (§ 5), получаем при внешнем расположении компенсирующих обмоток распределение потоков, указанное на рис. 14. Если же компенсирующая обмотка расположена внутри рабочих обмоток (рис. 15), то поток, идущий из сердечника, на котором находятся обмотки 1 и 3, не может пройти через другой сердечник, так как последний окружен короткозамкнутой вторичной обмоткой 4, поэтому потоки, пронизывающие обмотки 1 и 3, должны замкнуться в пространстве, окружающем трансформатор.

Расположение обмоток по рис. 15 является более удобным и с точки зрения изолирования обмоток, однако наличие потоков рассеяния, проходящих в пространстве, окружающем трансформатор, требует специального устройства для уничтожения вредного влияния этих потоков. Для этой цели фирма Brown-Boveri в трансформаторе, построенном для швейцарских электрических железных дорог по схеме рис. 4, применила дополнительный сердечник, по которому должны замыкаться потоки рассеяния (рис. 16).

11. Мощность компенсирующей обмотки. Заменив в формуле (26) реактивности x_{k85} , x_{k43} и x_{k15} их значениями из уравнений § 4, получаем

$$I_s \approx I_4 \frac{jx_{k14}}{(r_3 + r_5) + j(x_{k13} + x_{k45} + x_{k14})}. \quad (31)$$

При сделанных в § 9 допущениях имеем

$$I_s \approx I_4 \approx I_1, \quad (23)$$

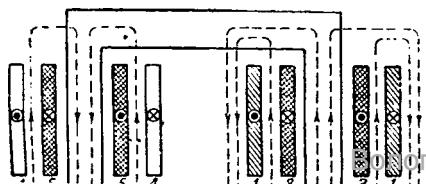


Рис. 16

т. е. в нашем случае, когда вывод был произведен для обмоток, имеющих одинаковое число витков, токи во всех обмотках примерно равны друг другу, следовательно, равны между собой и ампервитки всех обмоток. Таким образом мощность, передаваемая через компенсирующую обмотку, также будет равна мощности вторичной цепи, следовательно, вес меди компенсирующих обмоток 3 и 5 должен быть равен весу меди первичной и вторичной обмоток.

12. Экспериментальная проверка. Проверка правильности формулы (28) была произведена на том же однофазном трансформаторе, который был использован для эксперимента при исследовании каскадного трансформатора с двумя вторичными обмотками (§ 7). В исследуемом случае первичной обмоткой служила одна половина обмотки на 220 V, а вторичной—вторая половина этой обмотки, расположенная на другом сердечнике; в качестве компенсирующих обмоток была использована внешняя обмотка на 95 V.

Таблица 4

Сводка результатов опытов короткого замыкания при исследовании каскадного трансформатора по схеме рис. 2

№ обмоток	Измерено			Значения x_k , приведенные к обмотке № 1	Примечание
	первич-ная обмотка	коротко-замкну-тая обмотка	Z_k	r_k	
1	3	0,258	0,248	0,070	0,070
1	4	3,64	0,799	3,560	3,560
1	5	3,720	0,973	3,600	3,600
3	5	0,701	0,247	0,657	3,560
4	3	3,720	0,973	3,600	3,600
4	5	0,258	0,248	0,070	0,070
1	4	0,469	0,456	0,109	0,109

Таблица 5

Сводка результатов измерений омических сопротивлений обмоток трансформатора

№ обмоток	Измерено		Значения, приведенные к обмотке № 1
		r	
1+4		0,0981	0,0981
3+5		0,0683	0,371

Измеренные сопротивления короткого замыкания сведены в табл. 4, а данные измерения омических сопротивлений в табл. 5. Подставляя опытные значения в формулу (28), получаем эквивалентное сопротивление трансформатора при работе его с компенсирующей обмоткой³)

$$Z = 0,458 + j0,110 = 0,471 \Omega.$$

Измерено:

$$Z = 0,456 + j0,109 = 0,469 \Omega.$$

Как видим, расхождение между подсчетом и опытом ничтожно и находится в пределах точности техники измерения и вычисления.

В заключение авторы выражают свою искреннюю признательность проф. В. А. Толвинскому за его ценные методические указания при разработке данной темы.

Указатель литературы

1. F. Dessaauer, Über einen neuen Hochspannungstransformator und seine Anwendung Zur Erzeugung durchdringungsfähiger Röntgenstrahlen. Verh. d. deutsch. Phys. Ges. 1917 г., т. 19, стр. 155; реферат „Е и М“, 1919 г., стр. 169.
2. E. Welter, Über einen neuen Hochspannungstransformator nach Dessaauer für sehr hohe Spannungen, „ETZ“, 1918 г., стр. 373 и 383.
3. W. Hess, Ein Lufttransformator für sehr hohe Spannungen. „Bull. Schw. Verein“, 1912 г., № 5; реферат „Е и М“, 1921 г., стр. 552.
4. Vogelsang, Neuerungen im Starkstromapparatenbau, „Е и М“, 1922 г., стр. 257.
5. F. Dessaauer, Über die Transformatoren mit gesteuerter Beanspruchung des Isolermaterials, „ETZ“, 1923 г., стр. 1087.
6. Pfiffner, Kaskaden-Erdungspulen und Messwandler, „ETZ“, 1926 г., стр. 44.
7. A. Meyerhaus, Dreispannungstransformator, „ETZ“, 1926 г., стр. 1171.

8. E. Wirz, Transformatoren mit Wicklungen in Kaskadenschaltung.—Bull. Schw. El. Verein, 1927 г., стр. 257 и 355.

9. E. Wirz, Der Kaskadentransformator mit ungleichmässig verteilten Wicklungen als Spannungswandler, „Arch. f. El.“, т. 21, 1929 г., стр. 563.

10. Zum Abschluss der beschleunigten Elektrisierung der Schweizerischen Bundesbahnen, „ETZ“, 1929 г., стр. 713.

11. F. I. Fischer, Kaskaden-Transformatoren, Mitteilungen aus dem Arbeitsgebiete der Koch & Sterzel, июнь, 1929 г., № Т-16.

12. A. Tschegnuscheff, Quelques considerations techniques et économiques sur l'emploi des transformateurs avec couplage en cascade pour l'alimentation des Superréseaux, Congrès Intern. d'Electricité Paris, 1932 г.

13. В. Н. Глазанов и Е. А. Иванов, Каскадная система включения силовых трансформаторов, Сборник Ленинградского электромеханического института, Ленинград, 1932 г., вып. I, стр. 26.

11 ноября 1933 г.

О выборе типа генератора повышенной частоты

Инж. Е. Г. Комар
Ленинград

За последнее время в связи с бурным развитием электрометаллургии большое значение приобрели генераторы повышенной частоты ($400 \div 1000$ Hz). При проектировании подобного генератора весьма существенное значение имеет правильный выбор типа генератора.

Известно, что наибольшим распространением пользуются два типа генераторов повышенной и высокой частот — обычный переменнополюсный и генератор

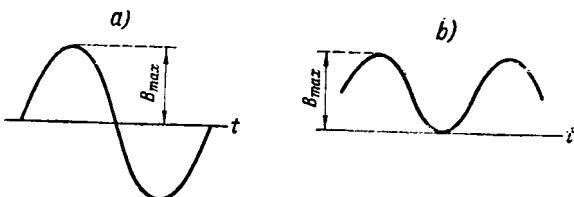


Рис. 1

с полюсами одного наименования на роторе, так называемый индукторный. Известно, что индукторный генератор при обычной частоте 50 Hz оказывается невыгодным; использование его активного материала приблизительно в два раза ниже, чем в генераторе обычного переменнополюсного типа. Однако конструктивные достоинства индукторного генератора (отсутствие обмоток на роторе) вызвали к жизни попытки его построения для тока с частотой 50 Hz. Такой генератор был даже построен фирмой Oerlikon. Успеха, однако, эти попытки не имели.

Но для высоких частот генераторы индукторного типа оказываются экономичнее синхронных. В синхронных генераторах обычной частоты величины магнитных индукций в различных участках магнитной цепи определяются, главным образом, магнитными свойствами железа. Обычно встречающиеся значения являются предельными, так как дальнейшее их увеличение вызвало бы чрезмерное увеличение намагничивающего тока.

Этим обясняется то, что для обычных низких частот индукторные генераторы совершенно неконкурентно способны по сравнению с нормальными переменнополюсными генераторами. Известно, что при одинаковых максимальных индукциях, а следовательно, при одинаковом намагничивающем токе, индукторный генератор дает э. д. с. в два раза меньшую, чем генератор обычного типа. При переходе к повышенным частотам весьма сильно начинают возрастать удельные потери в железе. Их рост может быть замедлен, с одной стороны, уменьшением толщины железа (которое, однако, может идти лишь до ее наивыгоднейшего зна-

При достаточной частоте потери начинают играть решающую роль при выборе индукции. Но так как потери (так же как и э. д. с.) зависят не от максимального значения индукции, а от ее вариации, то в этом случае оба генератора — переменнополюсной и индукторный — становятся равносценными в отношении использованности их размеров. Но так как за индукторным генератором при высоких частотах остается ряд крупных конструктивных преимуществ, то, начиная с некоторых частот, необходимо считать генератор индукторного типа значительно более выгодным, чем генератор обычный переменнополюсный. Нахождение частоты, при которой индукторный генератор становится более выгодным, чем генератор обычного типа, и является целью настоящей работы.

Для иллюстрации вышесказанных положений приведем кривые индукции в железе в машинах обоих типов при малых и при больших частотах. Эти кривые даны на рис. 1 и 2. Кривые *a* обоих рисунков относятся к переменнополюсным генераторам, а кривые *b* — к индукторным. Рис. 1 дает кривую индукции в железе при низких частотах. Фактором, ограничивающим индукцию B_{max} , здесь является намагничивающий ток (обмотка возбуждения). Для обоих случаев (*a* и *b*) ампервитки возбуждения одинаковы, но э. д. с. в первом случае в два раза больше второй. В первом случае потери в железе будут в четыре раза больше, чем во втором (пропорция B^2). Рис. 2 дает кривые индукции в железе при высоких частотах. Здесь ограничивающим фактором являются потери в железе. Для обоих случаев потери в железе приблизительно равны (если пренебречь некоторым увеличением потерь от поляризации железа). Равными также оказываются и наводимые потоками э. д. с. Таким образом в отношении использованности материала оба случая, *a* и *b* на рис. 2 оказываются равносценными.

Для того чтобы от случая *a* на рис. 1 перейти к случаю *a* на рис. 2, следует уменьшить индукцию в железе нормального переменнополюсного генератора в два раза. При этом потери в железе уменьшаются в четыре раза. Таким образом уменьшение потерь в железе в четыре раза за счет снижения индукции, когда все другие мероприятия исчерпаны (уменьшение



толщины железа, изменение его качества и т. д.), будет являться признаком равной экономичности генераторов обоих рассматриваемых типов.

Для нахождения частоты магнитного поля, при которой наступает эта равная экономичность, предварительно исследуем вопрос о влиянии толщины листов железа на потери в нем при различных частотах. Потери в железе для случаев низких и повышенных частот могут быть вычислены по формуле:

$$Q = \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \left[\sigma_f \left(\frac{f}{100} \right)^2 \delta^2 + \sigma_h \frac{f}{100} \right] \text{W/kg}, \quad (1)$$

где B — эффективное значение индукции; f — частота; δ — толщина железа.

Если δ выражено в миллиметрах, то коэффициенты $\sigma_f = 22,4$, $\sigma_h = 4,4$ для динамного железа и $\sigma_f = 4,9$, $\sigma_h = 2,4$ — для трансформаторной легированной стали.

При заданном постоянном магнитном потоке через данное сечение железа индукция

$$B = C \frac{\delta + \Delta}{\delta}, \quad (2)$$

где Δ — толщина изолирующей прослойки между листами активного железа. Подставив B в Q , получаем

$$Q = C \left[\sigma_f \left(\frac{f}{100} \right)^2 (\delta + \Delta)^2 + \sigma_h \frac{f}{100} \left(1 + \frac{\Delta}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Обозначим для сокращения

$$K_1 = \sigma_f \left(\frac{f}{100} \right)^2 \quad (4)$$

$$K_2 = \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right). \quad (5)$$

Тогда

$$Q = C \left[K_1 (\delta + \Delta)^2 + K_2 \left(1 + \frac{\Delta}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Найдем минимум Q из условия $\frac{dQ}{d\delta} = 0$:

$$2K_1(\delta + \Delta) - 2K_2 \left(1 + \frac{\Delta}{\delta} \right) \cdot \frac{\Delta}{\delta^2} = 0$$

или

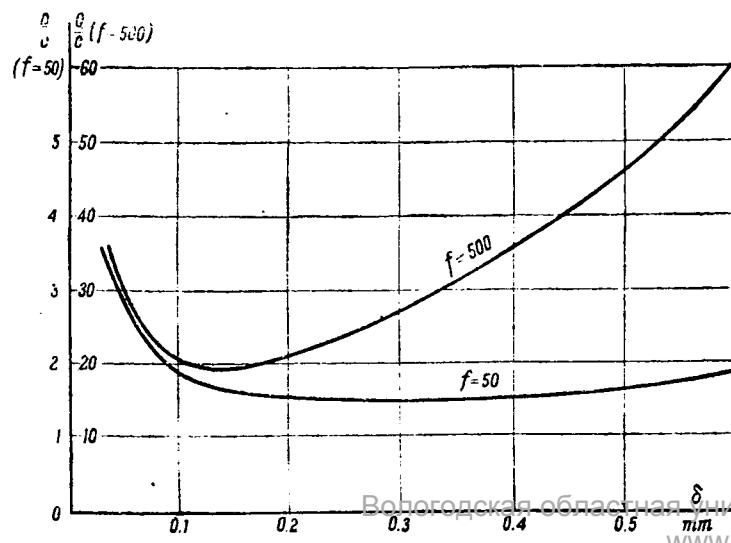
$$K_1 \delta + K_1 \Delta - \frac{K_2 \Delta}{\delta^2} - \frac{K_2 \Delta^2}{\delta^3} = 0;$$

$$K_1 \delta^4 + K_1 \Delta \delta^3 - K_2 \Delta \delta - K_2 \Delta^2 = 0,$$

или

$$K_1 \delta^3 (\delta + \Delta) - K_2 \Delta (\delta + \Delta) = 0;$$

$$(K_1 \delta^3 - K_2 \Delta)(\delta + \Delta) = 0.$$



Решение $\delta = -\Delta$ не имеет смысла.

Поэтому

$$K_1 \delta^3 - K_2 \Delta = 0,$$

откуда

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{K_2}{K_1}} \cdot \Delta$$

или, заменяя K_1 и K_2 их значениями из (4) и (5),

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\sigma_h}{\sigma_f} \cdot \frac{100}{f} \cdot \Delta}. \quad (7)$$

Эта формула дает наивыгоднейшее значение толщины железа при данной толщине изоляции и при данной частоте. В табл. 1 приведены значения δ для легированного железа и для $\Delta = 0,025$ мм.

Для $\sigma_h = 2,4$, $\sigma_f = 4,9$ и $\Delta = 0,025$

$$\delta = \frac{1,07}{\sqrt[3]{f}}. \quad (8)$$

Для динамного железа наивыгоднейшее значение

$$\delta = \frac{0,79}{\sqrt[3]{f}}. \quad (9)$$

Вообще числитель колеблется незначительно и можно приближенно считать для всех сортов железа

$$\delta = \frac{1}{\sqrt[3]{f}}. \quad (10)$$

Таблица 1

f	50	100	200	300	400	500	600 Hz
δ	0,291	0,23	0,183	0,16	0,145	0,135	0,127 mm

Если подсчитать по предлагаемой формуле значение, например, для $f = 15000$ (чего мы не имеем права делать, так как при таких частотах потери исчисляются иначе), то при $f = 15000$

$$\delta = 0,045 \text{ mm},$$

что близко подходит к обычно выбираемым толщинам для машин высокой частоты.

В табл. 2 и 3 приведены значения потерь при различных толщинах железа соответственно для $f = 50$ и $f = 500$. Потери вычислены относительные, т. е. $\frac{Q}{C}$ по формуле (3).

Таблица 2

$f = 50 \text{ Hz}$									
δ	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
$\frac{Q}{C}$	3,175	2,07	1,78	1,65	1,57	1,55	1,54	1,55	1,55
δ	0,4	0,5	0,6						
$\frac{Q}{C}$	1,57	1,68	1,79						

Таблица 3.

$f = 500 \text{ Hz}$									
δ	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
$\frac{Q}{C}$	32,2	21,9	20,1	20,3	21,3	23,2	25,7	28,7	31,8
δ	0,4	0,5	0,6						
$\frac{Q}{C}$	35,6	47	61						

На рис. 3 по данным этих таблиц построены кривые относительных потерь в зависимости от δ . Кривые построены в различных масштабах для возможности их совместного изображения. Характер изменения потерь показывает, что величина δ может безболезненно меняться в широких относительно пределах. Например, для $f = 50$ переход от наивыгоднейшей толщины 0,29 к обычной 0,5 мм дает лишь 9-процентное увеличение

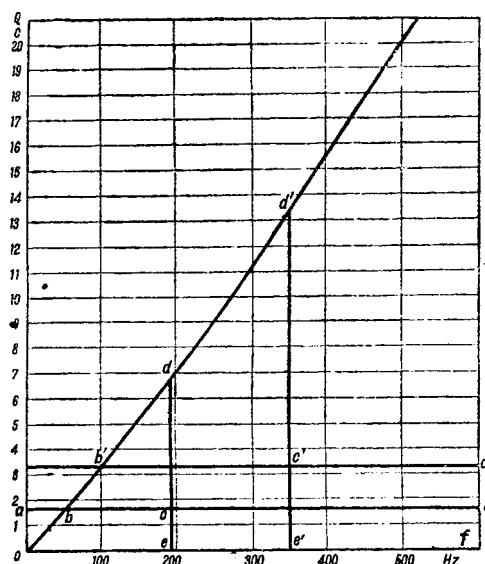


Рис. 4

вычисления потерь при различных частотах по формуле (3)

Таблица 4

f	50	100	200	300	400	500	600
δ	0,291	0,23	0,183	0,16	0,145	0,135	0,127
$\frac{Q}{C}$	0,54	3,27	7,05	11,16	15,52	19,91	24,78

По данным этой таблицы построена кривая на рис. 4. Потери при наивыгоднейшей толщине возрастают немногим быстрее, чем по линейному закону.

Для проведения исследования вычислим относительные потери $\frac{Q}{C}$ для $f = 50$ Hz при толщине железа $\delta = 0,5$ mm (потери в обычных машинах). Это дает $\frac{Q}{C} = 1,68$.

Посмотрим, как должны меняться параметры машины, если мы желаем сохранить эту величину потерь при всех частотах. Для этого проведем параллельно оси абсцисс на рис. 4 прямую с ординатами 1,68. Она выражает постоянство потерь во всех частотах. Бу-

дем передвигаться по нашей прямой слева направо от точки a . Первое время сохранение потерь постоянными идет за счет уменьшения δ . Однако этот процесс может идти только до точки b , для которой имеется уже наивыгоднейшая толщина железа. Дальнейшее уменьшение толщины железа вызовет увеличение потерь как при данной частоте, так и всякой другой большей. Сохранение постоянства потерь при дальнейшем увеличении частоты возможно лишь за счет уменьшения индукции. Таким образом дальнейшее продвижение вправо по прямой aa' от точки b связано с уменьшением индукции.

Рассмотрим точку d на кривой и точку c на прямой. Для этих точек характерно соотношение ординат

$$ed = 4ec,$$

т. е. при частоте, соответствующей точке e , потери при постоянной B оказываются в четыре раза больше, чем те постоянные потери (1,68), которые мы поддерживаем постоянными за счет снижения индукции. Это означает, что индукция для случаев потерь в точке d больше индукции для точки c в два раза.

Таким образом, если мы желаем сохранить потери в железе равными потерям при $\delta = 0,5$ mm, и $f = 50$ Hz при больших частотах, то мы приходим уже при $f = 200$ (по рис. 4) к снижению индукции в два раза. Таким образом, начиная с этой частоты, оба типа генераторов (переменнополюсной и индукторный) становятся равнозначными.

Однако в высокочастотных генераторах потери, которые допускаются в железе, лежат значительно выше значений потерь, имеющихся в машинах низкой частоты. Поэтому прямая aa' должна быть проведена выше, чем это было сделано вначале. Если принять за предел потери, в два раза превосходящие обычно принятые в низкочастотных машинах, то можно осуществить построение, аналогичное описанному (прямая $a'a'$, точки b', c', d', e'). Это дает критическую частоту $f = 350$ Hz. Если принять за предельные потери, в три раза большие обычных в низкочастотных генераторах, то построение дает критическую частоту $f = 500$ Hz.

Таким образом, начиная с 250—300 Hz, индукторные машины становятся вполне конкурентоспособными в отношении использования материала. На частоту $f = 500$ Hz есть полное основание строить машины индукторного типа.

5 марта 1934 г.

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Инж. А. С. Либерман
Ростов-на-Дону, ВЭТ

Определение числа заводских трансформаторных подстанций¹⁾

Распределение электрической энергии в современных промышленных предприятиях представляет целый ряд особенностей, которые до сего времени не подвергались надлежащему изучению. Существующие теоретические курсы распределительных сетей или совсем не затрагивают специальных заводских сетей, или освещают их с точки зрения теории и практики так называемых городских сетей и потому далеко не всегда удачно и правильно.

Наша журнальная литература также не уделяет достаточного внимания проблемам заводского токораспределения.

Можно указать только на одну работу проф. В. М. Хрущова, "Рациональный расчет электрических заводских сетей", который поставил вопросы размещения трансформаторных подстанций и щитков в цеху. К сожалению, решение задачи в виде формулы наивыгоднейшего расстояния от подстанции до точки с наибольшим падением напряжения, предложенная им, не дает достаточной ориентировки в вопросе о числе подстанций. Самый вид этой формулы, в которой нивелированы оценкой в различных трудах все виды

проектов для ориентации в основных вопросах изменения расхода металлов, потерь энергии и пр. в связи с перемещением трансформаторных подстанций по цеху.

Ограниченностю области применения формулы проф. В. М. Хрущова может быть лучше всего показана на приведенном им же примере определения наивыгоднейшего числа подстанций для одного большого цеха металлообрабатывающего завода в 10 MW. Прямыми подсчетом легко доказать, что если принять вместо трех подстанций (число по формуле проф. В. М. Хрущова) 12 подстанций, то можно сэкономить в питательной сети 23 t меди, или 74% при одинаковых первоначальных затратах на сеть в целом (трансформаторы, подстанции, линии и пр.) и при совершенно одинаковых потерях мощности.

При одинаковых эксплуатационных расходах можно иметь несколько различных технических решений и среди них такие, которые дают большую экономию цветных металлов. Формула проф. В. М. Хрущова этого обстоятельства не отражает. Основная цель излагаемой ниже теории — дать формулу числа подстанций, которая ориентировала проектировщика на такие именно решения, при

I. Основные положения конструирования схем заводского токораспределения

Решение задачи по конструированию схемы промышленной сети сводится к тому, что по заданным первоначальным узлам (точкам питания) и конечным узлам (точкам потребления) необходимо найти типы и величины промежуточных узлов²⁾.

Многообразие возможных решений такой задачи совершенно очевидно. Сложность же заключается в том, что существует только один метод — «вариантных просчетов», который при своей громоздкости не может никогда гарантировать того, что принятое решение самое выгодное среди других возможных.

В самой основе вариантов выбора схемы не имеется никакой теоретической базы, и выбор вариантов для сравнений делается на основе опыта выполненных ранее схем.

Конструктивное оформление линий и узлов в промышленных сетях разнообразно. Выбор конструктивных элементов прямо и косвенно влияет на конструирование самой схемы.

В последующем изложении предполагается, что все линии выполнены из освинцованных кабелей марки СБС, уложенных в кабельных каналах определенной конструкции внутри цехов и в траншеях вне цехов.

Предложенная ниже методология решения задачи не изменится, если остановиться на других известных конструктивных оформлениях (провод в трубах, провода на конструкциях и пр.), важно только, чтобы схема составлялась из однотипных элементов. Выбор элементов другого типа может повлиять только на конечные цифровые результаты предложенных ниже решений, которые могут быть применимы без поправок только к той (правда, многочисленной) группе промышленных установок, где широко применяется освинцованный кабельный сеть.

Расположение токоприемников по цехам, равно как и взаимное расположение цехов, влияет значительно на конструирование схемы. В последующем изложении предполагается, что токоприемники расположены равномерно по территории цехов. Для большой группы заводов, например, металлообрабатывающих с индивидуальным приводом, такое предположение соответствует с достаточной точностью действительности, как удалось установить на опыте проверки выполненных установок. Отклонение же от равномерного расположения токоприемников повлияет только на то, что предложенный ниже метод решения должен применяться к отдельным участкам.

В ряде случаев отдельные потребители энергии или целая группа их по эксплуатационным соображениям должна быть составлена в особые условия в смысле питания, управления питанием и резервирования. Все такие случаи из последующих рассуждений исключаются, и предполагается, что все потребители должны быть установлены в совершенно одинаковые условия. Выполнение особых условий бесспорно может отразиться на конечных ниже предлагаемых выводах, однако размер этого влияния может быть в каждом случае отдельно учтен.

Обезличивание всех потребителей энергии дает основание сделать вывод, что конструирование схемы по заводу должно выполняться по одному какому-либо закону, наиболее приемлемому по экономическим и эксплуатационным соображениям для конкретных и общих для всего завода условий.

Конструирование схемы из выбранных элементов при заданном расположении токоприемников будет теоретически изучено со стороны расхода металла (меди, активного железа и свинца) и потерь энергии, а равно также рассмотрено под углом зрения эксплуатационных удобств и общей стоимости. В изучении схем специально с

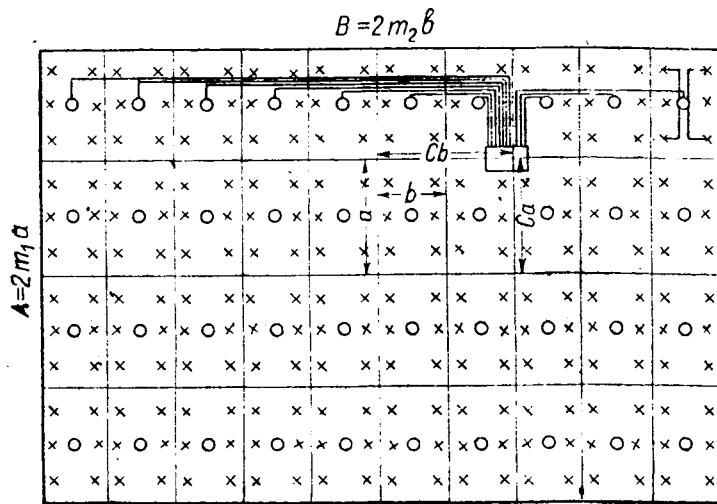


Рис. 1

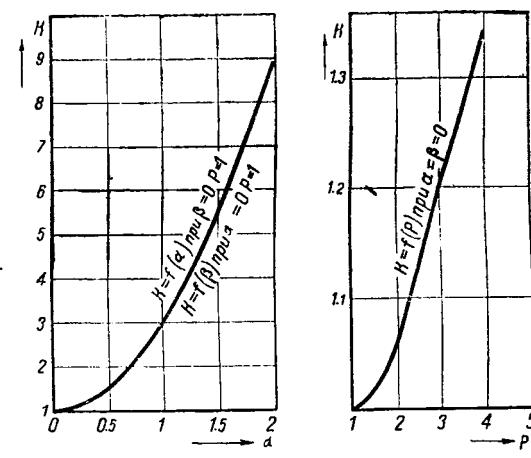


Рис. 2

точки зрения расхода металла вне зависимости от общей стоимости находят отражение современные условия.

II. Длина линий

Рассмотрим радиальный узел величиной X_1 , питающий узлы X_2 , равномерно расположенные на каком-либо участке³⁾. Ограничим этот участок прямоугольником.

В полном соответствии с монтажной практикой предполагаем, что кабели в цехах укладываются только во взаимно перпендикулярных направлениях, параллельных наружным стенам. Случай укладки кабелей по «диагоналям» очень редки и из рассмотрения внутренних сетей могут быть совсем исключены.

Обозначим стороны участка узла X_1 через A и B , а стороны участков узлов X_2 соответственно через a и b . Предположим общий случай, когда узел X_1 расположен не в центре участка AB , а смешен вдоль стороны A на расстояние $C_a = \alpha A$, а вдоль стороны B — на расстояние $C_b = \beta B$. $A = 2m_1a$ — длина участка вдоль стороны A ; $B = 2m_2b$ — длина участка вдоль стороны B . Расположение узлов дано на рис. 1.

Общая длина линий вдоль стороны A

$$\begin{aligned} L_a &= \left\{ \frac{a}{2} + \left[\frac{a}{2} + a \right] + \left[\frac{a}{2} + 2a \right] + \dots + \right. \\ &+ \left. \left[\frac{a}{2} + (m_1 - 2\alpha m_1 - 1)a \right] \right\} 2m_2 + \left\{ \frac{a}{2} + \left[\frac{a}{2} + a \right] + \left[\frac{a}{2} + 2a \right] + \right. \\ &+ \left. \dots \left[\frac{a}{2} + (m_1 + 2\alpha m_1 - 1)a \right] \right\} 2m_2 = \\ &= 2m_2 \left[\frac{\left[\frac{a}{2} + \frac{a}{2} + (m_1 - 2\alpha m_1 - 1)a \right] m_1 (1 - 2\alpha)}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\left[\frac{a}{2} + \frac{a}{2} + (m_1 + 2\alpha m_1 - 1)a \right] m_1 (1 + 2\alpha)}{2} \right] = \\ &= m_1 \cdot m_2 \left[(a + am_1 - 2\alpha am_1 - a)(1 - 2\alpha) + (a + am_1 + 2\alpha am_1 - a)(1 + 2\alpha) \right] = am_1^2 m_2^2 [(1 - 2\alpha)^2 + (1 + 2\alpha)^2] = \\ &= 2am_1^2 m_2 + 8\alpha^2 am_1^2 m_2. \end{aligned}$$

Общая длина линий вдоль стороны B аналогично предыдущему будет

$$L_b = 2bm_1 m_2^2 + 8\beta^2 bm_1 m_2^2.$$

Общая длина линий по всему участку AB , отходящих от узла X_1 : $L = L_a + L_b = 2am_1^2 m_2 + 8\alpha^2 am_1^2 m_2 + 2bm_1 m_2^2 + 8\beta^2 bm_1 m_2^2$. Количество всех линий по участку, отходящих от узла X_1

$$X_1 = 2m_1 \cdot 2m_2 = 4m_1 m_2.$$

Средняя длина линии от узла X_1

$$L_{cp} = \frac{L}{X_1} = \frac{2am_1^2 m_2 + 8\alpha^2 am_1^2 m_2 + 2bm_1 m_2^2 + 8\beta^2 bm_1 m_2^2}{4m_1 m_2}.$$

Если примем

$$\frac{B}{A} = 1$$

и

$$AB = S,$$

то

$$L_{cp} = \sqrt{\frac{S}{4}} V \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 2 \frac{\alpha^2}{1} + 2 \beta^2 \right).$$

²⁾ Узлом называется точка, в которой сходятся несколько электрических линий.

Назовем выражение

$$\sqrt{\gamma} \left(\frac{1}{2\gamma} + \frac{1}{2} + 2 \frac{\alpha^2}{\gamma} + 2 \beta^2 \right) = K \quad (1)$$

коэффициентом конфигурации; тогда

$$L_{cp} = 0,5 K \sqrt{S} = 0,5 K \sqrt{\frac{P}{\sigma}}, \quad (2)$$

где P — нагрузка по цеху в kVA , $\sigma = \frac{P}{S}$ — плотность нагрузки в kVA/m^2 .

Средняя длина луча, как это видно из формулы (2), не зависит от величины узла, а есть функция только площади S участка и общей конфигурации.

Общая конфигурация оценивается коэффициентом K , который легко вычислить, зная соотношения сторон прямоугольника и смещение узла вдоль сторон (A на αA и вдоль стороны B на βB) от геометрического центра прямоугольника.

Независимо от применения для дальнейших выводов формула (2) может быть непосредственно использована в практике проектирования сетей, так как она дает возможность быстро и с достаточной точностью определить длину заводских сетей по заданной площади и основным представлениям с конфигурацией размещения. Смещение узла относительно геометрического центра участка дает значительное удлинение. Обычное в практике отнесение подстанции к внешней стене здания дает увеличение средней длины на 50%. Практикуемое иногда вынесение подстанции за пределы зданий цеха дает увеличение в десятки раз.

Кривые рис. 2 дают представление об удлинении сети (увеличении коэффициента K) при изменениях одной из величин α , β и γ .

Общая длина радиальных лучей узла величиной X_1 будет равна

$$L = 0,5 K_1 X_1 \sqrt{S}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) дают возможность разрешать ряд задач, которые представляют интерес в практике проектирования, и решения которых ниже опускаются, так как не имеют прямого отношения к последующим выводам.

Выше при выводе формулы средней длины радиальной линии сделано предположение о равномерности расположения нагрузок по участку.

Чтобы оценить, как изменится величина среднего значения длины при неравномерном расположении нагрузок, приведем пример, не останавливаясь на обобщении результатов.

Предположим, что по участку с $\gamma = 2$ (рис. 3а) на площади S равномерно расположены все нагрузки, а в геометрическом их центре ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) находится питательный узел.

Средняя длина линий

$$L'_{cp} = 0,5 K_1 \sqrt{S} = 0,5 \cdot 1,06 \sqrt{S}.$$

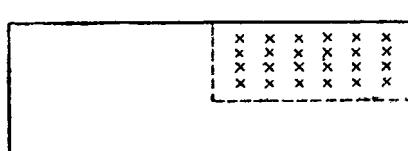
Если нагрузки переместятся таким образом, что окажутся все на одной четверти участка (рис. 3б), т. е. разместятся неравномерно при неизменном положении питательного узла, то средняя длина по той же формуле, приняв $\gamma = 2$, $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,5$, а площадь равной $\frac{S}{4}$ будет равна

$$L''_{cp} = 0,5 K_2 \sqrt{\frac{S}{4}} = 0,5 \cdot 2,12 \sqrt{\frac{S}{4}} = 0,5 \cdot 1,06 \sqrt{S},$$

т. е. средняя длина в этом случае совершенно не изменится.



a)



b)

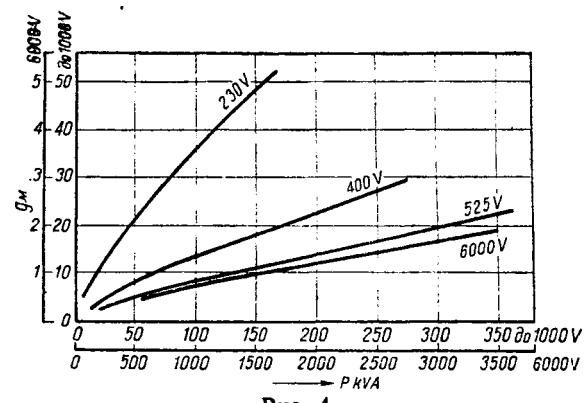


Рис. 4

Если пойти, однако, дальше и предположить, что все нагрузки разместятся на одной шестнадцатой участка (рис. 3с), то средняя длина окажется

$$L'''_{cp} = 2,5 L'_{cp}.$$

Приведенный пример достаточно ярко говорит о том, что ориентировочное представление о размещении нагрузок даст достаточно для практических целей точное значение средней длины ⁴⁾.

III. Вес металла

1. Вес металла в освинцованных кабелях

Практика проектирования современных заводских сетей почти не знает случаев, когда бы сечения силовых линий выбирались в зависимости от падения напряжения. Последующие выводы в полной мере подтверждают положенный в основу настоящей работы принцип: выбор сечений всех внутренних линий производится по плотности тока.

Руководствуясь данными о максимально допустимых нагрузках, определенными приказом ВСНХ СССР от 30 декабря 1929 г. за № 488, построены кривые удельного расхода меди ⁵⁾.

Кабели предположены в кабельных каналах и потому согласно нормам независимо от числа одновременно уложенных в канале линий применен только один поправочный коэффициент 0,75.

Уравнения этих кривых могут быть выражены эмпирической формулой

$$G_m = C \sqrt[4]{P^3}, \quad (4)$$

где G_m — удельный расход меди, а C — постоянные, причем $C = 0,047$ для 6000 V и 0,43 для 400 V.

Свинец в выбранной конструкции является значительной составляющей в общем балансе металла в сетях. По заводским данным веса в кабелях составлена таблица расхода свинца в граммах на один погонный метр кабеля приходящейся на 1 kVA рабочей нагрузки.

Вес свинца приведен условно к весу меди из расчета 1 kg меди = 2,5 kg свинца и построена кривая удельного расхода металла.

Эмпирическая формула удельного расхода металла для кабелей рабочего напряжения 400 V примет вид:

$$g = 5,1 + 1,08 P + 90 P^2 \quad (5)$$

2. Наивыгоднейшее по металлу сечение кабелей

Кривая удельной стоимости представлена на рис. 6. Наивыгоднейшие сечения по удельному расходу металла будут кабели 10 mm^2 до 1000 V и 16 mm^2 для 6000 V, по удельной стоимости — сечение 10 mm^2 до 100 V и 35 mm^2 для 6000 V. С достаточной для практики точностью (3%) можно считать, что удельный расход приведенного металла в низковольтных освинцованных кабелях при использовании всеми сечениями от 2,5 до 16 mm^2 будет одинакова и имеет значение

$$g_{min} = \frac{475}{U} g/kVA, \quad (6)$$

а для высоковольтных кабелей

$$g_{min} = \frac{7,2}{U} g/kVA,$$

где U — напряжение в киловольтах.

В практике проектирования заводских сетей, особенно современной, когда металла в сетях лимитирует подчас все строительство,

⁴⁾ Опыт применения этой формулы к конкретному размещению металлообрабатывающих цехов показал точность порядка десяти процентов.

⁵⁾ Под удельным расходом понимается вес на 1 kVA нагрузки и длины линии.

необходимо четко представлять то решение, которое приводит к минимальным затратам металла. Также четко необходимо представлять проектировщику, к каким экономическим последствиям может привести пользование кабелями наивыгоднейших по металлу сечений, взамен кабелей "экономических" сечений.

Отсылая к работе проф. В. М. Хрущова ("Рациональные основы проектирования электрических сетей", 1932, стр. 192), можно, пользуясь приведенной им кривой, оценить размер эксплуатационных перерасходов при переходе к "наивыгоднейшим по металлу" сечениям.

Приведенные выше и ниже указания отнюдь не следует рассматривать как возражения против применения экономических сечений. Цель настоящей работы — путем рационального конструирования самой схемы, путем внедрения высокого напряжения в цеховое токо распределение — практически ликвидировать остроту противоречия между "наивыгоднейшими по металлу" и "экономическим" решением задачи проектирования заводских сетей.

3. Минимальный вес приведенного металла в линиях при сечениях, выбранных по плотности тока

Клая в основу предложенную формулу средней длины и используя эмпирическую зависимость удельного расхода металла, получаем (опуская все промежуточные выкладки):

1) вес приведенного металла в линиях, сходящихся у одного угла, мощностью P ,

$$G = 0,5 \text{ kg} \sqrt{\frac{R^3}{\sigma}}; \quad (7)$$

2) вес приведенного металла в сети, имеющей X промежуточных узлов,

$$G = 0,5 \sqrt{\frac{P^3}{\sigma}} \left(g_1 K_1 + g_2 \frac{K}{\sqrt{X}} \right). \quad (8)$$

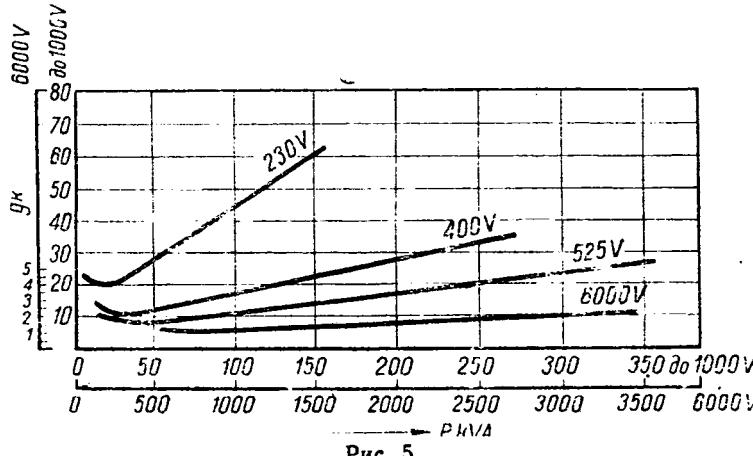


Рис. 5

Суммарный вес сети⁷⁾ определяется формулой

$$G = 0,5 K_1 \sqrt{\frac{P^3}{\sigma}} \left(5,1 + 0,108 P + 90 P^{-1} + \frac{K_2 g_{\text{дв}}}{K_1 \sqrt{X_1}} \right). \quad (9)$$

Как видно, суммарный вес является функцией величины первоначального узла X_1 , и эта функция имеет минимум, который для каждого отдельного случая можно найти графически и который, безусловно, зависит только от мощности и конфигурации.

Обобщая построенные кривые, представилось возможным предложить формулу (для мощностей от 50 до 1800 кВА), определяющую величину узла, при которой в линиях расходуется минимум металла

$$x = 0,04 P + 1 = 16 \frac{P}{U} + 1. \quad (10)$$

4. Вес металла в трансформаторах

Вес металла в трансформаторах учитывается приведением активного железа к меди из расчета 3,5 kg железа = 1 kg меди (по данным Электрозводства; см. "Вестник электропромышленности" № 3, 1932).

Расход приведенного металла g_T (в граммах) на 1 кВА мощности трансформатора показан на кривой рис. 7 и выражается с достаточной точностью эмпирической формулой:

$$g_T = 1020 - 0,17 P^2 + 310000 P^{-1,5} \text{ g/kVA}, \quad (11)$$

которая справедлива только в пределах изменения мощности трансформаторов от 50 до 1800 кВА и не может быть ни в коем случае распространена за пределы этих значений, так как не выражает того факта, что при росте мощности свыше 1800 кВА кривая должна обратиться в горизонтальную прямую.

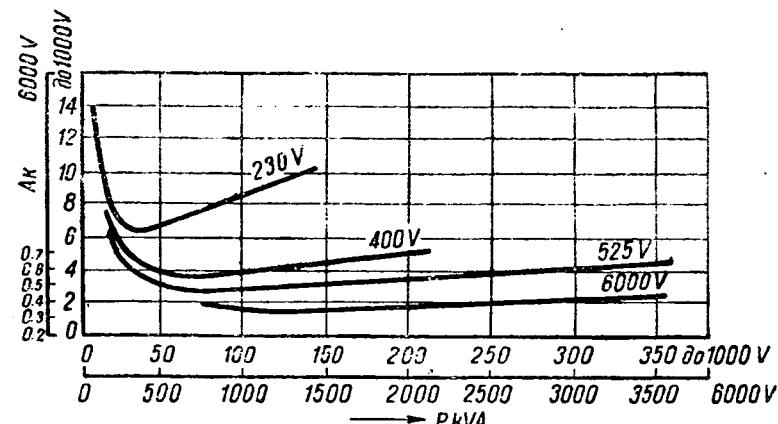


Рис. 6

Суммарный вес металла в трансформаторах суммарной мощности P при числе n трансформаторных единиц будет

$$G_T = g_T \frac{P}{n} n = 1020 P - 0,17 P^2 n^{-1} + 310000 P^{-0,5} n^{1,5}. \quad (12)$$

Для суждения о полном весе металла в сетях следует еще учесть вес металла в конструкциях самых узлов (в щитках, в распределительных устройствах, во всех шинных и кабельных соединениях на подстанциях и пр.). Ввиду того что изменение расхода металла здесь находится в тесной связи с конструктивными решениями, установление закономерности расхода металла в конструкциях узлов в обобщенном виде затруднительно и во всяком случае возможно только после стандартизации этих конструкций.

Однако, как показали результаты ряда проделанных просчетов конкретных примеров, расход металла в конструкциях узлов влияет относительно мало на предлагаемые ниже конечные выводы.

IV. Дробление трансформаторных узлов

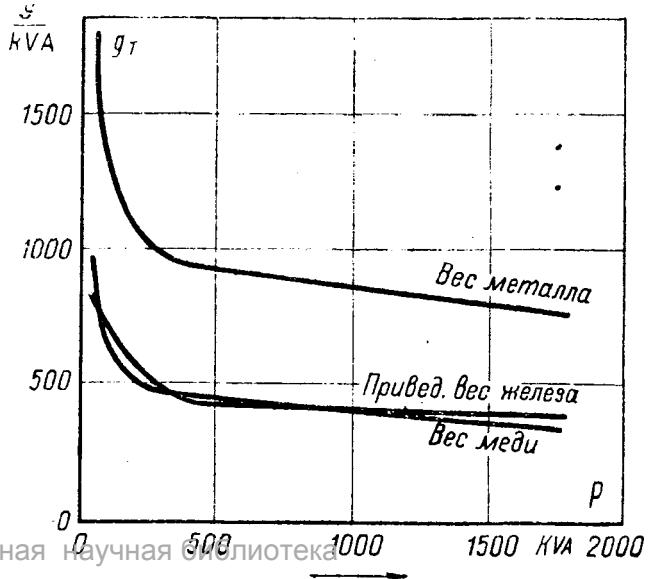
1. Кривые приведенного веса металла в сетях

Положим внешнюю сеть сконструированной таким образом, что изменение числа трансформаторных узлов мало влияет на конфигурацию, длину и сечения высоковольтных линий. Возьмем участок со средней плотностью нагрузок σ кВА/м² при общей мощности P кВА. Участок предположим таким, что при изменении числа трансформаторных узлов конфигурация каждого расположения будет изменяться незначительно и может быть оценена средним значением K_{cp} . Схема низковольтной сети предполагается чисто радиальной.

На основании предыдущего, можем написать вес металла в сети в функции от числа трансформаторных узлов:

$$G = 1020 P - 0,17 P^2 X^{-1} + 310000 P^{-0,5} X^{1,5} + \\ + 0,5 K_{cp} g \sqrt{\frac{P^3}{\sigma x}} + C.$$

Первые три слагаемых суммы дают вес металла в трансформаторах. Четвертое слагаемое — вес металла в линиях лучей первого порядка. Пятое слагаемое C определяет вес металла в высоковольтной линии и в лучах второго порядка, которые предполагаем неизменными и зависящими только от расположения токоприемников (так



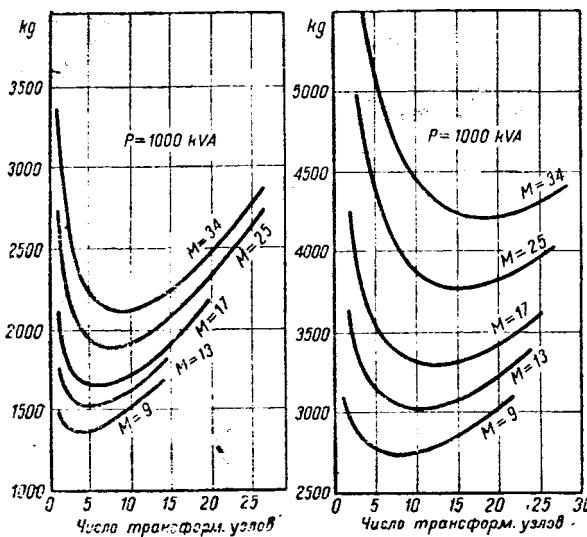


Рис. 8

называемая распределительная сеть по заводу), и вес металла в конструкциях самих узлов, которые предполагаем на основании вышеизложенного мало зависящими от числа узлов. Таким образом C представляет собой величину, которую в целом можно считать не зависящей от X .

Рассмотрение первой и второй производной G по X показывает наличие минимума, однако аналитическое определение X_0 (наи выгоднейшего по металлу), при котором G имеет минимальное значение, приводит к решению уравнения 5-й степени. Графические же определения X_0 для каждого отдельного случая вполне возможны, причем они неизменно показывают, что минимальный расход металла будет при значительном дроблении применяемых в современной практике мощностей подстанций.

Обобщенное графическое решение затрудняется четвертым слагаемым с изменяющимися в практике значениями g , K и σ .

Примем

$$g = \frac{4,75}{U} \text{ g/kVA},$$

где U — в киловольтах. Этим условием предопределяется положение, в силу которого подбор кабелей для линий будет производиться только из соображений экономии металла независимо от конструктивных возможностей узлов.

a) Выражение $\frac{K}{UV\sigma} = M$ примем параметром при построении семейства кривых G — составляющей общего веса сети для различных значений суммарной мощности P в функции от X . Рассмотрение семейства кривых G дает возможность сформулировать некоторые весьма существенные положения.

а) Точки минимума кривых G находятся практически на одной прямой при всех значениях параметра M и мощности P , что дало возможность предположить прямую зависимость и определить большую практической важности уравнение минимального веса как функции только двух величин мощности P и наивыгоднейшего по металлу числа трансформаторных узлов X_0 .

$$G_{\min} = 0,785 P + 145 X_0 + C.$$

б) Семейство кривых $G = f(x)$ дало возможность построения производных из них кривых $X_0 = f(M)$ (рис. 9) при параметре P , эмпирическая формула которых представляется с достаточной для практики точностью.

$$X_0 = 1,5 P \sqrt{\frac{K}{UV\sigma}} \cdot 10^{-3}. \quad (13)$$

Рассмотрение кривых рис. 8 дает все основания формулировать правило: при уточнении числа трансформаторов по их стандартным мощностям необходимо брать для X_0 ближайшее меньшее число.

О формуле автора для определения числа трансформаторных узлов

Полученная выше формула

$$X_0 = 1,5 P \sqrt{\frac{K}{UV\sigma}} \cdot 10^{-3} *$$

может быть рекомендована для оценки необходимого числа трансформаторных узлов при минимуме металла во всех случаях проектирования низковольтных заводских сетей, удовлетворяющим в ос-

новном условиям, изложенным в разделе I, несмотря на то, что при ее составлении был сделан целый ряд допущений:

а) Предположение о неизменности высоковольтной части является наиболее серьезной стороной сделанных допущений. Увеличение трансформаторных узлов в общем случае должно приводить к увеличению веса высоковольтной линии, учет которого в аналитической форме сложен ввиду зависимости от целого ряда факторов проектирования высоковольтных линий (токи коротких замыканий, резервирования и пр.). Просчет ряда случаев, затрагивающих высоковольтную сеть, однако, показал незначительное ее влияние на конечный результат.

Кривые и формулы построены в предположении $g = \frac{4,75}{U}$, постоянном при всяком числе X . Между тем, при малом числе X по конструктивным соображениям приходится прибегать к пользованию кабелями средних и крупных сечений, что значительно повышает удельный расход G и потому кривые G в левой своей части должны пойти выше показанного на рис. 8.

Коэффициент конфигурации K принят также неизменным, тогда как при всяком изменении числа X меняется и K и при этом в общем случае таким образом, что с увеличением числа X уменьшается участок, обслуживаемый трансформаторным узлом, и конфигурацию его удобней привести к квадрату с трансформатором в центре, т. е. к конфигурации, более близкой к единице. Это обстоятельство должно еще более повысить левую часть кривой.

По этим соображениям следует при выборе числа подстанций K принимать равным единице, т. е.

$$X_0 = \frac{1,5 P}{\sqrt{UV\sigma}} \cdot 10^{-3}. \quad (13')$$

В противовес этим двум факторам находится вышеуказанный рост веса за счет высоковольтных линий и рост веса за счет конструкций узлов в связи с увеличением числа X . Этот рост приводит к постепенному повышению правой части кривой.

Кривые, построенные с учетом всех этих факторов, для ряда случаев показали, однако, что значение X_0 изменяется незначительно.

б) При построении кривых M по кривым G минимальное действительное значение M получается всегда более 10. Между тем, при очень значительном возрастании плотности нагрузок σ значение параметра M по формуле может теоретически оказаться любым положительным целым, либо дробным числом. Неувязка эта объясняется тем, что эмпирическая формула веса металла в трансформаторах действительна в определенных границах и не имеет реального смысла за этими пределами. Очень большие плотности, естественно, должны были привести к большим мощностям трансформаторов, между тем, на участке больших мощностей полученная кривая их веса дает наибольшее отклонение от фактической, поскольку формула определяет непрерывное снижение удельного расхода, тогда как фактически при мощностях выше 1800 кВА удельный расход остается неизменным в связи с тем, что трансформаторы мощностью выше 1800 кВА со вторичным напряжением 400 В заводами не изготавливаются.

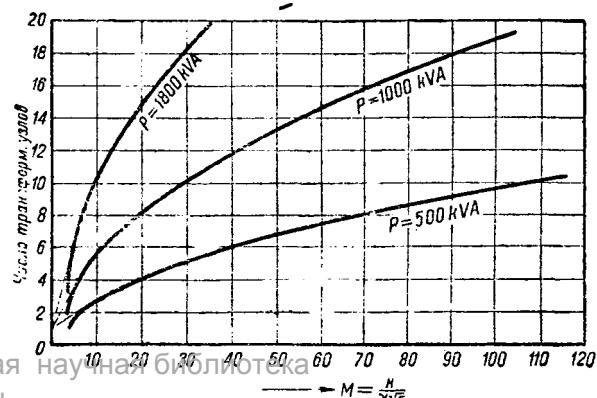
В силу этих общих соображений кривые M в начальной своей части условно спрямлены.

Это обстоятельство сказывается на пользовании формулой $X_0 = 1,5 P \sqrt{M} \cdot 10^{-3}$ в том, что для всех значений M ниже 15 необходимо считаться только с целой частью (отбрасывать дробь) смешанной дроби, которая получается в результате извлечения квадратного корня.

с) Решение уравнения (13) относительно σ дает представление о том, при каких плотностях нагрузок может найти применение та либо иная стандартная мощность трансформатора.

Так, при $U = 0,4$ кВ имеем для трансформаторов мощностью

1800 кВА	$\sigma = 331$ кВА/м ²
1000	32
560	3,1
320	0,32
180	0,03



Плотности нагрузок обычно в нашей практике таковы, что трансформаторы мощностью свыше 320 kVA как будто не могут найти применения. В предупреждение такого ложного вывода необходимо обратить внимание на следующее весьма важное обстоятельство:

Формула наивыгоднейшей по металлу мощности может быть отнесена с одинаковым успехом ко всему участку с известной на нем плотностью нагрузок, так как и отдельного элемента этого участка. Если плотность нагрузок на всем участке будет равномерной, то, действительно, при обычных средних значениях плотностей формула исключает применение трансформаторов свыше 320 kVA. При наличии же на участке каких-либо сосредоточенных нагрузок необходимо независимое применение формул для этих определенно оконтуренных частей участка, и тогда бесспорно получат применение трансформаторы больших мощностей.

Вообще предлагаемая формула дает тем более точные результаты, чем более четко будут оконтурены участки с определенными плотностями нагрузок.

д) Руководствуясь предложенной формулой веса металла в линиях и трансформаторах, представляется возможным проблему числа подстанций ставить и разрешать в иных плоскостях, имеющих практическое значение, например, в плоскости прямой замены кабелей низкого напряжения кабелями высокого напряжения без изменения при этом трассы и радиальной схемы с переносом в простые узлы мелких трансформаторов в отношении расстановки по цеху установленных на подстанциях трансформаторов и пр.

За недостатком места опускаем это рассмотрение.

е) Все выводы и соображения относительно дробления трансформаторных узлов покоятся на том предположении, что низковольтная сеть выполнена по чисто радиальной схеме. Переход к смешанной радиально-магистральной схеме дает дополнительную значительную экономию в металле и существенно повлияет на предложенную выше формулу.

Выбор между магистральным и радиальным токораспределением является самостоятельным вопросом конструирования схем и за отсутствием места здесь не рассматривается. Укажем только на то, что конструкция схемы должна быть радиально-магистральной с радиальными узлами, совмещенными с трансформаторными узлами. Промежуточные высоковольтные и низковольтные радиальные узлы могут быть рационально введены в схему в случаях особо сложных конфигураций или очень значительных мощностей.

V. Потери мощности

Не останавливаясь на известных правилах экономического расчета линий, укажем только на то, что все эти расчеты предусматривают всегда определенную схему. При неизменности схемы экономия металла приводила к уменьшению сечения провода и к обязательному увеличению потерь.

Выше рассматривались вопросы только в плоскости изменения самой схемы, и потому использовать существующие методы экономического расчета не представляется возможным.

Для ответа на весьма важный вопрос, как изменяются потери в сетях в связи с изменением числа подстанций, приходится прибегнуть к ряду вспомогательных формул и положений.

По данным Электрозводства построены кривые потерь мощности в трансформаторах отдельно в железе и в меди и суммарные потери в функции от мощности трансформаторов (рис. 10).

Суммарные потери в трансформаторах при полной их загрузке могут быть выражены эмпирической формулой:

$$P_t = 800 X + 18,5 P W,$$

где P — суммарная мощность трансформаторов. Удельные потери в линии, т. е. потери на единицу длины и единицу передаваемой по линии мощности, в функции от удельного расхода меди:

$$P_1 = \frac{P^2 L \cdot 1000^2 \cdot 3 \cdot 8,9}{57 E^2 P g_m PL} = \frac{\delta}{g_m} W,$$

где δ — коэффициент; при 230 V $\delta = 8,85$; при 400 V $\delta = 2,92$.

На участке с конфигурацией расположения K при средней плотности нагрузки δ kVA/m² и общей мощности P kVA имеется X трансформаторных узлов. От каждого трансформаторного узла отходят X_1 лучей к узлам второго порядка, от которых в свою очередь отходят по X_2 лучей к узлам третьего порядка (обычно уже токоприемникам). Полагая число, расположение и мощность последних неизменным, суммарные потери в сети в функции от X , X_1 и X_2 легко привести, пользуясь формулой (2) средней длины, к виду

$$P_1 = 0,5 \frac{\delta}{C} \sqrt[4]{\frac{P^2 X}{\sigma^2}} \left(K_1 \sqrt[4]{X_1^3} + K_2 \sqrt[4]{m X_2^2} \right).$$

Обозначая число первоначальных узлов через $m = X_1 X_2$ и исключая X_1 , формула потерь примет вид:

$$P_1 = 0,5 \frac{\delta}{C} \sqrt[4]{\frac{P^2}{\sigma^2}} \left(K_1 \sqrt[4]{\frac{m^3}{X^2 X_2^2}} + K_2 \sqrt[4]{m X_2^2} \right).$$

Эта формула дает закон уменьшения потерь в линиях вместе

Потери мощности в сети представляются в результате суммирования потерь в трансформаторах и линиях:

$$P = P_T + P_A = 800 X + 18,5 P + 0,5 \frac{\delta}{C} \sqrt[4]{\frac{P^2}{\sigma^2}} \left(K_1 \sqrt[4]{\frac{m^3}{X^2 X_2^2}} + K_2 \sqrt[4]{m X_2^2} \right). \quad (14)$$

В этом выражении K_1 и K_2 можно считать постоянными и независимыми от X ; m — число постоянное; X_2 — величина узла второго порядка (обычно — число токоприемников, подсоединяемых к каждому групповому щитку) хотя и зависит от X , однако в широких пределах изменения последнего можно считать постоянным. Дифференцированием найдем значение X , при котором потери будут минимальными:

$$X = \sqrt[8]{\frac{0,25^2 \delta^2 K_1^2}{800^2 C^2}} \sqrt{\frac{P^2 m}{\sigma^2 X_2^2}}.$$

Для сетей 400 V

$$X_0 = 0,0165 \sqrt{\frac{P m}{X_2^2}} \sqrt[3]{\frac{K^2}{\sigma}}.$$

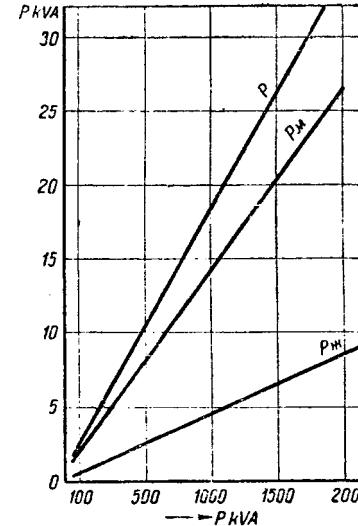


Рис. 10

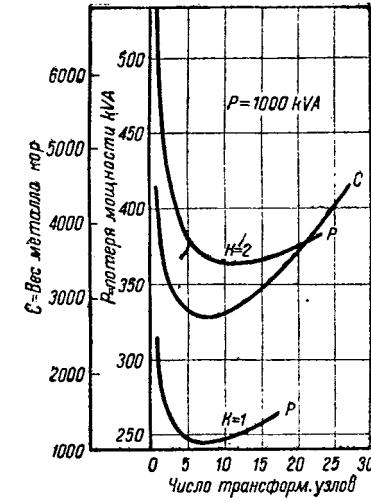


Рис. 11

При минимуме меди в линиях, т. е. когда $X_2 = 0,04 \frac{P}{X} 10^{-3}$ [для упрощения расчетов отбрасываем второе слагаемое из формулы (10) § 3, гл III]

$$X_0 = 0,0165 \sqrt{P \cdot 0,04 P} \sqrt[3]{\frac{K_1^2}{\sigma}} = 3,3 P \sqrt[3]{\frac{K_1^2}{\sigma}} 10^{-3}. \quad (15)$$

Выше было выведено, что минимум меди имеет место при

$$X_0 = 1,5 P \sqrt{\frac{K_1}{0,4 \sqrt{\sigma}}} 10^{-3} = 2,36 P \sqrt{\frac{K_1}{V \sigma}} 10^{-3}. \quad (15')$$

Сопоставление показывает, что дробление трансформаторных узлов до значений, наивыгоднейших по соображениям экономии металла, приводит к сокращению суммарных потерь в сетях. Для лучшего представления о характере изменений потерь при дроблении трансформаторных узлов построена для одного частного случая кривая потерь и сопоставлена с кривой расхода приведенного металла (рис. 11).

Таким образом представляется возможным формулировать весьма важное положение, идущее в разрез со всеми до сих пор известными представлениями о зависимости между расходом меди и потерями. Снижение затрат металла в сетях путем дробления трансформаторных узлов до наивыгоднейшего по металлу числа (дробление трансформаторных узлов) приводит к снижению потерь в сетях.

Ряд важных мероприятий по экономии металла приводится сейчас с учетом того, что в будущем при изменении соотношения между стоимостью энергии и стоимостью металла экономически целесообразно будет вносить в последующем соответствующие изменения в сооружениях (замена железа медью, выбор сечений по экономической плотности, а не по нагреву и пр.). Предлагаемое же решение задачи по экономии металла не может быть отнесено к какому-нибудь отрезку времени, оно сохранит свое абсолют-

VI. Некоторые технико-экономические вопросы дробления трансформаторных подстанций

Мощность короткого замыкания низковольтной сети в основном определяется суммарной мощностью параллельно работающих обмоток трансформаторов. Дробление трансформаторных узлов в основном устраивает затруднения, возникающие в низковольтных сетях при коротких замыканиях. Дробление трансформаторных узлов приводит к увеличенному количеству намагниченного железа, что должно привести к уменьшению коэффициента мощности установки.

Подробные подсчеты устанавливают относительную ничтожность этого ухудшения. Переход к мелким единицам с учетом занижения коэффициента их загрузки приводит к ухудшению не более как на 0,02.

При схеме с раздельными трансформаторами для силовой и осветительной нагрузок вопросов колебания напряжения в осветительной сети в связи с работой электродвигателей не возникает. При схеме с общими трансформаторами выбор числа трансформаторных узлов будет ограничиваться той минимальной мощностью обмоток трансформаторов при которых возможен пуск электродвигателей без вредного влияния на осветительную установку.

В зависимости от характера силовых нагрузок здесь возможны чрезвычайно резкообразные обстоятельства, учесть которые в общей формулировке крайне затруднительно. На конкретных примерах проектирования силовой сети с дробными трансформаторными узлами при общей схеме для силовой и осветительной сетей сколько-нибудь серьезных затруднений не встретилось, несмотря на то, что было жестко выдержано условие, по которому максимальные колебания напряжения при пуске рубильником короткозамкнутого электродвигателя не превосходили 1,2%.

Не исключена, однако, и такая возможность, что при наличии по цеху часто пускаемых крупных короткозамкнутых электродвигателей придется либо укрупнять трансформаторные узлы против подсчитанной наивыгоднейшей по металлу мощности, либо присоединять освещение только к некоторой части силовых трансформаторов, либо, наконец, проводить местами разделение этих сетей.

При совместном питании силовых и осветительных установок получает большое значение абсолютная величина напряжения на шинах низкого напряжения. Разница здесь в несколько вольт может иметь большое значение в смысле изменения удельного значения осветительной сети.

Если составить таблицу потерь напряжения для серии трансформаторов по последнему стандарту (ОСТ 4815/1—2) при различных значениях $\cos \phi$, то легко убедиться в том, что самый факт дробления трансформаторов ухудшает расчетные условия весьма незначительно, в пределах примерно 0,5% (а по действующему же еще прецессоранту даже несколько улучшается).

Если же учсть резкое сокращение длины линии как результат дробления трансформаторных узлов, то здесь скажутся значительные преимущества метода дробления.

Более детальная проработка вопроса располагаемого расчетного падения напряжения показывает, что ни факт совмещения силовой и осветительной нагрузок, ни факт дробления трансформаторных узлов не имеют определенного значения. В зависимости от местных условий может получить преимущество любая из схем. Не рассматривая здесь этого вопроса, следует только указать, что выше предложенные методы изучения в приложении к осветительным сетям дают большой технико-экономический эффект и составляют вместе с теорией магистральных линий содержание самостоятельной работы.

Оценка предлагаемого принципа дробления трансформаторных подстанций со стороны эксплоатации может быть сделана путем выявления того, насколько изменится число точек наблюдений, их об'ем и характер. Общее число узлов в сети в результате дробления подстанций не увеличится. Выбрасываются сложные и большие узлы, малые же трансформаторные узлы большей частью органически сливаются с крупными простыми узлами (групповыми щитами); в результате в общем случае число точек для эксплоатационных наблюдений можно считать неизменным. Характер же эксплоатационных наблюдений значительно изменяется. Выпадают большие трансформаторные подстанции, требующие надзора со стороны постоянно пребывающего персонала, и повышаются требования в отношении качества обслуживания внутрицеховых узлов.

В целом можно утверждать, что дробление трансформаторных узлов не введет ни осложнений в эксплоатацию заводского электрохозяйства, ни удорожания эксплоатации, оно приблизит высококвалифицированный надзор к цеху в силу продвижения высокого напряжения ближе к электродвигателю.

Задача резервирования питания завода или цеха в полном об'еме на сегодня не разрешается. Обычно осуществляется резервирование только одного большого узла, через который питается цех, притом и далеко не в полной мере, так как в лучшем случае резервируются трансформаторы и шины высокого напряжения, оставляя без запаса все остальные многочисленные элементы крупного узла, равно как все мелкие узлы и все линии. Цех с дробными трансформаторными узлами без всяких установленных резервных единиц всегда может быть приравнен в отношении бесперебойности своего питания к

стопроцентный резерв трансформаторов и все последние достижения техники в отношении резервирования и защиты.

При этом утверждении имеется в виду, что время, необходимое на замену или ремонт аварийного питательного фидера, может быть приравнено времени, необходимому для замены небольшого трансформатора, причем продолжительность простоя в общем случае может быть принята одинаковой.

Следует указать на то, что затраты металла и прочего оборудования на установку резервных трансформаторов в больших трансформаторных узлах в приведенных формулах не учитывались. При учете эти затраты могут быть с большим эффектом обращены на создание низковольтных перемычек между мелкими разбросанными по цеху трансформаторами, что создаст частичный резерв во внутритеховом токораспределении, обычно полностью отсутствующий.

Кроме того, следует отметить еще одно особого характера преимущество схемы с большим числом малых трансформаторных узлов. Серьезные повреждения какого-либо узла формсажорного характера выведут из строя на длительный срок только одну небольшую часть цеха или завода. Между малым трансформаторным узлом и участком цеха, им обслуживаемым, устанавливается в этом смысле связь, которая исключает необходимость резервирования в случае серьезного повреждения общего, естественно, для узла и части цеха.

Значительно более уязвимым представляется в этом смысле крупный трансформаторный узел.

Гибкость конструкции сетевого устройства в смысле приспособления к изменениям установленной мощности, загрузки, одновременности и пр. относится к числу его больших достоинств.

Схема с узлом большой мощности предусматривает в основном укладку металла в так называемую питательную сеть. Изменение нагрузок требует перекладки этой питательной сети, что представляет большие затруднения и практически выполняется только в той мере, в какой приходится усиливать сечения, так как замена больших уложенных сечений на меньшие неминуемо приводит к большим потерям.

Схема с большим числом малых узлов в основном ликвидирует так называемую низковольтную питательную сеть за счет частичного перемещения металла из кабельной сети в трансформаторы. Самые серьезные изменения и перемещения нагрузок по цеху могут быть легко разрешены путем увеличения или сокращения мощности отдельных трансформаторных узлов, ликвидации отдельных узлов или введения новых, что в основном приведет к маневрированию металлом в трансформаторах. Потери при переустройстве распределительной сети во всех случаях одинаковы и относительно ничтожны. Должно быть отмечено также преимущество мелких подстанций в отношении срока строительства и монтажа.

Дробление трансформаторных подстанций выдвигает целесообразность внесения подстанций в цех, особенно в связи с современной тенденцией перекрывать одной крышей значительные производственные площасти. С точки зрения охраны труда подстанция вне цеха имеет бесспорно все преимущества. Однако, опыт многочисленных установок в цехах значительного числа высоковольтных электродвигателей с масляными при них выключателями говорит против каких-либо соображений, ограничивающих размещение подстанций внутри цехов. Можно утверждать, что внесение в цех десятка трансформаторных подстанций создаст для рабочих менее опасные условия, чем, например, повышение рабочего напряжения у мелких двигателей до 500 В.

С точки зрения пожарной безопасности подстанция внутри цеха создает и для строителя и для конструктора электрооборудования более серьезную задачу. Здесь возможно в зависимости от местных условий и такое положение, когда отнесение подстанции к наружным стенам сделается необходимым условием. Однако для большинства случаев совместными усилиями строителя и конструктора электрооборудования задача может быть разрешена вполне удовлетворительно.

Представим, однако, что по разным причинам подстанции должны быть отнесены к наружным стенам. Не следует в таком случае отказываться от дробления подстанции. Экономия металла при отнесении подстанции к наружным стенам падает. Относительная оценка этого падения может быть дана, пользуясь коэффициентом конфигурации дробного участка. Однако экономичность решения, как это установлено расчетами, в целом сохраняется в достаточно широких пределах.

VII. Экономическое число подстанций

Наивыгоднейшее по расходу металла число подстанций еще не является наивыгоднейшим со стороны суммарных годовых расходов. Нахождение ответа на первый вопрос не освобождает от необходимости искать решения второго.

Метод решения задачи по выбору экономического числа подстанций общеизвестен и базируется на установлении функциональной зависимости всех видов затрат от одной переменной (числа подстанций). Не останавливаясь здесь на подробностях этого вопроса, скажем только, что для правильного решения задачи в такой постановке в общем виде необходима проработка ряда самостоятельных проблем конструирования **всех узлов** заводской сети (под-

как со стороны схем, так и со стороны оформления под углом зрения, который обеспечил бы большую либо меньшую закономерность в развитии форм.

В результате многочисленных и тщательных подсчетов, проделанных автором как при выполнении конкретных проектов заводского токораспределения, так и специально в связи с настоящей работой, с беспорочностью было установлено, что представление годовых затрат в виде какой-либо непрерывной функции от числа подстанций при существующей на сегодня неопределенности в области стандартизации узлов, крайне затруднительно. Так, например, при тщательном проектировании одного цеха общей мощностью 2 000 кВА в шести вариантах, пользуясь типами ХЭМЗШ на чугунные пункты и типами ВЭО на подстанции, получены данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Число трансформаторных узлов	Полная стоимость руб.	Годовые расходы руб.	Расход	
			Металла	Меди
1	86 064	18 848	7,2	5,0
2	75 269	17 128	6,7	4,8
3	93 100	19 772	6,7	4,4
4	112 002	21 886	6,5	4,4
6	84 041	18 469	5,3	3,1
8 у стен цеха	75 365	17 469	5,2	2,9
8 внутри цеха	62 150	15 386	4,3	2,3

Как видно из табл. 1, капитальные затраты и ежегодные расходы при большом диапазоне колебания числа подстанций колеблются без всякой закономерности в пределах 20–25%. Закономерность наблюдается только в отношении расхода меди и приведенного металла.

Не располагая в настоящем достаточными данными для решения проблемы экономического числа подстанций на основании проделанной уже работы, представляется возможным формулировать два положения.

1. Экономическое число подстанций может и должно быть выбрано в максимальном приближении к числу, наивыгоднейшему по расходу металла, так как может быть несколько решений почти равнозначных по ежегодным расходам, но различных по расходу металла.

2. Предложенная автором формула наивыгоднейшего по расходу металла числа может быть принята за основу при выборе количества подстанций (в цехах, удовлетворяющих условиям, положенным выше, и должна быть скорректирована при изменении этих условий, пользуясь изложенным выше методом).

Практика рабочего проектирования Новочеркасского паровозостроительного завода полностью подтвердила приведенные теоретические предположения автора в отношении числа подстанций при минимуме металла и одновременно определила величину поправки в формулу (13), необходимой для приближения к экономическому решению, которая для этого случая получилась такой: коэффициент 1,5 снижается до 1,2.

Идея дробления трансформаторных подстанций, находясь в противоречии с современной практикой электрификации промышленных предприятий, как бы находится в логическом противоречии с современной тенденцией роста установленных мощностей. Однако это противоречие кажущееся, так как дробление трансформаторного узла по существу тождественно значительному увеличению сферы распределения энергии, охватываемой непосредственно сетью высокого напряжения, и открывает путь к правильному решению современной задачи питания значительных равномерно распределенных по площадям мощностей.

Кропотливая работа⁸⁾ по пересчету многочисленных вариантов в доказательство рациональности этой идеи начата автором уже несколько лет назад. Затруднительность таких пересчетов и большой консерватизм в вопросах выбора числа подстанций привел автора к необходимости теоретического изучения проблемы к решению задачи в общем виде и в такой форме, которая могла бы обеспечить широкое внедрение этой идеи без необходимости производства всякий раз утомительных подсчетов, а равно разумно направить и ограничить безбрежную область вариирования при выборе числа трансформаторных подстанций.

15 февраля 1934 г.

8) В которой автору оказали помощь инженеры Н. П. Ковалев и В. И. Клетеник.

Упрощенный американский метод расчета токов короткого замыкания¹⁾

Инж. А. Б. Чернин
Теплозаводпроект

Упрощенный американский метод расчета токов короткого замыкания получил на практике весьма большое распространение. Этот метод расчета оказывается пригодным только для определения токов непосредственно в месте к. з., но и в этих случаях результаты расчета получаются недостаточно точными. Однако основное достоинство упрощенного американского метода расчета токов к. з.— исключительная простота расчета—позволяет рекомендовать его для приближенных расчетов.

Таким образом этот метод пригоден для расчетов токов к. з., связанных с перспективным проектированием, например, для выявления параметров заказываемого оборудования для проверки элементов распределительных устройств на устойчивость против токов к. з. и т. п. Пользование этим методом для проектных расчетов вполне допустимо, так как в этом случае исходные данные системы, положенные в основу расчета токов к. з., обычно недостаточно точно известны.

В основу расчета токов к. з. по упрощенному американскому методу положены кривые кратностей токов в месте к. з. для разных моментов времени по отношению к номинальному току всех или отдельных синхронных машин установки. Для пользования этими кривыми требуется лишь определение реактанцев в расчетной схеме, составленной без учета нагрузок. Таким образом расчет производится с минимальной затратой труда.

До последнего времени у нас пользовались кривыми фирмы Westinghouse²⁾. Недавно в американской литературе появилась статья о новых кривых упрощенного расчета токов к. з., утвержденных национальной электрической ассоциацией промышленников. Эта статья содержит также принципы и исходные величины, полу-

ченные в основу построения новых кривых³⁾. При построении этих кривых учтены новейшие достижения в области применения метода симметричных составляющих, а также новейшие представления о процессе к. з. в генераторах и постоянных последних.

Вновь опубликованные кривые безусловно обладают многими преимуществами в сравнении с старыми кривыми фирмы Westinghouse. Однако и новые американские кривые во многом не отвечают параметрам наших машин, а также особенностям нашей практики расчетов токов к. з. В связи с этим нами на основании основных принципов, изложенных в статье инж. Ган и Вагнер, построены новые кривые кратностей тока к. з. с учетом данных о характеристиках союзных машин.

Учитывая широкое распространение упрощенного американского метода, нами разработаны практические способы расчета токов к. з., по этому методу для разных случаев, а также даны некоторые соображения к анализу точности этих расчетов.

Описание построения кривых кратностей тока к. з., а также принципов и точности их применения для разных практических случаев и составляет содержание настоящей работы.

Основные обозначения, принятые в настоящей работе

Φ_s — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения.

Φ_{rs} — магнитный поток рассеяния обмотки возбуждения.

Φ_o — часть магнитного потока, созданного обмоткой статора: $\Phi_o = \Phi_s - \Phi_{rs}$.

Φ_x — магнитный поток реакции якоря.

Φ_{rc} — магнитный поток рассеяния обмотки статора.

X_{pc} и X_{psc} — реактанцы рассеяния обмотки статора в начальный момент и при установленемся к. з.

1) Работа выполнена при участии инж. Лаврова Т. Н. и Орлова Х. И. и консультанта проф. Марголина Н. Ф. В сокращенном виде настоящая работа издана Московским энергетическим институтом в мае 1933 г. Принята Московской подкомиссией ЦЭС по разработке руководящих указаний для расчетов токов к. з. как основной материал к составлению правил производства приближенных расчетов токов к. з.

2) Ган и Вагнер. Стандартные декрементные кривые "Trans of AIEE" № 2, 1932. Реферат см. "Энергетическое обозрение", электротехнический выпуск № 1, 1933.

X_{pb} — реактант рассеяния обмотки возбуждения.
 X_{pup} — реактант рассеяния успокоительных обмоток.
 X_{r_a} — реактант реакции якоря.
 $X_{sinh,p}$ — синхронный реактант, $X_{sinh,p} = X_r + X_{pcy}$.
 X_{2n} — начальный реактант генератора без учета влияния успокоительных обмоток (по американской терминологии *transient reactance*).
 X_{2n} — начальный реактант генератора с учетом влияния успокоительных контуров (по американской терминологии *subtransient reactance*).
 $X_{nag,p}$ — реактант нагрузки.
 X_k — реактант сети от зажимов генератора до места к. з. без учета реактанса нагрузки.
 X_{vn} — внешний реактант, присоединенный к клеммам генератора.
 X_{rac} — расчетный реактант: $X_{rac} = X_{2n} + X_k$.
 X_{sum} — суммарный реактант, представляющий собою реактант короткозамкнутой цепи: $X_{sum} = X_{2n} + X_{vn}$.
 U_{ϕ} и U_m — номинальное фазовое и линейное напряжение.
 U_{kl} — фазовое напряжение на клеммах генератора до наступления к. з. (действительное или приведенное к другой ступени напряжения).
 E_o — э. д. с., создаваемая в статоре магнитным потоком Φ_o .
 E_r — э. д. с., создаваемая в статоре магнитным потоком Φ_r .
 E_{nom} — э. д. с., существующая в статоре до наступления к. з.
 E_y — э. д. с. существующая в статоре при установленном к. з., создаваемая магнитным потоком: $E_y = E_o - E_r$.
 E'_{nac} — э. д. с. начального режима без учета влияния успокоительных контуров.
 E_{nac} — э. д. с. начального режима с учетом влияния успокоительных контуров.
 J и I — общие обозначения для эффективного и мгновенного значений токов, к. з.
 J_{nom} — номинальный ток отдельных элементов.
 J_{nag} — ток нагрузки.
 J_y — установившийся ток к. з.
 J_{nn} — периодическая слагающаяся тока к. з. в начальный момент без учета влияния успокоительных контуров.
 J_{nn} — периодическая слагающаяся тока к. з. в начальный момент с учетом влияния успокоительных контуров.
 J_{bn} — быстрозатухающая периодическая составляющая тока к. з. в начальный момент: $J_{bn} = J_{nn} - J_{yy}$.
 J_{bt} — то же, в момент времени t .
 J_{mn} — медленно затухающая периодическая составляющая тока к. з. в начальный момент: $J_{mn} = J_{yy} - J_y$.
 J_{st} — то же, в момент времени t .
 J_{ot} — эффективное значение полного тока к. з. в момент времени t .
 I_{an} и I_{at} — мгновенное значение апериодической слагающейся тока к. з. в начальный момент и в момент времени t .
 J_2 и J_k — ток, протекающий через генератор (g) или через место к. з. (k).
 $J^{(3)}, J^{(2)}, J^{(1)}, J^{(11)}$ — токи трехполюсного к. з., двух полюсного к. з., однополюсного к. з. и двойного замыкания на землю в одной точке соответственно.
 m — кратность тока к. з. по отношению к номинальному.
 T_b — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой цепи статора.
 T_n и T_b — постоянная времени медленно затухающей и быстро затухающей периодической составляющей тока к. з.
 T_a — постоянная времени апериодической слагающейся тока к. з.

1. Схематическое рассмотрение явлений в синхронной машине при коротком замыкании

Для вывода соотношений, положенных в основу построения кривых кратностей тока, необходимо схематически остановиться на явлениях, имеющих место в синхронной машине при к. з. Для упрощения изложения будем иметь в виду только случай трехполюсного к. з., так как явления в синхронной машине при несимметричном к. з., как будет показано в дальнейшем, могут быть ана-

логичными явлениям в трехполюсном к. з. Синхронная машина представляет собой магнитосвязанные электрические системы: систему обмоток статора, неподвижных в пространстве, и систему обмоток ротора вращающихся с некоторой постоянной угловой скоростью (синхронной скоростью) относительно статора. То обстоятельство, что обмотки синхронной машины подвижны друг по отношению к другу, определяет различие в распределении потоков синхронной машины при к. з. в сравнении с неподвижным трансформатором.

Рассмотрим сначала потоки синхронной машины при холостом ходе и установленном нагруженном режиме (последний режим, в частности, соответствует установленному к. з.). При холостом ходе работы синхронной машины, поток Φ_o , создаваемый обмоткой возбуждения, состоит из потока рассеяния обмотки возбуждения Φ_{pb} и потока Φ_o , скрывающегося с обмоткой статора и индуцирующего в нем э. д. с. E_o . Ось этого потока обычно называется продольной осью.

При установленном режиме протекания токов через статорную обмотку в синхронной машине появляются дополнительные магнитные потоки. Примем сначала, что через статор протекают только индуктивные токи. Последние помимо потока рассеяния статора Φ_{pc} (рис. 1) вызывают также вращающийся поток Φ_r , так называемый поток реакции якоря, скрывающийся с ротором и направленный противоположно потоку обмотки возбуждения Φ_o .

Это ясно из рис. 1. Действительно, поскольку мы предполагаем в статорной обмотке только индуктивный ток, то при положении ротора согласно рис. 1 ток в обмотке статора будет иметь макси-

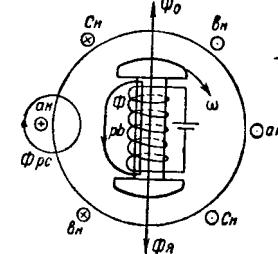


Рис. 1. Схема магнитных потоков в синхронной машине при индуктивной нагрузке и при установленном режиме

мальное значение в фазе a . Но из теории трехфазного вращающегося потока известно, что в момент, когда ток данной фазы проходит через максимум, результирующий вращающийся поток совпадает по направлению с собственным потоком рассматриваемой фазы. Таким образом поток Φ_r направлен по оси потока Φ_o , но в противоположную сторону.

В случае нормальной нагрузки с $\cos \varphi = 0,8$ ось потока реакции якоря Φ_r сдвинута по отношению к продольной оси потока Φ_o . Разлагая в данном случае поток Φ_r по продольной оси и перпендикулярной к ней оси, обычно называемой поперечной осью, можем выделить составляющую потока Φ_{rp} по продольной оси. На практике в приближенных расчетах токов к. з. обычно пренебрегают омическими составляющими импедансов в виду малого влияния их, поэтому ограничимся данным выше рассмотрением потоков синхронной машины при чисто индуктивной нагрузке по продольной оси и не будем здесь рассматривать потоков синхронной машины по поперечной оси.

Так как поток реакции якоря Φ_r не имеет перемещения относительно ротора и не индуцирует никаких токов в ее обмотках, то независимо от величины тока в статоре поток рассеяния обмотки возбуждения Φ_{pb} при установленном режиме остается постоянным (лишь бы оставался постоянным ток в обмотке возбуждения), а следовательно, поток Φ_{pb} можно не вводить в расчет токов установленного режима статора.

При этом возможны два способа определения тока установленного режима индуктивной симметричной нагрузки (например, тока установленного к. з.): 1) в зависимости от того, учитывают ли мы влияние потока реакции якоря Φ_r той э. д. с. E_r , которую он индуцирует в обмотке статора, или 2) падением напряжения от тока J_y в реактанце X_r , соответствующем потоку реакции якоря.

В первом случае вводят в расчет э. д. с. E_y , соответствующую результирующему потоку в воздушном зазоре $\Phi_y = \Phi_o - \Phi_r$, и которая равна сумме напряжения на клеммах генератора и падения напряжения в реактанце рассеяния статора X_{pcy} . Таким образом определяется ток установленного к. з. согласно построению Рюденберга. Во втором случае вводят в расчет э. д. с. E_o , которая индуцируется потоком Φ_o в статоре, а реакцию якоря учитывают падением напряжения. В этом случае расчетная формула индуктивного тока установленного режима

$$J_y = \frac{E_o}{X_{pcy} + X_r + X_{vn}}, \quad (1)$$

где X_{vn} — реактант внешней сети. Обычно сумму реактанцев X_r и X_{pcy} называют синхронным реактанцем.

$$X_{sinh,p} = X_r + X_{pcy}. \quad (2)$$

Выражение (1) может быть представлено эквивалентной схемой рис. 2.

Таким образом ясно, что для определения тока установленного режима

Совсем иначе обстоит дело при внезапном к. з. Будем сначала для простоты предполагать, что ротор не имеет успокоительных обмоток и массивных полюсных башмаков.

При к. з. в синхронной машине должен установиться значительно меньший поток в зазоре, чем тот, который имелся до наступления к. з. Это обусловливается увеличенной реакцией якоря при установленвшемся к. з. из-за превышения этого тока над реактивной составляющей тока, который протекал в машине до наступления к. з. Таким образом при к. з. должно измениться потокосцепление статора и ротора. Но в виду электромагнитной инерции потокосцепление не может измениться мгновенно. Поэтому появится свободный поток, который будет стремиться поддерживать прежнее потокосцепление статора и ротора. Этот свободный поток индуцирует в статоре и в обмотке возбуждения затухающие токи постоянного знака, как это имеет место при изменении потока в силовом трансформаторе. Но так как в случае синхронной машины обмотки статора и ротора подвижны одна по отношению к другой, то постоянный затухающий ток в обмотке возбуждения вызывает э. д. с. нормальной частоты в статоре; точно так же постоянный затухающий ток в статоре вызывает в роторе э. д. с. нормальной частоты. Таким образом при внезапном к. з. и в статоре и в роторе помимо тока к. з. установленвшегося режима, соответствующего конечному состоянию синхронной машины, имеют место свободные затухающие слагающиеся переменного тока.

Практически в большинстве случаев интересуются токами к. з. в цепи статора. Для их определения достаточно знать периодическую слагающую тока к. з. начального режима, протекающую через статор, так как знание этой слагающей позволяет определить и апериодическую слагающую тока к. з. статора.

Определение периодической слагающей тока начального режима к. з., протекающего через статор, обычно производится, исходя, из эквивалентной схемы, которая может быть получена на основании следующих соображений:

Наличие при переходном режиме к. з. общих потоков, индуцирующих токи в статорной обмотке и в обмотке возбуждения, позволяет рассматривать синхронную машину как трансформатор, в котором одна из обмоток приведена к обмоточным данным и частоте другой обмотки, например, обмотка возбуждения приведена к обмоточным данным и частоте статорной обмотки.

Для определения периодической слагающей тока в статоре к соответствующей ей апериодической слагающей в обмотке возбуждения в начальный момент к. з. можно составить эквивалентную схему (для случая к. з. на клеммах, рис. 3), в которой инициативной обмоткой является обмотка возбуждения аналогично схеме замещения трансформатора. Фиктивная э. д. с., которая должна быть введена в расчет в эквивалентной схеме (рис. 3), определяется из условия постоянства потокосцепления обмотки возбуждения, имевшего место до наступления к. з. Следовательно, эта э. д. с. будет постоянной величиной независимо от удаленности к. з. и соответствует напряжению на клеммах $U_{\text{кл}}$, которым генератор работал до наступления к. з. Постоянство этой э. д. с. представляет большие удобства для практических расчетов.

Точно так же для определения апериодической слагающей тока в статорной обмотке и соответствующей ей периодической слагающей тока в обмотке возбуждения в начальный момент к. з. можно воспользоваться эквивалентной схемой, аналогичной эквивалентной схеме трансформатора, но инициативной обмоткой в этой схеме будет статорная обмотка.

Таким образом для начального момента к. з. эквивалентная схема синхронного генератора соответствует эквивалентной схеме силового трансформатора с постоянным напряжением на инициативной обмотке.

Следует здесь отметить, что и при установленвшемся режиме генератор можно представить эквивалентной схемой, в которой инициативной обмоткой является обмотка возбуждения аналогично схеме рис. 3. Однако, инициативная обмотка в этом случае характеризуется не постоянством расчетной э. д. с., а постоянством тока (т. е. тока возбуждения). Таким образом эквивалентная схема генератора при установленвшемся режиме аналогична эквивалентной схеме трансформатора тока. В виду того что такая эквивалентная схема не совсем удобна для практических расчетов, обычно пользуются другими способами определения тока установленвшегося режима, как уже отмечено выше.

Рассмотрим подробнее определение периодической слагающей тока в статорной обмотке при к. з. на клеммах генератора согласно схеме рис. 3. Последнюю преобразуем так, чтобы получить возможность непосредственно определить периодическую слагающую $J_{\text{пп}}$. Для этого воспользуемся методом Шицлайна. Последний заключа-

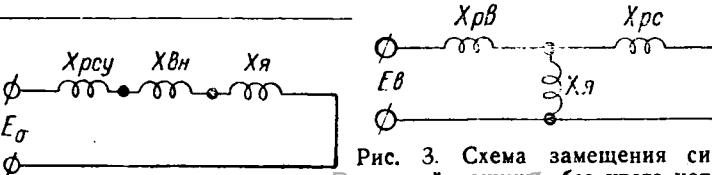
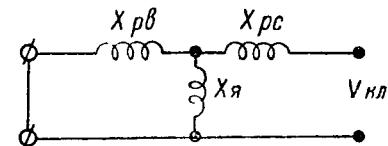


Рис. 2. Схема замещения для координатных контуров для началь-

ного момента времени к. з. на клеммах

Шицлайна



ется в том, что действительные токи, протекающие при к. з., могут быть получены как результат положения нагрузочных токов, имеющих место до наступления повреждения, на аварийные токи к. з. Последние получаются, если предположить э. д. с. генераторов отсутствующими, а в месте к. з. приложить э. д. с., равную и противоположную тому напряжению, которое имелось в месте к. з. до наступления к. з.⁴⁾.

Если рассматриваемая нами синхронная машина без успокоительных обмоток была на холостом ходу, то ток в месте к. з. целиком равен аварийному току, определяемому по методу Шицлайна согласно схеме рис. 4. При напряжении на клеммах генератора до наступления к. з. $U_{\text{кл}}$ ток к. з. равен

$$J_{\text{пп}} = \frac{U_{\text{кл}}}{j X_{\text{пп}}} \quad (3)$$

Здесь $X_{\text{пп}}$ означает эквивалентный реактор схемы рис. 4, который назовем начальным реактором машины без учета успокоительных обмоток (по американской терминологии transient reactance).

Если синхронная машина до наступления к. з. имела нагрузку $J_{\text{наг}}$, то в соответствии с методом Шицлайна помимо тока согласно выражению (3) в месте к. з. будет еще протекать ток нагрузки $J_{\text{наг}}$. Таким образом в данном случае

$$J_{\text{пп}}' = \frac{U_{\text{кл}}}{j X_{\text{пп}}} + J_{\text{наг}} = \frac{U_{\text{кл}} + j J_{\text{наг}} X_{\text{пп}}}{j X_{\text{пп}}} = \frac{E_{\text{нач}}}{j X_{\text{пп}}} \quad (4)$$

т. е. в случае к. з. на клеммах нагруженного генератора ток начального режима определяется путем введения в расчет э. д. с.

$$E_{\text{нач}} = U_{\text{кл}} + j J_{\text{наг}} X_{\text{пп}} \quad (5)$$

Электродвижущую силу $E_{\text{нач}}$ будем называть э. д. с. начального режима без учета влияния успокоительных обмоток. Как видно из рис. 4, эта э. д. с. третится на проведение тока к. з. через реактор суммарного рассеяния синхронной машины. Таким образом в отличие от установленвшегося режима для подсчета тока начального режима учитывают реактор рассеяния обмотки возбуждения X_{pp} , входящего в расчетную схему рис. 4.

Если к. з. случилось не на клеммах генератора, а во внешней цепи, то в общем процесс в синхронной машине остается таким же, как в случае к. з. на клеммах машины. Для определения периодической слагающей тока к. з. в данном случае надлежит в схему рис. 4 последовательно с реактором рассеяния статора X_{pc} включить реактор внешней сети $X_{\text{вн}}$. Что касается э. д. с. начального режима $E_{\text{нач}}$, т. е. таковая при данном напряжении на клеммах генератора $U_{\text{кл}}$, будет такой же, как и при к. з. на клеммах генератора. Это объясняется тем, что э. д. с. $E_{\text{нач}}$, как отмечено выше, определяется постоянством потокосцепления обмотки возбуждения, соответствующим данному напряжению на клеммах генератора.

Таким образом в общем случае расчетная формула для периодической слагающей тока статора в начальный момент к. з. по абсолютной величине при пренебрежении влиянием успокоительных обмоток напишется так:

$$J_{\text{пп}} = \frac{E_{\text{нач}}}{X_{\text{пп}} + X_{\text{вн}}} \quad (6)$$

Схемы рис. 3 и 4 и выражения (3), (4), (5) и (6) даны для синхронных машин без успокоительных обмоток на роторе⁵⁾. Однако после изложенного выше легко составить эквивалентную схему синхронной машины с успокоительными обмотками. Действительно

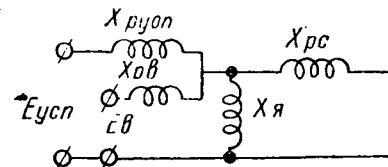
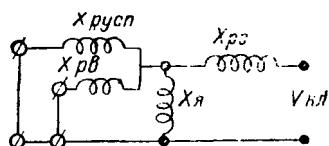


Рис. 5. Схема замещения синхронной машины с учетом успокоительных контуров для начального момента времени к. з. на клеммах

в данном случае изменение регулирующего потока при внезапном к. з. вызовет в успокоительной обмотке ротора токи, аналогичные токам в обмотке возбуждения. Поэтому для данного случая при к. з. на клеммах генератора вместо эквивалентной схемы, идентичной схеме двухобмоточного трансформатора рис. 3, получим эквивалентную схему, идентичную схеме трехобмоточного трансформатора, в которой к обмоткам ротора приложены э. д. с. E_b и $E_{\text{усп}}$, а к. з.—на стороне статорной обмотки, как это показано на рис. 5 (где $X_{\text{рису}}$ —реактор рассеяния успокоительных обмоток). Используя метод Шицлайна, можно аналогично предыдущему составить схему рис. 6, дающую возможность непосредственно определить периодическую слагающую в месте к. з. в схеме с синхронными машинами, имеющими успокоительные обмотки, при к. з. на клеммах машины:

$$J_{\text{пп}} = \frac{U_{\text{кл}}}{j X_{\text{пп}}} + J_{\text{наг}} = \frac{U_{\text{кл}} + j J_{\text{наг}} X_{\text{пп}}}{j X_{\text{пп}}} = \frac{E_{\text{нач}}}{j X_{\text{пп}}} \quad (7)$$

Рис. 6. Схема рис. 5 для определения аварийной составляющей токов к. з. по методу Шицлена



Таким образом в случае генератора с успокоительными обмотками для расчета периодической слагающей токи в статоре при начальном режиме к. з. надлежит принять э. д. с.

$$E_{\text{нач}} = U_{\text{кл}} + jT_{\text{нагр}} X_{\text{гн}}, \quad (8)$$

которую назовем э. д. с. начального режима с учетом успокоительных обмоток, и реактанц генератора $X_{\text{гн}}$ назовем начальным реактанцем генератора с учетом влияния успокоительных обмоток (по американской терминологии *subtransient reactance*). Выражение (7) соответствует случаю к. з. на клеммах синхронной машины с успокоительными обмотками. Для случая к. з. в сети выражение (7) перепишется следующим образом:

$$J_{\text{мн}} = \frac{E_{\text{нач}}}{X_{\text{гн}} + X_{\text{вн}}} \quad (9)$$

(по абсолютному значению). То, что величина $E_{\text{нач}}$ в формуле (9) та же, что и в формуле (7), объясняется постоянством потокосцепления обмотки возбуждения и успокоительных контуров (в первый момент к. з.), соответствующего данному напряжению на клеммах генератора $U_{\text{кл}}$.

Из изложенного выше ясно, что успокоительные обмотки увеличивают свободную периодическую слагающую тока к. з. в статоре.

Ввиду различия постоянных времени успокоительных обмоток ротора и обмотки возбуждения обычно различают быстро затухающие свободные токи статора, вызванные, главным образом, успокоительными обмотками от медленно затухающих свободных токов, вызванными, главным образом, обмоткой возбуждения.

Таким образом периодическую слагающую трехполюсного тока к. з. для любого момента времени можно представить, в свою очередь, состоящей из трех составляющих:

а) Установившийся ток к. з.

б) Медленно затухающая составляющая периодического тока, обусловленная, главным образом, обмоткой возбуждения. В начальный момент к. з. эта составляющая

$$J_{\text{мн}} = J'_{\text{пп}} - J_y. \quad (10)$$

Эта составляющая затухает примерно по экспоненциальному закону, а потому для последующих моментов времени эта составляющая равна:

$$J_{\text{мн}} = J'_{\text{пп}} e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (11)$$

где T_m —постоянная времени затухания этой составляющей.

в) Быстро затухающая составляющая периодического тока, обусловленная, главным образом, успокоительными обмотками. В начальный момент к. з. эта составляющая равна

$$j_{\text{б}} = J'_{\text{пп}} - J_{\text{пп}}. \quad (12)$$

Эта составляющая затухает примерно по экспоненциальному закону, а потому для последующих моментов времени эта составляющая равна:

$$j_{\text{б}} = J_{\text{б}} e^{-\frac{t}{T_b}}, \quad (13)$$

где T_b —постоянная времени потухания этой составляющей.

Более медленное затухание составляющей „б“ в сравнении с составляющей „в“ объясняется большим отношением индуктивного сопротивления к омическому у обмотки возбуждения, чем у успокоительной обмотки.

Таким образом периодическая слагающая тока к. з. для любого момента времени может быть написана в следующем виде:

$$J_{\text{пт}} = J_{\text{б}} + J_{\text{мн}} + J_y = J_{\text{б}} e^{-\frac{t}{T_b}} + J_{\text{мн}} e^{-\frac{t}{T_m}} + J_y, \quad (14)$$

так как $J_{\text{б}} = J_{\text{пп}} - J'_{\text{пп}}$, а $J_{\text{мн}} = J'_{\text{пп}} - J_y$,

$$\text{то } J_{\text{пт}} = (J_{\text{пп}} - J'_{\text{пп}}) e^{-\frac{t}{T_b}} + (J'_{\text{пп}} - J_y) e^{-\frac{t}{T_m}} + J_y. \quad (15)$$

Графическое изображение изменения эффективного значения периодической слагающей дано на рис. 7.

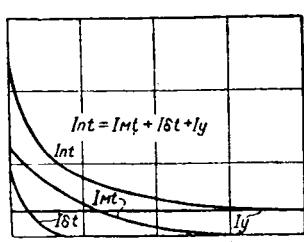


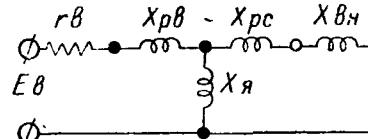
Рис. 7. Эффективное значение составляющих периодической слагающей токов к. з. в зависимости от времени t

Постоянная времени медленно затухающей периодической составляющей вычисляется по формуле

$$T_m = T_a \frac{X'_{\text{гн}} + X_{\text{вн}}}{X_{\text{синхр}} + X_{\text{вн}}}. \quad (16)$$

Здесь T_a —постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой цепи статора, $X'_{\text{гн}}$ —начальный реактанц генератора без учета влияния успокоительных контуров; $X_{\text{синхр}}$ —синхронный реактанц генератора; $X_{\text{вн}}$ —реактанц внешней цепи. Постоянная времени T_m определяется на основании эквивалентной схемы, соответствующей медленно затухающей периодической составляющей тока к. з. Эта схема для случая к. з. на клеммах генератора дана на рис. 3. Для более общего случая к. з. в сети в схеме рис. 3 надлежит учесть реактанц внешней сети, присоединенный последовательно с реактанцем X_{pc} , как показано на рис. 8.

Рис. 8. Схема замещения синхронной машины без учета успокоительных контуров для начального момента времени к. з. во внешней сети



Постоянная времени экспоненциальной кривой определяется, как известно, отношением индуктивности к омическому сопротивлению контура, по которому протекает затухающий ток. В качестве индуктивности надлежит в данном случае исходить из индуктивности схемы рис. 8. Что же касается омического сопротивления, то приближенно можно учитывать в данном случае только омическое сопротивление обмотки возбуждения. Это объясняется тем, что поток, соответствующий медленно затухающей периодической составляющей тока к. з., неподвижный относительно ротора, сцепляется, главным образом, с обмоткой возбуждения; поэтому при затухании этот магнитный поток отдает свою магнитную энергию в виде тепла Джауля, главным образом, активному сопротивлению обмотки возбуждения.

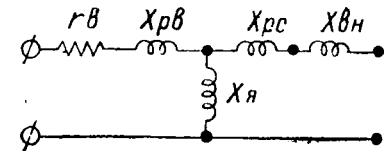
Таким образом постоянная времени медленно затухающей периодической составляющей тока к. з. T_m может быть определена следующим образом:

$$T_m = \frac{X_{\text{б}}}{\omega \cdot r_a}, \quad (17)$$

где $X_{\text{б}}$ —эквивалентный реактанц схемы рис. 8, а r_a —активное сопротивление обмотки возбуждения. Эквивалентный реактанц схемы рис. 8 равен

$$\begin{aligned} X_{\text{б}} &= X_{\text{pb}} + \frac{(X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}}) X_{\text{я}}}{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}} = \\ &= \frac{X_{\text{pb}} (X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}) + (X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}}) X_{\text{я}}}{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}} = \\ &= \frac{(X_{\text{pb}} + X_{\text{я}}) (X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}}) + X_{\text{pb}} X_{\text{я}}}{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}} = \\ &= \frac{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + \frac{X_{\text{pb}} X_{\text{я}}}{X_{\text{pb}} + X_{\text{я}}}}{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Рис. 9. Схема замещения синхронной машины без учета успокоительных контуров для начального момента времени к. з. в бесконечно удаленной точке, т. е. при разомкнутой цепи статора



Постоянная времени

$$T_m = \frac{X_{\text{б}}}{\omega \cdot r_a} = \frac{X_{\text{pb}} + X_{\text{я}}}{\omega \cdot r_a} \cdot \frac{X_{\text{pc}} + \frac{X_{\text{pb}} X_{\text{я}}}{X_{\text{pb}} + X_{\text{я}}} + X_{\text{вн}}}{X_{\text{pc}} + X_{\text{вн}} + X_{\text{я}}}. \quad (19)$$

Для упрощения выражения (19) отметим, что член $\frac{X_{\text{pb}} X_{\text{я}}}{\omega \cdot r_a}$ представляет собою постоянную времени затухания нестационарного тока в обмотке возбуждения при разомкнутой цепи статора. Действительно, при разомкнутой цепи статора схема рис. 8 может быть представлена схемой рис. 9, а постоянная времени для контура рис. 9 равна

$$T_a = \frac{X_{\text{pb}} + X_{\text{я}}}{\omega \cdot r_a}. \quad (20)$$

Постоянная времени T_a называется постоянной времени обмотки возбуждения при разомкнутой цепи статора.

Далее, легко выяснить что

$$X_{\text{pc}} + X_{\text{я}} = X_{\text{синхр}}$$

Последнее вытекает из рассмотрения схемы рис. 4.

Учтыв отмеченные выше соотношения, получим окончательное выражение:

$$T_m = T_s \frac{X_{2H} + X_{BH}}{X_{2H} + X_{BH} + X_{нагр}}. \quad (22)$$

Для быстрозатухающей составляющей берется постоянная времени

$$T_6 = \frac{1}{8} T_m. \quad (23)$$

Что касается апериодической слагающей тока к. з. I_{at} , то для начального момента к. з. эта слагающая (I_{an}) может быть определена по известной периодической слагающей I_{ph}

$$I_{an} = I_{ph} - I_{нагр}, \quad (24)$$

где I_{ph} — мгновенное значение периодической слагающей в начальный момент, а $I_{нагр}$ — мгновенное значение тока нагрузки до наступления к. з. Апериодическая слагающая тока к. з. затухает по экспоненциальному закону и для переходных моментов времени может быть вычислена согласно выражению

$$I_{at} = I_{an} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (25)$$

где T_a — постоянная времени затухания апериодической слагающей. Постоянная времени T_a вычисляется по выражению⁷⁾

$$T_a = \frac{X_2 + X_{BH}}{\omega(r_c + r_{BH})}, \quad (26)$$

где X_2 — реактор отрицательной последовательности генератора; X_{BH} — реактор внешней цепи; r_c — активное сопротивление обмотки статора; r_{BH} — активное сопротивление внешней цепи. Постоянная времени T_a затухания апериодической слагающей определяется как

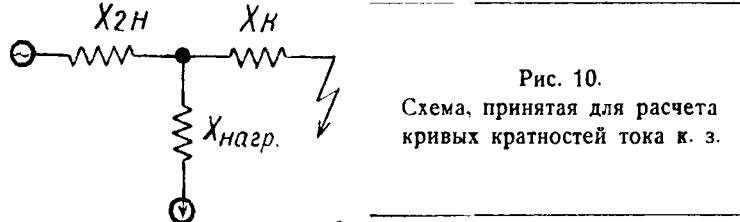


Рис. 10.

Схема, принятая для расчета кривых кратностей тока к. з.

отношение индуктивности к омическому сопротивлению эквивалентной схемы, по которой вычисляется апериодическая слагающая тока к. з. статорной обмотки. Последняя в общем случае к. з. аналогочна схеме рис. 6, если последовательно с реактором рассеяния X_{re} (рис. 6) включить реактор внешней сети X_{BH} .

Аналогично случаю постоянной времени T_m омическое сопротивление, которое надлежит ввести в выражение (26) для T_a , приближенно определяется на основании того положения, что поток, соответствующий апериодической слагающей тока в статоре, почти совершенно не сцепляется с обмотками ротора, и что этот поток при затухании отдает свою магнитную энергию в виде тепла Джоуля, главным образом, активному сопротивлению статора и внешней сети. Таким образом для определения T_a вводят в расчет $r_c + r_{BH}$. Что же касается индуктивности, то таковая определяется на основании реактора рис. 6, последовательно сложенного с реактором X_{BH} . Однако следует учесть то обстоятельство, что аналогично потоку отрицательной последовательности поток, соответствующий апериодической слагающей тока в статоре, вращается относительно ротора. В виду различия проводимости магнитопровода машины по продольной и поперечной осям реактор генератора в данном случае отличен от реактора X_{2H} и равен реактору генератора в отрицательной последовательности X_2 . Этим и обясняется то обстоятельство что в числителе выражения (26) вводят не сумму $X_{2H} + X_{BH}$, а сумму $X_2 + X_{BH}$.

Знание периодической и апериодической слагающих позволяет вычислить и полный ток к. з.

Мгновенное значение полного тока для данного момента времени равно

$$I_{ot} = I_{ph} \pm I_{at}. \quad (27)$$

Знаки плюс и минус берутся согласно осцилограмме протекания тока к. з. во времени. В частности, для $t = 0,01$ сек.

$$I_{ot} = 0,01 = I_{ph} = I_{ph} = 0,01 + I_{at} = 0,01. \quad (28)$$

Эффективное значение полного тока вычисляется на основании общего выражения для эффективного значения несинусоидальной кривой через эффективные значения отдельных синусоидальных составляющих⁸⁾.

В нашем случае получим

$$I_{ot} = \sqrt{I_{ph}^2 + I_{at}^2}. \quad (29)$$

Здесь апериодическая слагающая I_{at} соответствует синусоидальной кривой с периодом, равным бесконечности.

Приведенные выше положения о явлениях в генераторах должны облегчить понимание построения кривых кратностей тока к. з.

2. Построение кривых кратностей токов короткого замыкания

а) Основные положения

Как отмечено выше, расчеты токов к. з. по упрощенному американскому методу базируются на кривых токов в месте к. з. Эти кривые строятся для схемы, состоящей из генератора, нагрузки, присоединенной к клеммам генератора, и переменного реактора, прилегающего к месту к. з., по которому нормально токи не текут (рис. 10).

Для того чтобы эти кривые были удобны для применения при любой мощности генераторов, будем выражать токи в относительных величинах — именно в кратностях по отношению к номинальному току генератора (рис. 10)

$$m = \frac{J}{J_{ном}}. \quad (30)$$

Как известно, эта кратность определяется по формуле

$$m = \frac{e\%}{X\%}. \quad (31)$$

где $e\%$ — э. д. с. в процентах:

$$e\% = \frac{E}{U_{фаз}} \cdot 100\%, \quad (32)$$

а $X\%$ — реактор в процентах:

$$\cdot X\% = \frac{J_{ном}}{U_{фаз}} \cdot 100\%. \quad (33)$$

Таким образом, выражая э. д. с. и реакторы схемы рис. 10 в процентах, легко определить кратности токов короткого замыкания согласно выражению (32).

Отметим основные положения, принятые нами для построения кривых:

1. При построении кривых кратностей токов к. з. мы исходили из средних данных для турбогенераторов как наиболее распространенных типов синхронных машин.

2. Кривые построены для случая работы генераторов до наступления короткого замыкания с номинальным током, с $\cos \phi = 0,8$ и напряжением на 5% выше номинального, так как из этих условий обычно исходят при расчете токов к. з. для выбора аппаратуры. Однако для того чтобы иметь возможность рассчитывать токи к. з. и для других исходных условий, даны также таблицы кратностей токов к. з. для случаев работы генераторов с половиной нагрузкой и при холостом ходе.

3. Ввиду трудности учета влияния автоматических регуляторов токов при построении кривых кратностей тока к. з. предполагаются отсутствующими.

4. Американские кривые, данные инж. Ган и Вагнер⁹⁾, построены для эффективного значения полного тока к. з. Однако практически удобнее иметь кривые для периодической слагающей тока к. з. Для этой слагающей нами и построены кривые. Полные токи к. з. определяются по уравнениям (27) — (29).

5. Кратности периодической слагающей тока к. з. в схеме рис. 10 для общего случая вычисляются на основании выражения (15), если вместо действительных токов принимаем кратности их по отношению к номинальному току:

$$m_{at} = (m_{ph} - m_{ph}') e^{-\frac{t}{T_6}} + (m_{ph}' - m_y) e^{-\frac{t}{T_m}} + m_y. \quad (34)$$

При этом непосредственно вычислялись кратности токов, протекающих через генератор схемы рис. 10. Необходимые для построения кривых кратности токов в месте к. з. вычислялись на основании распределения токов в схеме рис. 10.

6. Одним из достоинств американского упрощенного метода является то, что при применении его для расчетов реальных сетей в последних нагрузки не должны учитываться.

Для достижения этого положения в качестве основного параметра кривых кратностей тока к. з. принимаем эквивалентный реактор без учета нагрузок схемы рис. 10 для начального режима, который в дальнейшем называется расчетным реактором:

$$X_{расч} = X_{2H} + X_K, \quad (35)$$

где X_K — реактор, прилегающий к месту к. з. в схеме рис. 10.

Для определения реактора $X_{расч}$ в реальной системе расчетная схема последней не должна содержать нагрузок. Однако токи к. з., полученные для данной системы по кривым кратностей токов к. з., соответствуют случаю учета нагрузок, присоединенных к месту к. з.

⁹⁾ «Энергетическое обозрение», электротехнический выпуск, № 1

диненных к клеммам генератора. Таким образом американский упрощенный метод расчета токов к. з. позволяет автоматически учитывать нагрузки (т. е. не вводя в расчетную схему реактанцев нагрузки), что крайне упрощает расчет.

Кривые, данные в статье инж. Ган и Вагнера¹⁰, построены для расчетного реактанца $X_{расч}$ только до 100%. Однако практически этот реактанец весьма часто получается большим 100%. Поэтому нами кривые кратностей токов к. з. построены для $X_{расч} = 12 \div 100\%$. При значении $X_{расч} > 1000\%$ можно принять ток к. з. неизменным.

9. При построении кривых кратностей тока к. з. предполагается, что нагрузка в схеме рис. 10 представляет собою постоянное сопротивление, и не учитываются переходные явления в асинхронных двигателях в начальные периоды к. з.

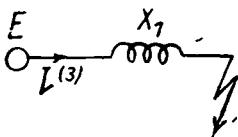


Рис. 11.
Для трехполюсного к. з.

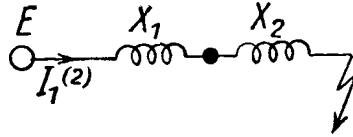


Рис. 12.
Для двухполюсного к. з.

Рис. 11, 12, 13, 14. Схема для определения продолжительной последовательности токов к. з. при расчете без учета нагрузки

8. Отметим, что кривые кратностей токов к. з. составлены только для трехполюсного к. з. Однако эти же кривые могут быть использованы для определения токов положительной последовательности любого несимметричного к. з., если исходить из указания Эванса и Вагнера об определении токов положительной последовательности в общем случае. Согласно этому указанию токи положительной последовательности несимметричного к. з. для любого момента времени тождественны с таковыми же для случая трехполюсного к. з., лежащего на ответвлении от действительного места к. з. и удаленного от последнего на реактанц X_{ab} , равный:

$$\begin{aligned} \text{для двухполюсного к. з. } X_{ab} &= X_{32}, \\ \text{“ однополюсного к. з. } X_{ab} &= X_{32} + X_{30}, \\ \text{для двухполюсного к. з. } X_{ab} &= \frac{X_{32} \cdot X_{30}}{X_{32} + X_{30}}. \end{aligned}$$

где X_{32} и X_{30} — эквивалентные реактанцы отрицательной и нулевой последовательности.

Ограничимся доказательством этого положения для случая, когда расчет ведется без учета нагрузок. Формулы для токов положительной последовательности в этом случае:

$$J_1^{(3)} = \frac{E}{X_{31}}, \quad (36)$$

$$J_1^{(2)} = \frac{E}{X_{31} + X_{32}}, \quad (37)$$

$$J_1^{(1)} = \frac{E}{X_{31} + X_{32} + X_{30}}, \quad (38)$$

$$J_1^{(11)} = \frac{E}{X_{31} + \frac{X_{32} \cdot X_{30}}{X_{32} + X_{30}}}, \quad (39)$$

Для трехполюсного к. з. составляющая положительной последовательности равна полному току к. з.

Выражения (36), (37), (38) и (39) верны для любого момента времени, причем E означает э. д. с. генератора, которая представлена собою э. д. с. положительной последовательности. Выражения (36), (37), (38) и (39) могут быть представлены в виде эквивалентных схем (рис. 11, 12, 13 и 14). Схемы рис. 11, 12, 13 и 14 ясно показывают правильность положения Эванса и Вагнера для случая, когда нагрузки не учитываются, а именно: для этого следует рассчитать токи трехполюсного к. з. в этих схемах. Ток трехполюсного к. з., рассчитанный по схеме рис. 11, будет являться полным током трехполюсного же к. з. в действительной схеме. Ток трехполюсного к. з., рассчитанный по схеме рис. 12, будет составляющей положительной последовательности тока двухполюсного к. з. в действительной схеме; точно также ток трехполюсного к. з., рассчитанный по схеме рис. 13 и 14, будет составляющей положительной последовательности тока однополюсного к. з. и двухполюсного к. з. на землю в одной точке действительной схемы.

Точно так же можно доказать правильность положения Эванса и Вагнера и для случая учета нагрузок, однако здесь мы этого доказательства не приводим.

Таким образом при несимметричном к. з. результирующие э. д. с. положительной последовательности генераторов в каждый данный момент целиком тратятся на проведение токов положительной последовательности в схемах рис. 12, 13 и 14, составленных согласно указанию Эванса и Вагнера аналогично тому, как в случае трехполюсного к. з. э. д. с. положительной последовательности целиком тратятся на проведение действительных токов в схеме рис. 11.

Из этого следует, что изменение результирующих э. д. с. положи-

тельной последовательности во времени, а следовательно, и загущение токов положительной последовательности при несимметричном к. з. целиком определяется постоянными схемами, составленной для несимметричного режима согласно указанию Эванса и Вагнера (например, по рис. 12, 13 и 14) аналогично тому, как для трехполюсного к. з. постоянные действительной схемы (рис. 11) определяют загущение действительных токов трехполюсного к. з.

На основании этого для случая двух- и однополюсного к. з., а также двухполюсного к. з. на землю в одной точке можно воспользоваться теми же кривыми кратностей токов к. з., что и для трехполюсного к. з., только расчетные реактанцы $X_{расч}$ должны быть подсчитаны для схемы положительной последовательности, в которой предполагается к. з. в точке, отдаленной от действительного места к. з. на реактанц X_{ab} , определяющийся согласно выше-

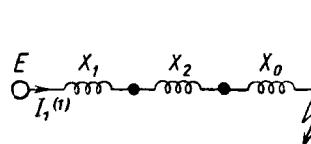


Рис. 13.
Для однополюсного к. з.

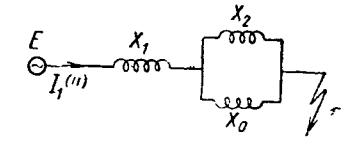


Рис. 14. Для двухполюсного замыкания на землю в одной точке
при расчете без учета нагрузки

изложенному. Для определения X_{ab} в расчетной схеме отрицательной последовательности нагрузки не учитываются аналогично расчетной схеме положительной последовательности. На основании известных токов положительной последовательности легко определяются полные токи несимметричного к. з., если воспользоваться основными принципами метода симметричных составляющих.

Перейдем к рассмотрению определения отдельных величин, необходимых для построения кривых кратностей токов к. з.

б) Определение кратности установившегося тока короткого замыкания m_x

Установившийся ток к. з. генератора наиболее точно определяется графическим построением Рюденберга. Этим построением определялись кратности установившихся токов к. з. по отношению к нормальному, необходимые для построения кривых кратностей токов к. з. [см. выражение (34)]. Для графического построения Рюденберга необходимы следующие данные:

1. Характеристика холостого хода. Исходя из указаний инж. Лютера и Алексеева¹¹, что характеристики холостого хода мощных турбо- и гидрогенераторов, строящихся в Союзе, достаточно близко подходят к нормальным характеристикам по германским данным, для нахождения кратностей установившихся токов к. з. нами принята нормальная характеристика холостого хода, даваемая немецкими нормами согласно следующей таблицы:

Относительный ток возбуждения . . .	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
Относительное напряжение	0,0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51

2. Реактанц рассеяния статора для построения треугольника Потье ($X_{расч}$). Величина реактанца рассеяния статора для построения треугольника Потье ($X_{расч}$) принята равной величине начального реактанца генератора с учетом успокоительных контуров (X_{2n}).

Величина X_{2n} принималась согласно данным, приведенным в статье инж. Лютера и Алексеева¹², для союзных турбогенераторов равной $X_{2n} = 12\%$. Поэтому и реактанц для построения треугольника Потье также принимался равным 12%, т. е. $X_{расч} = 12\%$. Ввиду этого в дальнейшем всюду вместо реактанца $X_{расч}$ нами вводится реактанц X_{2n} .

3. Отношение к. з. (m_x). Кратность установившегося тока к. з. по отношению к номинальному току генератора при к. з. на клеммах генератора и при возбуждении холостого хода — так называемое „отношение к. з.“ принималось равным $m = 0,7$ как средней величины¹³.

4. Возбуждение генератора при нормальной нагрузке. При нахождении величины установившегося тока к. з. генератора луч Рюденберга проводится из точки, соответствующей относительному возбуждению генератора до наступления к. з. При построении кривых кратностей тока к. з. предполагалось, что автоматические регуляторы напряжения на генераторах отсутствуют и что поэтому возбуждение генератора при установившемся к. з.

¹¹) См. доклад на I Всесоюзной конференции по высоким напряжениям, „Электричество“ № 12, 1931.

¹²) „Электричество“, № 8, 1932.

равно возбуждению при нормальной нагрузке, существовавшей до наступления к. з. Это возбуждение рассчитывалось по формуле¹⁴⁾

$$a\omega_{ном} = 1,09 + \left(1,82 \frac{X_{2n}\%}{100} + \frac{1}{m_x} \right) \sin \psi_{ном}. \quad (40)$$

Здесь $\psi_{ном}$ — угол между током нагрузки $J_{ном}$ и э. д. с. при нормальном режиме $E_{ном}$. Угол $\psi_{ном}$ определяется из диаграммы рис. 15, где $J_{ном} X_{2n}$ означает падение напряжения в генераторе от номинального тока.

Из диаграммы рис. 15 находим модуль вектора $E_{ном}$:

$$|E_{ном}| = \sqrt{OA^2 + AC^2} = \\ = \sqrt{(U_{к.л.} \cos \psi_{ном})^2 + (U_{к.л.} \sin \psi_{ном} + J_{ном} X_{2n})^2} \quad (41)$$

или в относительных величинах

$$e_{ном\%} = \sqrt{(U_{к.л. \%} \cos \psi_{ном})^2 + (U_{к.л. \%} \sin \psi_{ном} + X_{2n\%})^2}. \quad (42)$$

Подставляя в выражение (42) $\cos \psi_{ном} = 0,8$, $\sin \psi_{ном} = 0,6$, $X_{2n\%} = 12\%$ и $U_{к.л. \%} = 105\%$, получим $e_{ном\%} = 113\%$. На основании диаграммы рис. 14, далее, находим

$$\sin \psi_{ном} = \frac{105 \sin \psi_{ном} + X_{2n\%}}{e_{ном\%}} = \frac{75}{113} = 0,665.$$

Теперь можно на основании выражения (40) найти

$$a\omega_{ном} = 2,19.$$

5. Реактанс нагрузки ($X_{нагр}$). Как отмечено выше, в качестве основного параметра для подсчета кратности тока к. з. по формуле (36) нами положен так называемый расчетный реактанс $X_{расч}$, равный сумме начального реактанса генератора с учетом успокоительных контуров $X_{нн}$ и реактанса сети без учета нагрузки X_k в простой схеме (рис. 10), которая служила исходной для построения декрементных кривых кратностей токов к. з., т. е. $X_{расч} = X_{2n\%} + X_k\%$. Полный реактанс, присоединенный к клеммам генератора при к. з., так называемый внешний реактанс $X_{вн}$, вычисляется легко, если известен реактанс нагрузки $X_{нагр}$, присоединенный к клеммам генератора, а именно

$$X_{вн\%} = \frac{X_{нагр\%} X_k\%}{X_{нагр\%} + X_k\%}. \quad (43)$$

Инж. Ган и Вагнер исходили из предположения, что реактанс нагрузки, присоединенный к клеммам генератора, должен обеспечить при нормальных условиях работы прохождение через генератор индуктивной составляющей тока нагрузки, т. е. $J_{ном} \sin \psi_{ном} = 0,6 J_{ном}$. При напряжении на клеммах генератора, равном 100%, этот реактанс равен $\frac{100}{0,6} = 166\%$. Однако для определения реактанса, имитирующего нагрузку и присоединенного к клеммам генератора в простой схеме американского упрощенного метода, пра-

¹⁴⁾ Городской, Расчет токов к. з. методом симметричных составляющих, стр. 40.

Определение кратностей токов начального и установившегося режимов трехполюсного короткого замыкания и постоянных времени T_m и T_b

вильнее исходить из той доли номинального тока генератора, которая создает размагничивающие ампервитки реакции якоря (при пренебрежении поперечным полем), т. е. из величины $J_{ном} \sin \psi_{ном}$, где $\psi_{ном}$ — угол между током нагрузки $J_{ном}$ и э. д. с. генератора при нормальном режиме $E_{ном}$. При $\cos \varphi = 0,8$, как определено было выше, $\sin \psi_{ном} = 0,665$. Исходя из напряжения на клеммах генератора, равного 105%, выше была вычислена величина э. д. с. при нормальном режиме $E_{ном} = 113\%$. Отсюда уже легко вычислить тот эквивалентный реактанс, при котором через генератор при нормальном режиме протекает ток $J_{ном} \sin \psi_{ном}$. Этот реактанс равен

$$X_{2n\%} + X_{нагр\%} = \frac{E_{ном\%}}{\sin \psi_{ном}} = \frac{113}{0,665} = 170\%. \quad (44)$$

При реактанце генератора, равном $X_{2n} = 12\%$, на долю реактанса нагрузки приходится величина

$$X_{нагр} = 158\%.$$

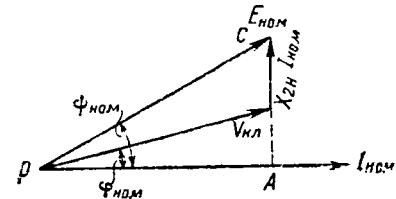
Из этого реактанса нагрузки мы и исходим при определении внешнего реактанса согласно выражению (43).

Выяснив исходные данные, легко теперь определить построением Рюденберга¹⁵⁾ кратности токов трехполюсного к. з. установившегося режима m_{2y} , протекающих через генератор схемы рис. 10. Кратность тока в месте к. з. схемы рис. 10 определяется путем разложения кратности тока m_{2y} обратно пропорционально реактансам нагрузки в сети, т. е.

$$m_{ky} = m_{2y} \frac{X_{нагр}}{X_k}. \quad (45)$$

Значения кратностей тока m_{2y} и m_{ky} для разных значений $X_{расч}$ приведены в гр. 5 и 6 табл. 1.

Рис. 15.
Векторная диаграмма при
нормальном режиме
работы



в) Определение периодических слагающих тока к. з. в начальный момент ($m_{нн}$ и $m_{лн}$)

Кратности периодической слагающей тока к. з. в начальный момент с учетом влияния успокоительных обмоток $m_{нн}$ при к. з. в разных точках схемы рис. 10 определяются согласно выражению (9), которое перепишем в относительных величинах:

$$m_{нн} = \frac{e_{нач\%}}{X_{2n\%} + X_{вн\%}}. \quad (46)$$

¹⁵⁾ Детально о построении Рюденберга—Городской, Расчет токов короткого замыкания методом симметричных составляющих, стр. 35 и далее.

Таблица 1

№	$X_{расч}$ %	$X_{расч} - X_k$ %	$X_k \cdot X_{нагр}$ % $= X_{вн\%} + X_{нагр\%}$	$X_{сумм} = X_{2n\%} + X_{вн\%}$ %	m_{2y}	m_{ky}	$m_{спн}$	$m_{кпп}$	$m'_{спн}$	$m'_{кпп}$	$X_{спн} + X_{кпп}$ %	$X_{спн} + X_{кпп}$ %	T_m сек.	T_b сек.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1	12	0	0	12	1,535	1,535	9,42	9,42	20,0	5,905	5,905	0,140	0,98	0,1225	
2	20	8	7,6	19,6	1,46	1,39	5,765	5,48	27,6	4,28	4,045	0,184	1,29	0,161	
3	30	18	16,2	28,2	1,40	1,26	4,01	3,61	36,2	3,26	2,935	0,227	1,592	0,199	
4	40	28	23,8	35,8	1,34	1,14	3,155	2,68	43,8	2,695	2,290	0,263	1,836	0,229	
5	50	38	30,6	42,6	1,29	1,04	2,65	2,13	50,6	2,333	1,880	0,292	2,04	0,255	
6	75	63	45	57	1,19	0,85	1,984	1,42	65,0	1,816	1,296	0,346	2,42	0,302	
7	100	88	56,5	68,5	1,115	0,715	1,650	1,06	76,5	1,544	0,991	0,384	2,68	0,335	
8	150	138	73,5	85,5	1,02	0,54	1,322	0,70	93,5	1,263	0,673	0,432	3,02	0,377	
9	200	188	85,7	97,7	0,96	0,44	1,156	0,53	105,7	1,118	0,510	0,462	3,23	0,403	
10	250	238	95	107	0,914	0,365	1,055	0,421	115	1,026	0,409	0,484	3,38	0,422	
11	300	288	102	114	0,88	0,31	0,992	0,350	122	0,969	0,343	0,498	3,485	0,436	
12	370	358	109,5	121,5	0,842	0,257	0,930	0,284	129,5	0,910	0,278	0,514	3,59	0,449	
13	440	428	115,2	127,2	0,820	0,221	0,888	0,239	135,2	0,872	0,234	0,234	3,67	0,458	
14	500	488	119,2	131,2	0,804	0,1965	0,860	0,210	139,2	0,847	0,207	0,532	3,72	0,465	
15	700	688	128,3	140,3	0,766	0,143	0,805	0,150	148,3	0,795	0,148	0,548	3,83	0,479	
16	850	838	132,9	144,9	0,748	0,1185	0,779	0,1235	152,9	0,771	0,122	0,555	3,88	0,485	

реактанц $X_{\text{вн}}\%$ вычисляется для разных значений $X_{\text{расч}}\%$ на основании выражения (43). Так как нами принято $X_{\text{вн}} = X_{\text{расч}}$, то нетрудно убедиться, что $e'_{\text{нач}}\% = e_{\text{ном}}\% = 113\%$.

Кратности токов $m_{\text{спн}}$, подсчитанные на основании выражения (46), приведены в гр. 7, табл. 1.

Распределяя кратности тока $m_{\text{спн}}$, обратно пропорционально реактанцам $X_k\%$ и $X_{\text{нагр}}\%$ схемы рис. 10, определим интересующие нас кратности токов к. з. с учетом влияния успокоительных обмоток $m_{\text{кпп}}$, притекающих к месту к. з. в схеме рис. 10 по формуле

$$m_{\text{кпп}} = m_{\text{спн}} \frac{X_{\text{вн}}\%}{X_k\%}. \quad (47)$$

Значения $m_{\text{кпп}}$ приведены в графе 8 табл. 1.

Кратности периодической слагающей тока к. з. в начальный момент без учета влияния успокоительных обмоток $m'_{\text{спн}}$ вычислялись согласно выражению (6), которое представлено в относительных величинах для вычисления кратности тока в генераторе схемы рис. 10:

$$m'_{\text{спн}} = \frac{e'_{\text{нач}}\%}{X'_{\text{вн}}\% + X_{\text{вн}}\%}. \quad (48)$$

Начальный реактанц генератора без учета влияния успокоительных обмоток $X'_{\text{вн}}$ принимался нами на основании статьи инж. Лютера и Алексеева¹⁶⁾ равным $X'_{\text{вн}} = 20\%$.

Электродвижущая сила $E'_{\text{нач}}$ вычислялась на основании выражения (5):

$$\bar{E}'_{\text{нач}} = \bar{U}_{\text{ка}} + j \bar{J}_{\text{ном}} X_{\text{вн}}. \quad (5)$$

Векторная диаграмма для определения $\bar{E}'_{\text{нач}}$ аналогична диаграмме рис. 15, но вместо реактанца $X_{\text{вн}}$ входит реактанц $X'_{\text{вн}}$. На основании рис. 15 нетрудно для данного случая написать:

$$e'_{\text{нач}}\% = \sqrt{(105 \cos \varphi_{\text{ном}})^2 + (105 \sin \varphi_{\text{ном}} + X'_{\text{вн}}\%)^2}. \quad (49)$$

При $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$, $\sin \varphi_{\text{ном}} = 0,6$ и $X'_{\text{вн}} = 20\%$ получим

$$e'_{\text{нач}} = 118,1\%.$$

Расчет кратностей периодической слагающей тока трехполюсного к. з. в начальный момент времени без учета влияния успокоительных обмоток приведен в табл. 1 (гр. 9, 10 и 11). Следует лишь отметить, что суммарный реактанц $X'_{\text{сумн}}$, приведенный в графе 9 табл. 1, равен

$$X'_{\text{сумн}}\% = X'_{\text{вн}}\% + X_{\text{вн}}\%. \quad (50)$$

г) Определение периодической слагающей тока к. з. $m_{\text{нл}}$ для переходных моментов времени

Для определения периодической слагающей кратности тока к. з. для переходных моментов времени согласно выражению (34) необходимо вычислить медленно и быстро затухающие составляющие периодической слагающей тока, к. з. $m_{\text{нл}}$ и $m_{\text{об}}$.

Кратность медленно затухающей периодической составляющей тока к. з. вычисляется для данного момента времени в соответствии с выражением (34)

$$m_{\text{нл}} = m_{\text{нн}} e^{-\frac{t}{T_{\text{нн}}}} = (m'_{\text{нн}} - m_{\text{в}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{нн}}}}, \quad (51)$$

¹⁶⁾ Электричество № 8, 1932.

Расчет кратностей периодической слагающей положительной последовательности тока короткого замыкания при различном отдалении от клемм генератора для различных моментов времени возбуждения $aw = 2,43$

№	$X_{\text{расч}}\%$	$t = 0$ сек.		$t = 0,1$ сек.		$t = 0,25$ сек.		$t = 0,5$ сек.		$t = 1$ сек.		$t = 1,5$ сек.		$t = 2$ сек.		$t = 3$ сек.		$t = 4$ сек.		$t = \infty$	
		m_{21}	m_{k1}																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	12	9,420	9,420	7,039	7,039	5,375	5,375	4,219	4,219	3,112	3,112	2,480	2,480	2,103	2,103	1,740	1,740	1,609	1,609	1,535	1,535
2	20	5,765	5,480	4,868	4,620	4,094	3,890	3,441	3,265	2,762	2,620	2,373	2,250	2,058	1,954	1,736	1,649	1,587	1,500	1,460	1,390
3	30	4,010	3,610	3,600	3,240	3,202	2,880	2,821	2,540	2,398	2,160	2,144	1,930	1,930	1,737	1,682	1,514	1,551	1,395	1,400	1,260
4	40	3,155	2,685	2,920	2,480	2,676	2,275	2,424	2,060	2,132	1,813	1,938	1,649	1,796	1,526	1,604	1,363	1,493	1,270	1,340	1,140
5	50	2,650	2,155	2,498	2,010	2,332	1,878	2,152	1,734	1,935	1,558	1,791	1,443	1,681	1,353	1,530	1,232	1,438	1,159	1,290	1,040
6	75	1,984	1,417	1,912	1,365	1,828	1,306	1,731	1,236	1,610	1,150	1,527	1,091	1,464	1,046	1,371	0,980	1,310	0,935	1,190	0,850
7	100	1,650	1,059	1,607	1,030	1,556	0,999	1,495	0,960	1,416	0,909	1,360	0,873	1,319	0,847	1,255	0,805	1,212	0,777	1,115	0,715
8	150	1,322	0,704	1,302	0,694	1,274	0,679	1,242	0,662	1,199	0,639	1,168	0,623	1,145	0,611	1,110	0,591	1,085	0,578	1,020	0,540
9	200	1,160	0,527	1,143	0,521	1,126	0,513	1,106	0,5050	1,079	0,492	1,059	0,483	1,045	0,477	1,022	0,466	1,006	0,459	0,960	0,440
10	250	1,055	0,421	1,045	0,417	1,034	0,413	1,023	0,4060	1,000	0,399	0,9859	0,394	0,9759	0,389	0,9601	0,3830	0,9482	0,379	0,914	0,365
11	300	0,992	0,351	0,9848	0,349	0,9760	0,346	0,964	0,3415	0,949	0,336	0,9380	0,3325	0,9301	0,3290	0,9172	0,3250	0,9083	0,323	0,880	0,310
12	370	0,930	0,284	0,9240	0,283	0,9168	0,2805	0,9077	0,2780	0,8956	0,274	0,8867	0,2720	0,8810	0,2700	0,8714	0,2665	0,8642	0,2645	0,842	0,257
13	440	0,888	0,239	0,8834	0,238	0,8778	0,2365	0,8708	0,2345	0,8612	0,232	0,8545	0,2300	0,8502	0,2285	0,8430	0,2270	0,8374	0,2255	0,820	0,221
14	500	0,860	0,210	0,8563	0,209	0,8518	0,2080	0,8460	0,2070	0,8384	0,205	0,8328	0,2040	0,8321	0,2045	0,8232	0,2015	0,8186	0,2005	0,804	0,1965
15	700	0,805	0,150	0,8023	0,1497	0,7990	0,1490	0,7949	0,1482	0,7897	0,1472	0,7856	0,1466	0,7832	0,1461	0,7792	0,1452	0,7762	0,1447	0,766	0,1430
16	800	0,750	0,1240	0,7769	0,1232	0,7743	0,1230	0,7711	0,1223	0,7664	0,1217	0,7612	0,1212	0,7547	0,1202	0,7504	0,1202	0,7452	0,1198	0,7416	0,1195

где постоянная времени $T_{\text{н}}$ вычисляется согласно выражению (16):

$$T_{\text{н}} = T_{\text{в}} \frac{X'_{\text{вн}} + X_{\text{вн}}}{X_{\text{синхр}} + X_{\text{вн}}}. \quad (16)$$

На основании упоминавшейся статьи инж. Лютера и Алексеева принимаем $T_{\text{в}} = 7$ сек.

Синхронный реактанц принимаем в среднем равным обратной величине „отношения к. з.“

$$X_{\text{синхр}}\% = \frac{1}{m_x} 100 = \frac{1}{0,7} \cdot 100 = 143\%.$$

Вычисленные постоянные времени $T_{\text{н}}$ для разных значений $X_{\text{расч}}\%$ приведены в графе 13 табл. 1.

Зная кратности периодических слагающих для начального момента $m'_{\text{спн}}$ и установившегося режима $m_{\text{спн}}$, приведенные в табл. 1, можно на основании выражения (51) вычислить кратности медленно затухающей составляющей тока к. з. $m_{\text{об}}$, протекающего через генератор для разных моментов времени.

Кратность быстро затухающей периодической составляющей тока к. з. вычисляется для данного момента времени в соответствии с выражением (34):

$$m_{\text{об}} = m_{\text{нн}} e^{-\frac{t}{T_{\text{нн}}}} = (m_{\text{нн}} - m'_{\text{нн}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{нн}}}}. \quad (52)$$

Постоянная времени $T_{\text{нн}}$ вычислялась на основании выражения (23) и приведена для разных реактанцев $X_{\text{расч}}$ в графе 14, табл. 1.

Зная кратности периодических слагающих для начального момента времени $m'_{\text{спн}}$ и $m_{\text{спн}}$, приведенных в графах 7 и 10 табл. 1, легко вычислим на основании выражения (52) значения $m_{\text{об}}$.

Зная отдельные периодические составляющие, протекающие через генератор схемы рис. 10, определим суммированием их в соответствии с выражением (34) полную периодическую слагающую тока к. з. для любого момента времени $m_{\text{нл}}$. Распределением кратности $m_{\text{нл}}$ обратно пропорционально реактанцам $X_k\%$ и $X_{\text{нагр}}\%$ схемы рис. 10 выделим интересующие нас кратности периодической слагающей $m_{\text{нл}}$ для любого момента времени. Эти величины приведены в табл. 2. На основании данных табл. 2 построены кривые для положительной последовательности периодической слагающей тока к. з. $m_{\text{нл}} = f(X_{\text{расч}})$ для разных значений t (рис. 16) и кривые $m_{\text{нл}} = f(t)$ для разных значений $X_{\text{расч}}$ (рис. 17). Эти кривые непосредственно используются при расчетах по упрощенному американскому методу как для симметричного, так и несимметричного к. з.

д) Определение апериодической слагающей и полного тока короткого замыкания

В начальный момент апериодическая слагающая тока в генераторе вычисляется согласно выражению (24). Так как в месте к. з. схемы рис. 10 до наступления к. з. ток нагрузки не протекал, то можно считать

$$I_{\text{ан}} = I_{\text{нн}}.$$

Для переходных моментов времени апериодическая слагающая вычисляется согласно выражению (25), причем постоянная времени апериодической слагающей T_a вычисляется по формуле (26).

Таблица 2

Расчет кратностей периодической слагающей положительной последовательности тока короткого замыкания при различном отдалении от клемм генератора для различных моментов времени возбуждения $aw = 2,43$

Для расчетов аппаратуры на электродинамическую устойчивость по ударному току к. з. важно знать значение постоянной слагающей для $t = 0,01$ сек. [выражение (28)].

Вычислим выражение $e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ для нескольких случаев.

Согласно упомянутой выше статье инж. Лютера и Алексеева для турбогенераторов при к. з. на клеммах генератора

$$T_a = \frac{X_s}{314 \cdot r_c} = \frac{14}{314 \cdot 0,5} \approx 0,1 \text{ сек.}$$

$$e^{-\frac{0,01}{T_a}} = e^{-\frac{0,01}{0,1}} = 0,905.$$

При к. з. в высоковольтной сети в простейшем случае последовательно с генератором будут включены повышательный трансформатор и линия. Для последней относительная величина омического сопротивления резко возрастает (колеблется примерно от 40 до 100%

от индуктивного сопротивления). В этом случае $e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ значительно уменьшится в сравнении с случаем к. з. на клеммах генератора.

Согласно немецким нормам средний коэффициент для ударного тока

равен 1,8, а значит, $e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 0,8$, что соответствует $T_a = 0,45$ сек.

Однако для случая к. з. на маломощных ответвлениях электрической установки (например, на собственных нуждах станции или подстанции малой мощности), для которых отношение омического

сопротивления к индуктивному возрастает, значение $e^{-\frac{0,01}{T_a}} = 0,8$ преувеличено.

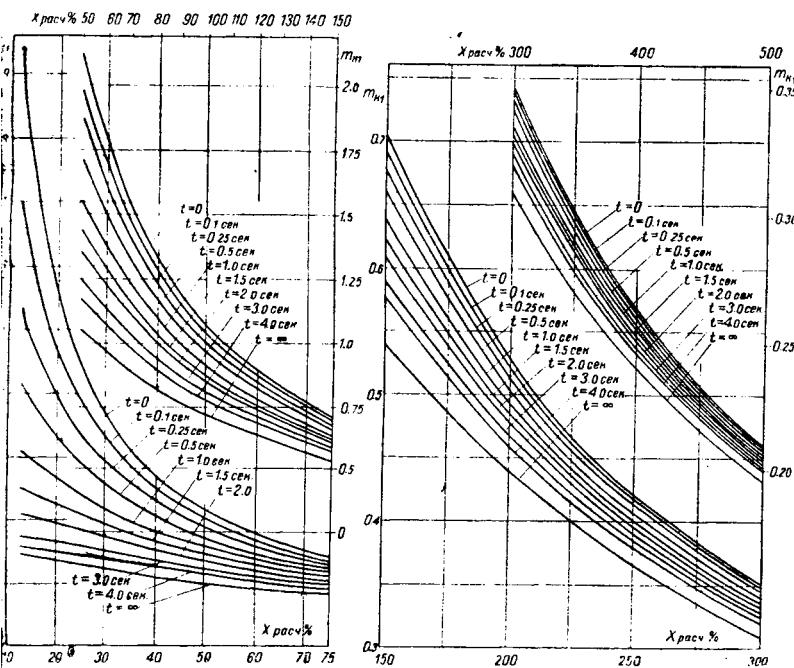


Рис. 16. Кривые кратностей периодической слагающей тока к. з. m_{k1} в зависимости от расчетного реактанца $X_{pac\%}$ для разных моментов времени t

Примечание 1. Расчетный реактанец $X_{pac\%}$ вычисляется для отдельных видов короткого замыкания по следующим формулам:

$$X_{pac\%}^{(3)} = X_1\%; X_{pac\%}^{(2)} = X_1\% + X_2\%; X_{pac\%}^{(1)} = X_1\% + X_2\% + X_3\%; X_{pac\%}^{(11)} = X_1\% + \frac{X_2\% \cdot X_0\%}{X_2\% + X_0\%};$$

где

$$\sqrt{X_1\% \cdot X_2\% \cdot X_0\%}$$

означают соответственно эквивалентные реактанцы положительной, отрицательной и нулевой последовательностей.

Примечание 2. Кривые дают только кратность составляющей положительной последовательности тока в месте к. з. m_{k1} . Кратности всей периодической слагающей тока в месте к. з. для отдельных видов к. з. вычисляются по следующим формулам:

$$m_k^{(3)} = m_{k1}; m_k^{(2)} = \sqrt{3 \cdot m_{k1}}; m_k^{(1)} = \frac{3 \cdot m_{k1}}{X_2}; m_k^{(11)} = \frac{3 \cdot m_{k1}}{\sqrt{v_1 \cdot v_2}}.$$

Для выявления точных значений $e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ желательны в каждом частном случае маломощного ответвления специальные подсчеты.

Зная периодическую и апериодическую слагающие тока к. з., легко вычислить полный ток к. з. для любого момента времени согласно выражениям (27) и (29) ¹⁷⁾.

5/III 1934 г.

(Продолжение см. в № 11 ж. „Электричество“)

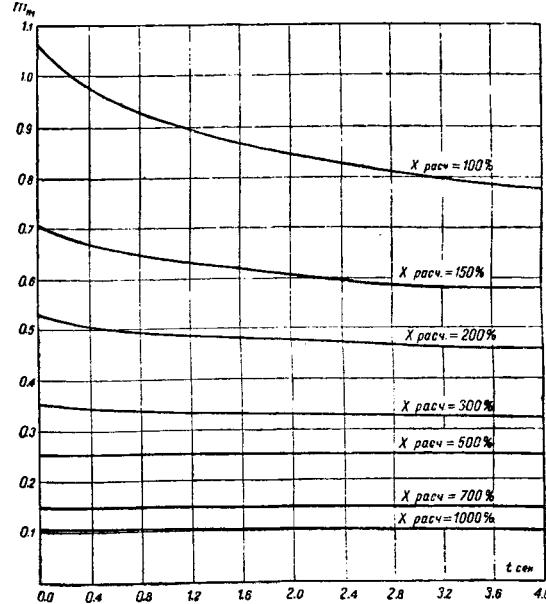
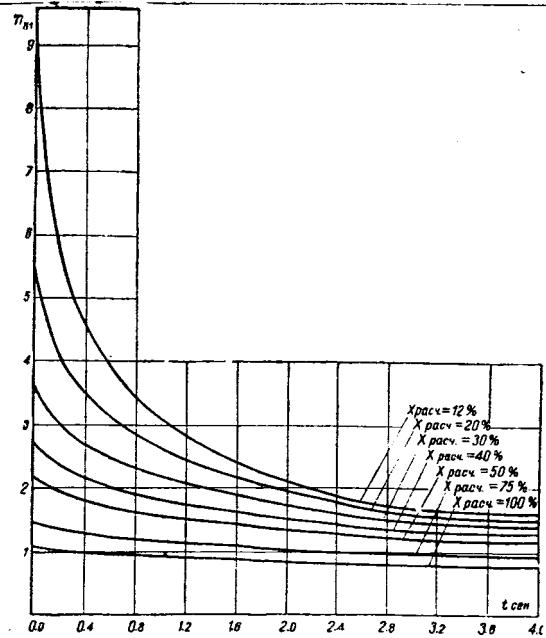


Рис. 17. Кривые кратностей периодической слагающей тока к. з. m_{k1} в зависимости от времени t для разных величин расчетного реактанца $X_{pac\%}$.

Примечание 3. Расчетный реактанец $X_{pac\%}$ относится к суммарной или частичной мощности синхронных машин в зависимости от того, рассчитывается ли ток к. з. по общему для всей установки расчетному реактанцу $X_{pac\%}$, или по индивидуальным значениям расчетного реактанца для отдельных машин или групп их. В соответствии с этим кратности тока к. з., отсчитываемые по кривым, относятся к номинальному току всех синхронных машин или части их.

Примечание 4. Кривые построены для постоянной времени цепи возбуждения при разомкнутой цепи статора $T_b = 7$ сек. Для других величин T_b нужно кратность тока к. з. находить по кривой, соответствующей не действительному времени t , для которого эта кратность отыскивается, а по кривой, соответствующей времени $\frac{7}{T_b} \cdot t$.

¹⁷⁾ Принципы практического применения описанного метода, а также пример расчета токов к. з. будут даны в одном из ближайших номеров журнала „Электричество“.

О гашении дуги гасильной камерой масляного выключателя¹⁾

Инж. А. М. Мелькумов
ВЭИ

За последние годы масляные выключатели с гасильными камерами получили значительное распространение. Большинство заграничных фирм и наш завод „Электроаппарат“ снабжают масляные выключатели средних и больших разрывных мощностей (до 2 500 MVA) гасильными камерами. Не малое количество этих выключателей установлено на наших станциях и в сетях. Простота конструкции гасильной камеры в совокупности с большой эффективностью ее позволяет предполагать, что она еще не скоро будет вытеснена какой-либо другой конструкцией. Правильное представление о рабочем процессе гасильной камеры должно иметь большое вспомогательное значение для обслуживающего выключатели персонала.

В настоящее время можно считать установленным следующее представление о процессе гашения дуги гасильной камерой масляного выключателя:

Между расходящимися при выключении замкнутой цепи контактами внутри закрытой камеры образуется дуга, вследствие высокой температуры которой часть масла в камере испаряется и разлагается на газообразные составные элементы (рис. 1, б). Образовавшиеся газы, не имея возможности расширяться, повышают давление в камере. Давление, оказываемое газами на окружающее их масло, заставляет последнее искать выхода из камеры. Единственный выход через кольцевой зазор между подвижным контактом и горловиной камеры оказывает большее или меньшее сопротивление движению масла. В зависимости от величины этого зазора большее или меньшее количество масла будет выходить из камеры, освобождая некоторый объем для газов, в соответствии с чем и будет изменяться давление в камере. Давление в камере будет нарастать до тех пор, пока подвижной контакт (сплошной) не освободит отверстия в горловине камеры. В это отверстие сейчас же устремляется к выходу из камеры сдавленные в ней газы, пар и масло. Быстрое движение неионизированных и относительно холодных газов и масла в непосредственном контакте с дугой в узком отверстии горловины камеры способствует чрезвычайно быстрой деионизации дугового промежутка, и при первом же прохождении тока через нуль, после выхода подвижного контакта из камеры, как правило, дуга гаснет (рис. 1, г). Далее, подвижной контакт отходит в свое крайнее положение, а оставшиеся в камере газы при атмосферном давлении поднимаются вверх и выходят постепенно из камеры через имеющееся для этой цели небольшое отверстие в ее крыше (рис. 1, д).

Сказанное иллюстрирует схематически рис. 1. Если в момент выхода подвижного контакта из отверстия в горловине камеры дуга не угасает, то движение газов и масла из камеры постепенно прекращается, и в дальнейшем явление протекает почти так же, как в нормальном масляном выключателе без особых дугогасящих устройств. Так как газы имеют возможность выходить из камеры еще до окончательного выхода подвижного контакта из нее (рис. 1, в), то вызываемый этим эффект охлаждения и деионизации дуги может быть иногда достаточным для гашения дуги еще до выхода подвижного контакта из камеры. Это будет, очевидно, при небольшой мощности дуги.

Именно это, приведенное выше установленное представление о рабочем процессе гасильной камеры и привело в последние годы к значительному усовершенствованию ее работы и к видоизменению ее в так называемую гасильную камеру с масляным дутьем, самая идея которой основана на гашении дуги быстрым потоком газов и масла через дугу.

Несмотря на это, в ряде книг, выпущенных у нас в последнее время, допускаются совершенно неверные толкования рабочего процесса гасильной камеры, вводящие в заблуждение широкие массы читающих электротехников. Некоторые авторы²⁾ представляют, что

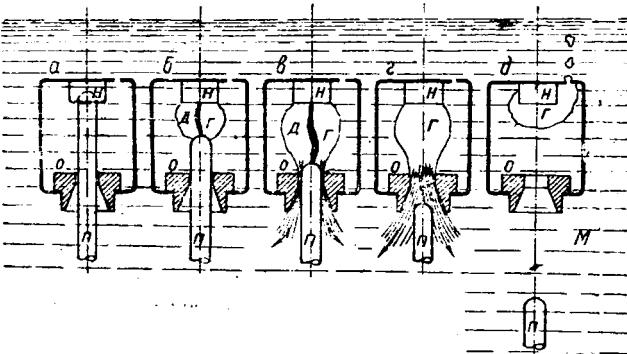


Рис. 1. Схема процесса гашения дуги гасильной камерой. Г—газ; Д—дуга; М—масло; П—подвижный контакт; Н—неподвижный контакт; О—горловина камеры с отверстием

„свежее масло снизу устремится в гасильную камеру“ (в которой давление значительно больше, чем в окружающей среде! А. М.) и погасит дугу. Другие³⁾ предполагают, что „нормально дуга гасится

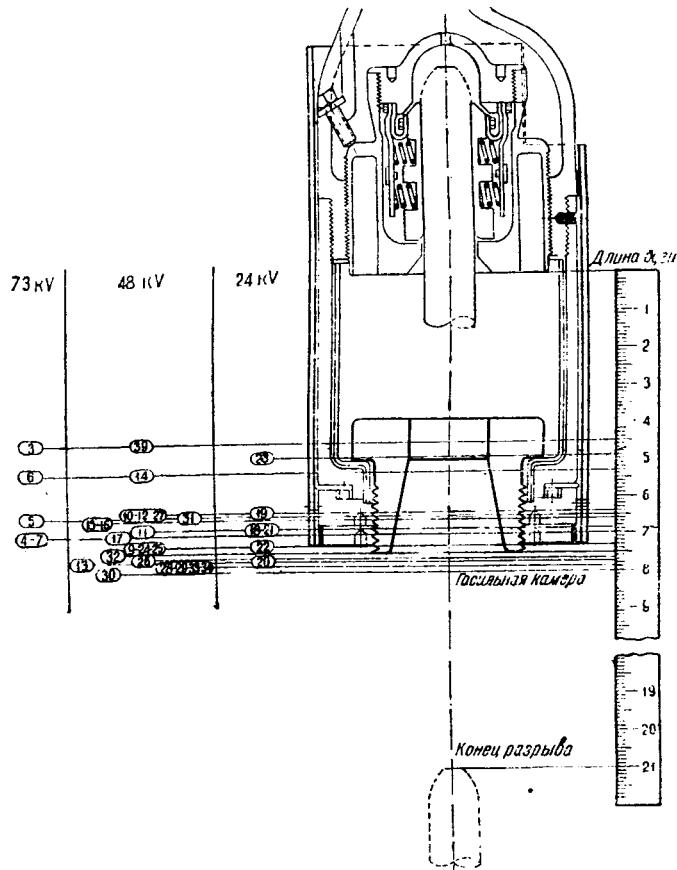


Рис. 2. Гашение дуги гасильной камерой масляного выключателя

Напряжение	73 кВ	48 кВ	24 кВ
Ток	$720 \div 815$ А	$1140 \div 1930$ А	$3100 \div 3300$ А
Скорость	$1,58 \div 1,77$ м/сек	$1,58 \div 2,44$ м/сек	$1,97 \div 2,2$ м/сек

в камере и только в исключительных случаях—вне камеры⁴⁾ и что гашение дуги обусловлено значительным повышением давления циркуляцией масла внутри камеры и охлаждением подвижного контакта, вытесняемым из камеры через кольцевой зазор маслом, омыющим контактный стержень.

Опубликование в печати таких представлений о работе гасильной камеры вынудило нас выступить с указанием некоторых опытных данных и попытаться таким образом рассеять имеющуюся еще у некоторых неясность.

1. Гаснет ли дуга при нахождении подвижного контакта внутри камеры или по выходе его из последней?

Ответ на этот вопрос можно получить из рассмотрения результатов испытаний масляного выключателя с гасильной камерой, произведенных американской фирмой GEC⁴⁾ и наших опытов с моделью камеры водяного выключателя.

Испытания масляного выключателя с гасильной камерой произвелись при различном напряжении сети (24, 48 и 73 kV), различных отключаемых токах (от 720 до 8 150 A) и различных скоростях подвижного контакта ($1,5 \div 2$ m/sec). При этих испытаниях отмечалось положение подвижного контакта в пространстве в момент угасания дуги. Результаты испытаний приведены на рис. 2. Горизонтальные линии с цифрами в кружках на концах показывают положение конца подвижного контакта в момент угасания дуги. Цифры в кружках—порядковые номера испытаний. Ни в одном из приведенных на рис. 2 тридцати двух случаев в момент угасания дуги контакт не находился внутри камеры, а всегда—вне камеры или

³⁾ А. М. Залесский, Масляные выключатели, Кубач, 1932, стр. 78 и дальше.

в ее горловине. Таким образом из приведенных на рис. 1 данных можно сделать вполне определенный вывод, что дуга, как правило, гаснет по выходе подвижного контакта из камеры.

Аналогичные измерения были проделаны нами в лаборатории коммутационной аппаратуры ВЭИ на модели гасильной камеры водяного выключателя. Камеры водяных выключателей имеют по существу тот же принцип действия, что и гасильные камеры масляных выключателей, так что результаты наших опытов вполне приложимы к гасильным камерам масляных выключателей. Опыты производились при напряжении 6 000 V и отключаемых токах 350 ± 525 A. Размеры камеры в соответствии с малой отключаемой мощностью были невелики. Представление о конструкции камеры можно составить по рис. 3. Здесь две камеры: камера давления (нижняя, играющая роль гасильной камеры) и камера конденсации (верхняя), разделенные перегородкой с отверстием для подвижного контакта. При опытах менялись скорость подвижного контакта, размер отверстия в разделяющей камеру давления и камеру конденсации перегородке и уровень воды в камерах до полного заполнения верхней камеры. Скорость подвижного контакта в соответствии с условиями работы водяных выключателей составляла значительную величину (в среднем 6 m/sec). Момент выхода подвижного контакта из отверстия в перегородке фиксировался на осциллограмме с помощью вспомогательного контакта на ленте вибратора, измеряющего скорость подвижного контакта. На той же осциллограмме фиксировалось изменение тока и напряжения на контактах. На основании согласованных между собой данных виброграммы и осциллограммы вычислялся путь, пройденный подвижным контактом от момента выхода его из отверстия в перегородке до момента угасания дуги, и следовательно, было известно положение подвижного контакта в пространстве в момент угасания дуги.

Результаты этих опытов приведены на рис. 3, построенном аналогично рис. 2. Как видно из рисунка, и здесь в момент угасания дуги подвижной контакт неизменно находится вне гасильной камеры (камера давления). В соответствии с большой скоростью подвижной контакт за короткое время от момента выхода из отверстия в перегородке до момента прохода тока через нуль (момент гашения) иногда успевает уйти на значительное расстояние. Гашение, как правило, происходило при первом же переходе тока через нуль после выхода контакта из камеры.

Таким образом приведенные материалы показывают, что в гасильной камере масляного или иного жидкостного выключателя гашение дуги, как правило, происходит после открытия подвижным контактом отверстия в горловине камеры, что находится в соответствии с изложенным нами процессом гашения дуги. Имеющиеся на рис. 2 и 3 случаи гашения дуги, когда подвижной контакт еще находится в отверстии горловины камеры, не составляют исключения, если учесть, что на рисунках показаны положения крайней точки подвижного контакта, а конец его имеет закругленную форму и что ускорение движения газов и масла начинается еще до окончательного открытия отверстия подвижным контактом.

2. Способствует ли повышение давления в камере уменьшению устойчивости горения дуги и, следовательно, облегчению условий гашения?

Изучение влияния давления на работу нормального масляного выключателя (без дугогасящих приспособлений), произведенное Базуэром, Копелиовичем и др., привело к выводу, что повышение давления сверх определенного небольшого (порядка $2 \div 3$ at) предела вызывает увеличение длительности дуги при выключении одной и той же мощности.

Опыты, проделанные в последнее время лабораторией коммутационной аппаратуры ВЭИ по изучению влияния повышения давления на гашение дуги в различных газовых средах, также показали неизменное повышение устойчивости дуги с увеличением давления при прочих равных условиях. К таким же выводам приходит и Кессельринг⁶⁾ в результате своих опытов с водяными парами.

Если учесть, что повышение давления вызывает увеличение температуры, а вместе с тем облегчение условий ионизации газов в дуге, то станет ясным, что повышением давления как таковым нельзя обяснять гашение мощных дуг гасильной камерой.

3. Как велико влияние охлаждающего эффекта масла, омывающего подвижной контакт, находящийся в камере?

⁶⁾ F. Kesselring, „ASE Bull.“ № 23, 1932, стр. 610.

Не вдаваясь в излишние количественные расчеты, отметим следующее: по исследованию Кессельринга⁶⁾ на долю контактов приходится $4,5 \div 6\%$ общего количества выделенной дугой энергии. Первая цифра относится к мощности 200 MVA, вторая к 1,2 MVA. На одни подвижные контакты, можно приближенно считать, приходится половина этой энергии, т. е. $2,25 \div 3\%$. Эта энергия идет на повышение температуры контактов. Только незначительная доля этой энергии может быть отдана подвижными контактами омывающим их маслу за короткий промежуток времени, пока существует дуга (предполагается, что подвижной контакт не выходит из камеры). Величина этой доли зависит от разности температур контакта и масла, поверхности охлаждения и времени.

По исследованиям того же Кессельринга⁷⁾ распределение температуры вдоль подвижного контакта во время горения дуги зависит от длительности дуги. Например, при длительности дуги в 0,1 сек. температура уменьшается от 1000° у кратера дуги до 20° на расстоянии 1 см от него. При меньшей длительности дуги (обычной для гасильной камеры) это расстояние будет еще меньше. Охлаждение будет иметь некоторый эффект только на этом расстоянии.

Таким образом величины, от которых прямо зависит количество энергии, отданной контактом маслу, чрезвычайно малы. Даже оценивая грубо энергию, отданную контактами маслу в 25% (на самом деле будет значительно меньше) энергии, поглощенной ими, получим, что лишь $0,6 \div 0,65\%$ энергии дуги будет характеризовать охлаждающий эффект масла, омывающего контакты. Эта величина, несколько преувеличенная, является настолько незначительной, что с влиянием ее на процесс гашения дуги можно не считаться.

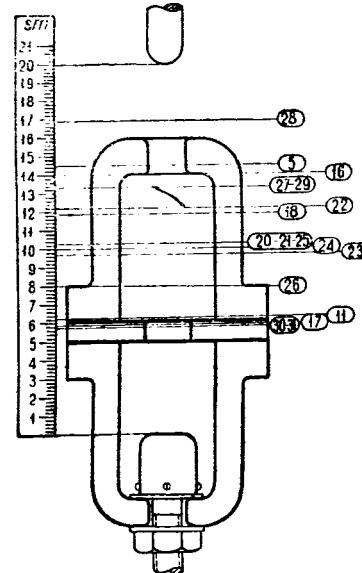


Рис. 3. Гашение дуги камерой водяного выключателя

Итак, гашение дуги гасильной камерой масляного выключателя происходит, как правило, по выходе подвижного контакта из камеры и обусловлено интенсивным охлаждением и десионизацией канала дуги, производимым быстро движущимся вдоль или поперек дуги потоком газов и паров масла.

Нам, как и Hilliard'у—изобретателю гасильной камеры „...трудно представить себе, каким образом произошло представление о том, что разрыв цепи всегда происходит в камере, так как разрывной промежуток, устроенный вне камеры, ясно указывает всем на то, что дуга вытягивается из камеры еще до разрыва“⁸⁾.

14 января 1934 г.

⁶⁾ F. Kesselring, Beitrag zur Lösung der Ölschalter-Problems, ETZ, 1927, № 35, стр. 1278.

⁷⁾ F. Kesselring, Electrische Schaltgeräte, Anlasser und Regler. Имеется русский перевод.

⁸⁾ J. D. Hilliard, Oil-Blast Phenomena in Circuit Breakers. „El. W.“ № 2, 1931, стр. 56.

Х Р О Н И К А

Работа Грэс Главэнерго за I квартал 1934 г.

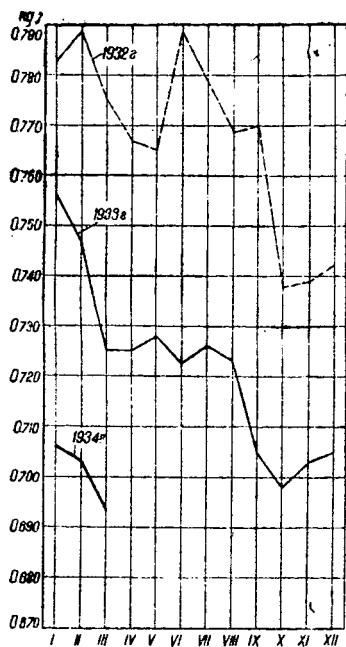


Рис. 1. Удельный расход условного топлива на 1 выработанный kWh в kg

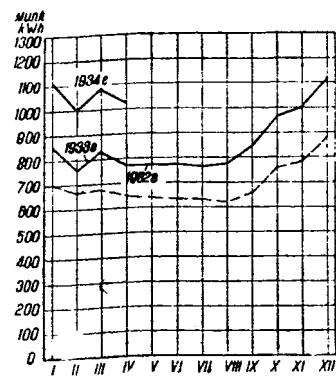


Рис. 2. Производство электроэнергии

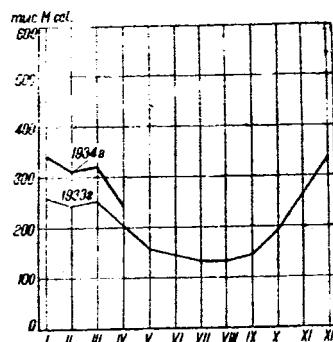


Рис. 3. Отпуск теплоэнергии

Удельный расход топлива на выработанный kWh/kg за I квартал 1934 г.

Производство электроэнергии (млн. kWh) за I квартал 1934 г.

Районные управ- ления и Энерго- комбинаты	Производство электроэнергии млн. kWh 1934 г.				По плану на I квартал 1934 г.	Процент выполне- ния плана за I квартал 1934 г.	Произв. зат. энер- гии за I квартал 1933 г.
	Январь	Февраль	Март	Итого за I квартал 1934 г.			
1. Мосэнерго .	302,86	266,65	286,58	856,09	884,5	96,8	744,07
2. Тэц ВТИ .	0,58	0,80	0,69	2,07	3,0	69,0	1,71
3. Ленэнерго .	177,62	151,01	167,05	495,68	500,0	99,1	433,15
4. Донэнерго .	186,00	168,31	185,26	539,57	525,0	102,8	382,56
5. Харэнерго .	27,26	24,57	24,67	76,50	75,0	102,0	49,68
6. Уралэнерго .	80,79	78,10	82,48	241,37	225,0	107,3	139,30
7. Горьковский ЭК .	55,81	48,84	52,19	156,84	150,8	104,0	117,61
8. Ивановский ЭК .	31,74	29,30	31,65	92,69	89,0	104,1	84,64
9. Ярославский ЭК .	11,26	10,92	13,06	35,24	36,0	97,9	27,73
10. Севкавэнерго .	42,48	37,90	39,91	120,29	115,0	104,6	99,31
11. Днепрэнерго .	76,38	78,40	87,55	242,33	237,0	102,2	112,62
12. Киевский ЭК .	16,64	14,74	15,47	46,85	45,5	103,0	34,66
13. Одесский .	15,50	13,88	15,31	44,69	43,0	103,9	36,11
14. Самарский .	5,71	5,24	5,45	16,40	15,8	103,8	13,50
15. Саратовский ЭК .	7,55	7,35	7,46	22,36	21,0	106,5	17,78
16. Сталинградский ЭК .	19,03	17,65	19,06	55,74	53,0	105,2	39,92
17. Казанский ЭК .	6,70	5,74	5,81	18,25	18,5	98,6	11,83
18. Воронежская гэс .	4,71	4,77	4,84	14,32	11,0	130,2	—
19. Брянский ЭК .	3,67	3,28	2,52	9,47	11,0	86,1	6,73
20. Белорусский ЭК .	6,99	5,50	6,84	19,33	18,0	107,4	15,27
21. Крымский ЭК .	4,39	3,88	4,10	12,37	11,0	112,4	9,93
22. Закэнерго .	17,15	18,17	19,88	55,20	60,0	92,0	26,09
23. Новосибирский ЭК .	4,88	4,32	4,38	13,58	12,1	112,2	9,26
24. Кондоположский ЭК .	0,76	0,64	0,61	2,01	2,3	87,4	3,22
25. Семипалатинская тэц .	—	—	—	—	2,3	—	—
26. Средазэнерго .	5,03	4,79	4,82	14,64	14,5	101,0	9,40
Итого по Главэнерго	1111,49	1004,75	1087,64	3203,88	3179,3	100,8	2425,59

Вологодская областная универсальная научная библиотека

1) Разница между цифрами этой графы и 100 указывает величину

Производство электрической энергии за I квартал 1934 г. достигло 3 203,88 млн. kWh против 3 179,3 млн. kWh, предусмотренных планом на I квартал. План перевыполнен на 0,8%. Против I квартала 1933 г., когда производство электрической энергии районными станциями Главэнерго достигло 2 425,58 млн. kWh, имеем прирост в 32,1%, т. е. значительно выше, чем запроектированный планом среднегодовой прирост за весь 1934 г. (22%). По подавляющему числу организаций Главэнерго план производства электроэнергии выполнен и перевыполнен. Заметное недовыполнение на 32%, объясняющееся принятыми здесь мероприятиями по экономии электро-

Районные управления
и Энергокомбинаты

Районные управ- ления и Энерго- комбинаты	Удельный расход условного топлива на выработанный kWh/kg 1934 г.				План за I квартал 1934 г.	Процент выпол- нения плана	Удельный расход топлива на выработанный kWh/kg за I квартал 1933 г.
	Январь	Февраль	Март	I квартал			
1. Мосэнерго .	0,659	0,653	0,645	0,652	0,668	97,6	0,658
2. Тэц ВТИ .	0,684	0,759	1,007	0,820	0,875	93,7	1,220
3. Ленэнерго .	0,725	0,757	0,741	0,740	0,710	104,2	0,786
4. Донэнерго .	0,697	0,687	0,677	0,687	0,690	99,6	0,750
5. Харэнерго .	0,736	0,724	0,719	0,727	0,730	99,6	0,880
6. Уралэнерго .	0,739	0,727	0,728	0,731	0,700	104,4	0,790
7. Горьковский ЭК .	0,587	0,595	0,590	0,630	0,630	93,7	0,670
8. Ивановский ЭК .	0,584	0,597	0,568	0,583	0,590	98,8	0,581
9. Ярославский ЭК .	0,714	0,685	0,665	0,687	0,720	95,4	0,701
10. Севкавэнерго .	0,749	0,730	0,703	0,727	0,703	103,1	0,790
11. Днепрэнерго .	0,749	0,783	0,714	0,747	0,773	96,6	0,781
12. Киевский ЭК .	0,877	0,865	0,858	0,867	0,824	105,2	0,891
13. Одесский .	1,103	1,081	1,075	1,087	1,090	99,7	1,091
14. Самарский .	0,646	0,632	0,646	0,639	0,698	91,5	0,702
15. Саратовский ЭК .	0,906	0,769	0,769	0,815	0,780	104,5	0,775
16. Сталинградский ЭК .	0,778	0,762	0,750	0,764	0,760	100,5	0,795
17. Казанский .	0,737	0,676	0,673	0,698	0,640	109,1	1,179
18. Воронежский .	0,856	0,782	0,766	0,801	—	—	—
19. Брянский .	0,939	1,055	1,095	1,022	0,870	117,5	0,962
20. Белорусский .	0,930	0,942	0,981	0,952	0,840	113,3	0,937
21. Крымский .	0,878	0,900	0,891	0,890	0,876	101,6	0,934
22. Закэнерго .	—	—	—	—	—	—	—
23. Новосибирский ЭК .	1,151	1,130	1,150	1,148	0,920	124,8	1,006
24. Кондопожский .	—	—	—	—	—	—	—
25. Семипалатинская тэц .	—	—	—	—	0,900	—	—
26. Средазэнерго .	0,562	0,488	0,527	0,545	0,470	115,9	0,458
Всего по Главэнерго .	0,706	0,703	0,693	0,700	0,700	100,0	0,743
То же не считая пусковых объектов, не включенных в план	0,706	0,699	0,688	0,698	—	—	—
Ленэнерго (без Дубровки) ¹⁾ .	0,739	0,730	0,711	0,727	0,710	102,3	0,786

1) Разница между цифрами этой графы и 100 указывает величину

ческой энергии в связи с топливными затруднениями, имеем лишь по Московской области. По Тэц ВТИ процент выполнения (15%) не характерен, так как эта станция находится еще в стадии наладки эксплуатации. По Брянску значительное недовыполнение на 13,9% обясняется отчасти известными неполадками с оборудованием этой станции и топливными затруднениями.

Наконец, по Закэнерго программа не выполнена на 8% в подавляющей части вследствие недобора энергии потребителями.

По централизованному отпуску тепла на-сторону имеет место 97,8% выполнения плана. За I квартал отпущено 977,9 тыс. М cal. Прирост к I кварталу 1933 г. составляет 30,2%. Выполнение плана I квартала 1934 г. по удельному расходу топлива составляет 102% (210 kg/M cal против 205 kg/M cal по плану) и расходу же за I квартал 1933 г. составляет 96,7%. Приведенные цифры сигнализируют, что в 1934 г. можно ожидать полного выполнения плановых наметок, хотя централизованное теплоснабжение и его планирование являются еще сравнительно молодым делом в СССР.

По удельному расходу топлива на 1 выработанный kWh отчетный I квартал 1934 г. дает снижение по сравнению с I кварталом 1933 г. на 5,7%. Удельный расход на I квартал 1934 г. планом намечен в 0,700 kg условного 7 000 cal топлива. План выполнен на 100%. В I квартале 1933 г. удельный расход составлял 0,743 kg условного топлива.

Существенны пережоги топлива в I квартале 1934 г. на станциях системы Ленэнерго, где удельный расход (без пусковой Дубровской гэс) достиг 0,727 kg, а с Дубровкой—0,740 kg против 0,710 kg по плану. Далее идут: Уралэнерго с пережогом в 0,024 kg, Киевский комбинат 0,043 kg, Саратовский 0,035 kg, Казанский 0,058 kg, Брянский 0,152 kg и Белорусский 0,112 kg. По сравнению с I кварталом 1933 г. удельный расход ухудшился по комбинатам: Саратовскому, Ивановскому, Брянскому и Белорусскому.

П. С.

БИБЛИОГРАФИЯ

М. М. МИХАЙЛОВ, Электротехнические материалы. Ленинград, 1933., 15 печ., л., 237 стр., цена 3 р. 50 к. (пер. 80 коп.).

Минувший 1933 г. был особенно продуктивен в части издания общих руководств, курсов и пособий по электротехническим материалам. Книги Окулова, Ренне и Карапеева, Александрова и Тареева, Хоецкого и, наконец, Михайлова пытаются усилиями одногодовых авторов предложить читателю более или менее широкий обзор, описание и систематику электротехнических (иногда—лишь электроизоляционных) материалов.

Более или менее удачно выполняя свою задачу, все указанные книги, в частности и рецензируемая здесь, страдают основным недостатком, который можно назвать относительной несерьезностью подхода к постановке и разрешению данной задачи. В результате вместо пяти частей одного основательного и безуказанных курса электротехнических материалов мы имеем пять весьма слабых и неосновательно сработанных курсов. Оговорки авторов и издательств, так же, как и указания на известную специфичность книг (т. е. что они, например, являются "записью читаемых лекций" и т. п.), вовсе не уменьшают ответственности за, очевидно, не совсем продуманное и не весьма согласованное разрешение задачи в части удовлетворения нужды наших электротехнических (в основном) кадров в соответствующем пособии.

Рецензируемая книга состоит из двух частей ("Проводники и магнитные материалы" и "Изолирующие материалы") или одиннадцати глав. Текст дополнен 159 рисунками и 94 таблицами. Как в конце каждой части, так и в постраничных сносках имеются библиографические указания, однако носящие характер случайности. Ни общего систематизированного библиографического, ни именного и предметного указателей в книге не имеется.

Обращаясь к оценке основных разделов книги, остановимся, во-первых, на разделе "Проводники и магнитные материалы".

Из предисловия автора вытекает, что сознательно уклонившись от вопросов технологии электротехнических материалов, он уделяет особое внимание выяснению их природы. Но и без такого ограничения этот раздел нельзя квалифицировать иначе как справочник.

Выясняя природу того или иного свойства проводниковых и магнитных материалов, автор в 1933 г. оперирует данными, в общем уже известными среднему электротехнику 20 лет назад. Однако к нему автор добавляет еще ряд неверных суждений. Например, на стр. 14 высказана неверная мысль о примесях "не образующих сплавов", но в то же время входящих в сплав. Сплав меди с за-кисью меди также полноправен, как и сплав олова с кадмием. На стр. 19 и далее высказано совершенно нелепое положение об особом влиянии пропажи на тонкие и толстые проволоки. Суть в том, что для сильных обжатий толстых проволок понадобились бы станины огромной мощности, что технически бессмысленно, если возможна горячая прокатка. Тонкие же проволоки в горячую катать практически невозможно и их поэтому тянут, сообщая им, естественно, любую степень наклепа, которую выдержит материал.

Утверждения на стр. 41 неправильны верно, что чугун-железо-кремне-углеродный сплав, неверно, что он же твердый раствор; основной чертой чугунов является их принадлежность к гетерогенным системам.

Почти вся 48-я страница занята изложением совершенно неверной точки зрения, в корне противоречащей экспериментальным фактам и теории. При более тщательном ознакомлении с цитируемыми им книгами автор познакомился бы с той аксиомой, что в твердых растворах коэрцитивная сила не растет до тех пор, пока не появится гетерогенность, т. е. механическая смесь. Этот вопрос является ключом к пониманию связи магнитных свойств сплавов со структурой. Для того

чтобы пояснить степень присяленной здесь поверхности утверждений, укажем, что, начиная с 1928 г., было опубликовано не менее 30 исследовательских работ, где правильная теория была подробно и многократно изложена (статьи Костера, Кусманна и Шаронова и др.). В популярной форме существующая теория потерь и проницаемости ферромагнитных сплавов изложена, например, в брошюре А. С. Займовского ("Производство и свойства трансформаторной стали" 1932 г., стр. 25 и др.). Таким образом в корне неверное описание важнейшего принципиального вопроса приводит к невозможности понять магнитные свойства сплавов.

Такого же типа ошибки наблюдаем и далее. На стр. 49, например, автор говорит о разложении цементита при старении закаленной стали на графит и железо. Выделением графита об'ясняется изменение коэрцитивной силы закаленных сталей при их старении. Но простой взгляд в любую из статей по закалке стали (число их превышает несколько сотен) показал бы автору, что при старении закаленной стали речь может идти либо об образовании молекул цементита, либо о коагуляции уже существующих в мартенсите молекул (или кристаллов) цементита. О распаде цементита при старении (когда в мартенсите его вообще, повидимому, нет) можно говорить лишь при условии полной неосведомленности в металловедении XX века. Нечего и указывать, что все рассуждения автора о диаграмме плавкости железоуглеродистых сплавов, получающихся структурах и связи их с магнитными свойствами, либо прямо не верны, либо не приводят ни к какому пониманию вопроса. Поражает неосведомленность о влиянии дисперсности в гетерогенных системах на магнитные свойства.

В целом мы имеем здесь лишь "справочник", когда местами автор не делает уже ни малейшей попытки что-либо об'яснять, по причинам, вполне понятным из вышеуказанных замечаний. Применяя "теорию" автора, мы должны ждать в твердых растворах рост гистерезиса. Однако, например, сплавы с высокой проницаемостью этому в корне противоречат, так же, как и трансформаторная сталь. С другой стороны, непонятно, почему кислород, включения, цементит ухудшают свойства мягкого железа, если они не входят в твердый раствор. Нелепость с распадом цементита на графит при старении закаленных магнитных сталей опять повторяется и на стр. 70-й. Резюмируя, можно сказать, что за из'ятием грубых опечаток (например, на стр. 55 ударное сопротивление дано в kg/cm², на стр. 57 сказано, что удельное сопротивление падает с ростом содержания кремния и т. д.) и дилетантских выражений в металловедческой части, мы имеем здесь удовлетворительно подобранный справочник, пригодный для поверхностного ознакомления со свойствами проводников и магнитных материалов.

Для технического использования этот справочник, конечно, недостатчен. Тщетно пытались бы читатели найти здесь конкретный материал по нагрузкам и теплоотдаче для проводников всех видов. Здесь нет данных о контактах, о защите их от коррозии, о необходимых давлениях в контактах и т. д. О проводниковом железе сказана лишь общая фраза, в то время как в СССР вышел ряд подробнейших трудов по этому вопросу. Наконец, отсутствие технологических данных завершает картину технической и педагогической бесполезности первых 70 страниц рецензируемой книги.

Часть II открывается главой об общих свойствах изолирующих материалов. Здесь мы находим много неточностей или неправильных утверждений. Например, на стр. 78 при истолковании зависимости проводимости от времени приложения напряжения неправильно утверждение, что ток, текущий вследствие проводимости (кривая С в рис. 57), не зависит в первые моменты от времени. Очевидно, что во время заряда конденсатора, когда напряжение в электродах

еще не достигает своего окончательного значения, этот ток нарастает от 0 до своего постоянного значения. Изложение двух типов распределения зарядов внутри диэлектриков как универсальных и единственных (рис. 58 и 59, стр. 80) неверно; это распределение выявлено как эффект загрязнения и без всякого сомнения установлено, что распределение зарядов в нормальных случаях является близким к линейному.

Описание метода измерения больших сопротивлений при помощи конденсаторов (стр. 92), безусловно, недостаточно в смысле описания лишь одного этого неудобного метода, вряд ли теперь где применяемого. Между прочим следовало бы в описании указать, что в случае применения конденсатора нельзя применять обычный гальванометр, но лишь баллистический.

Утверждение, что уменьшение сопротивления, описанное Пулем и Шиллером, обясняется поляризационной теорией, поверхностью и неверно (см. стр. 83). Указанное явление не так просто и мнение автора по этому вопросу никем до сего времени не доказано. Указание на литературу по измерению в области диэлектриков в виде двух старых и вовсе не фундаментальных книг не ценно, так как в 1933 г. мы имеем уже ряд более современных и содержательных книг.

Изложение автором разных теорий проведено не отчетливо, так, например, в изложении теории Хипеля о пробое твердых диэлектриков не ясно показан квантовый характер представлений Хипеля. К сожалению, вовсе отсутствуют указания на современные представления о теории проводимости ионных кристаллов, теоретическое обяснение формулы Вант-Горфа (28), которая приводится наравне с чисто эмпирической формулой Бенрата ([28] стр. 79).

Полемика против истолкования теории Вагнера (стр. 113) ведется без указания на то, что не теория, но некоторые популяризации вызвали ряд недоразумений.

В целом надо признать, что параграфы, относящиеся к вопросу о потерях, обработаны с достаточной тщательностью, чего нельзя сказать относительно главы о проводимости. Общая ошибка части II книги состоит в чисто формальном пользовании формулами без их обяснения и теоретического обоснования. Такая установка может быть иногда менее полезной, нежели простое удаление формул из текста. Цель автора—дать на протяжении 50 стр. книги понятие об общих свойствах диэлектриков—осуществлена не вполне удовлетворительно.

Глава IV (смолы, масла, компаунды и лаки) при более углубленном изложении по сравнению, например, с соответствующей частью книги С. О. Хоецкого (см. рецензию на нее в № 1 журнала „Электричество“ 1934 г.)—все же не удачна. Здесь особенно выступает момент трудности единичного овладения колossalным материалом, имеющимся в области почти каждого предмета рассмотрения. Напрашивается сравнение и не в пользу рецензируемой книги, с образцовым выполнением, например, таких книг, как R. Liesegang „Kolloidchemische Technologie“ или Houwen „Methoden der Orgchemie“, в которых каждая глава, посвященная тому или другому предмету, написана соответствующим специалистом, а вся книга представляет собой образцовое сочинение.

В рецензируемой книге дается довольно примитивное представление о строении естественных и искусственных смол. Неверно положение, что смолы—обязательно суть высокомолекулярные соединения. Не всегда полимеризация и конденсация ведут к повышению электрических свойств: иногда они в таких случаях ухудшаются.

В главе IV очень мало сказано о копалах, их добываче, свойствах и применении. В имеющейся таблице неверно освещена проводимость янтаря, не сказано об условиях растворимости и т. д. Немецкая классификация рычочных сортов шеллака смешана с английской и притом не “на Garnet—лак вовсе не „кусковой“, button—лак вовсе не „зернистый“, штоклак—не сырой с дерева.. Очевидно, что автор сам и не знал случая видеть эти лаки. О воске из шеллака сказано очень мало, нет данных о влиянии этого воска на клеющие и электроизолирующие свойства шеллака. Указана совершенно неправильная (100—130°) температура плавления канифоли. Также неверно сказано, что канифоль легко растворяется в спирту, бензине и бензоле.

Почему утверждает автор, что крезолы добываются только из каменноугольной смолы? Их также добывают и из других деталей. Гексаметилен тетрамин, по автору, получают действием амиака на „метилен“, что такое „метилен“?

В книге нет новейших данных о строении бакелита и сведения по этому вопросу приводятся из устаревшей книги проф. С. Н. Ушакова. Нет сведений о старении бакелита и не использованы последние данные в этой области. Абзац о глипталевых смолах, стироле и кумароновых смолах изложен очень упрощенно, нет критического подхода, нет формул строения..

Метод определения каплепадения по Убеллоде характеризован так (стр. 145): „он состоит в определении температуры, при которой у шарика термометра, облеченного битуменом, образуется капля его. Очевидно, здесь автор смешал этот метод с галицийским. Нет размежевания свойств естественных и искусственных асфальтов, нет указаний на преимущества гильсонита при изготовлении лаков и компаундов, нет определения понятия пеков, так как нельзя их характеризовать только как „остатки от других производств“.

Что и о монтанском воске; чем он отличается по химической природе от озекерита? Следовало бы также привести данные о кислото- и щелочестойкости восков (например, из статей, напечатанных в „Вестнике электротехники“ за 1931 г.).

Глава об эфирах целлюлозы весьма поверхность, следовало бы сообщить больше материала с применением более точных терминов.

Не удовлетворительны сравнительные данные о свойствах льняного и китайского древесного масел и их пленок: можно было бы использовать, например, указания Штегера; нет сведений о влиянии сиккативов и вообще солей металлов на электрические свойства масляных или лаковых пленок. Неудачна терминология автора для минеральных масел—„невысыхающие масла“ и противопоставление их маслам высыхающим, например, ляниному (известны, как невысыхающие и масла растительные; например—касторовое).

В главе о компаундах нет сведений о суррогатировании и замене компаундов, нет рецептуры лаков и компаундов из них заводов или хотя бы свойств ходовых сортов лаков и ко паундов (например, применяемых на заводе „Динамо“, ХЭМЗ и др.). Теория автора о причинах клейкости или не клейкости лаков (стр. 181) вряд ли заслуживает критики как легковесная и наивная.

Сведения о цементах неудовлетворительны, в частности, нет данных от наших заводов.

В разделе о пропитке дерева не использованы имеющиеся материалы. В разделе о пропитке лаками автор дает лишь отрицательные положения и никаких практических указаний. Его точку зрения нередко можно считать устаревшей, так как, например, в практике успешно применяются методы пропитки масляными лаками, что опровергает основательность им вынесенного автором смертного приговора. Бесспорен факт, что вопрос пропитки мало изучен и М. М. Михайлов это подтверждает приведением указаний двух авторов, рекомендующих для сушки обмоток два совершенно различных способа. Несомненно, что хорошее изучение процесса сушки должно привести к выводу, что разные обмотки, пропитанные разным способом и разным лаком, требуют совершенно разных режимов сушки. И если автор считает целесообразным указывать на заведомо бессмыслиенный процесс (Писли—длительная сушка без вакуума и потом в вакууме), то его оценку он должен был бы здесь привести.

В разделе о бумаге также имеется ряд неточностей: нельзя применять (стр. 186) сульфитную целлюлозу без особого препарирования при изготовлении бумаги для микарты,—отрицательный опыт здесь достаточно велик. Утверждение, что: все бумаги нестойки в отношении нагрева выше 100° (стр. 186)—в такой форме неправильно. Если стойкость понимать как стойкость неограниченно долгое время, то все бумаги нестойки, значительно ниже 100°. Некоторые же бумаги при определенных условиях могут работать длительное время при температуре выше 100°. „Критическая“ температура быстрого разложения целлюлозы лежит, безусловно, выше 100° (120—130°).

Мнение автора книги о причине независимости пробивного напряжения бумаги от влажности нам представляется искусственным. Это явление, так же как и зависимость пробивного напряжения, достаточно обясняются механизмом пробоя воздушных каналов (Геманта).

Приводимые в табл. 69 (стр. 195) данные о влиянии каналов рода волокна на электрическую прочность прессшпана не являются характерными для отдельного волокна. Кстати, укажем на часть опечаток, не отмеченных в приложенном к книге листке: стр. 104, 10 стр. сверху, вместо „зависимость от температуры“ следует... „Зависимость от толщины“, стр. 196, 23 стр. снизу, вместо „впадин“, очевидно, надо „пазов“ и стр. 15 снизу, вместо „пиртус“, очевидно „спирте“.

Автор уделил недостаточное внимание многим, очень существенным вопросам. Электроизолирующие материалы органического происхождения, наиболее широко применяемые в электротехнике, имеют, как известно, ограниченные и притом сравнительно не высокие пределы длительного воздействия повышенных температур. В эксплуатационных условиях при повышении допустимых температур происходит сравнительно быстрое старение и последующее разрушение изоляции машин и аппаратов. В настоящее время очень актуальной проблемой является повышение рабочих температур изоляции путем повышения ее теплостойкости. Применение материалов неорганического происхождения—один из путей для разрешения вышеуказанной проблемы, в частности, теперь обсуждаются и ставятся для проработки вопросы о более широком применении асбеста в машинной изоляции, о применении стекла в виде тонких пластин (0,01—0,02 мм) для изделий, подобных мицанитовым, о разработке базальтового кабеля, о применении оксидной, синтетической изоляции и т. д. К вопросу о повышении теплостойкости относится изучение применения полимеризующихся, в частности бакелитовых, смол для машинной изоляции и т. д. О всех указанных проблемах и задачах, несомненно, должен был бы быть освещен тот читатель, на которого рассчитана книга М. М. Михайлова, у которого здесь мы, однако, не находим должного внимания этим вопросам.

Отметим, что установка автора на преимущественное ознакомление студента со свойствами электроматериалов неполноценно без приведения достаточных указаний на их применение.

Материал справочного характера о мраморе, шифере и тальковых породах приведен в книге без достаточного обсуждения во-

соответствующих данных в исследованиях последнего времени имеется достаточное количество.

Глава III (Силикатные изолирующие материалы), так же как и предыдущая, содержит общизвестные данные, имеющиеся в электротехнических справочниках. Здесь также отсутствует должное научное обсуждение вопросов, в частности химических и особенно физико-химических процессов в производстве этих материалов. Физическому рассмотрению вопросов производства данных материалов вообще уделяют недостаточное внимание, между тем как физика дисперсных систем, вязкость, пластичность, твердость, пористость, электроосмос и т. д. здесь имеют большое значение.

Необходимо отметить полное отсутствие в книге данных о материалах, применяемых для изоляции при высоких температурах (1000° и выше). Несмотря на относительную новизну, эта проблема заслуживает пристального внимания. Ни для одного из рассмотренных в книге силикатных материалов автор не приводит данных о зависимости пробивного напряжения от температуры, нет данных о влиянии неоднородности электрического поля на пробивную напряженность этих материалов.

Особо подчеркивается отсутствие данных о структуре материалов, между тем как структура и свойства материалов вообще находятся в тесной связи и во многих случаях именно структура определяет свойства и может дать указание на возможное изменение последних в желательном направлении.

Глава IV (слюды и мицаниты) содержит чрезвычайно ограниченные сведения о слюде и еще более ограниченные о слюдяной изоляции. Нет данных о воздействии на слюду высоких температур, химических реагентов, ничего нет о зависимости диэлектрических свойств слюды от температуры, о диэлектрических свойствах слюды в направлении, параллельном плоскости спайности (резко отличается от свойств в направлении, перпендикулярном этой плоскости), о влиянии различных минералогических пятен на диэлектрические свойства слюды и т. д. Отсутствуют соответствующие данные о различных мицанитах в электромашинной изоляции. Указана неправильные значения теплопроводности микафолья и гибкого мицанита. Таким образом в отношении слюды материал, данный автором, совершенно недостаточен, между тем как слюдяная изоляция имеет весьма широкое и ответственное применение в электротехнике.

Не останавливаясь более на многочисленных ошибках, неточностях и недостатках рецензируемой книги, отметим ее сравнительную пригодность служить справочником при поверхностном ознакомлении со свойствами электротехнических материалов. Для студентов соответствующей специальности книга мало пригодна, несмотря на проявленную автором известную внимательность и эрудицию. Независимо от очевидных и добросовестных усилий автора книга не могла быть в целом вполне удовлетворительной по причинам, изложенным в начале этого отзыва.

Издана книга М. М. Михайлова хорошо; цена ее сравнительно не-высока.

А. С. Займовский, Ф. А. Квитнер,
Б. В. Максоров, М. И. Мантров,
А. П. Примаковский

Leitfaden der Elektrotechnik. Herausg. v. G. Bolz, F. Moller u. Th. Werr.—Bd. I, Teil 1 u. 2. Grundlagen der Gleich- und Wechselstromes, von F. Moeller und G. Bolz. B. G. Teubner, 1933, 208 стр., 152 рис., цена не обозначена.

В настоящее время имеется большое количество руководств по общей электротехнике на различных языках, разнообразных по объему и степени трудности изложения. Тем более велика ответственность рецензента, отмечающего вновь выходящий в свет курс электротехники как курс, выгодно отличающийся от ранее существовавших изданий. Именно с сознанием этой ответственности мы считаем вышедший в сентябре 1933 г. в издательстве Тейбнера первый том учебника общей электротехники Мелера, Больца и Веры выдающимся руководством.

Рецензируемая книга—пособие для студентов не электротехнических вузов и для инженеров, не являющихся специалистами в области электротехники, но которым требуется достаточно углубленное изучение основ общей электротехники. Первый том, составленный Мелером и Больцем, излагает основы теории и важнейших применений постоянного и переменного токов; второй том, печатающийся в настоящее время, авторами которого являются Мелер и Вер, будет излагать учение об электрических машинах.

Основные достоинства рассматриваемой книги—доведенная до высокой степени ясность и четкость изложения и хорошая систематизация поддаваемого материала. При сравнительно малом объеме книги количество сведений, даваемых ею, велико, причем общая компактность организации книги происходит отнюдь не за счет сжатости изложения общих вопросов теории токов и полей, которые развиты достаточно для легкого и быстрого усвоения. Большое внимание обращено на иллюстрации из области прикладной электротехники—числовые и конструктивные примеры, обращено внимание на электротехнические нормы (отметим, что с методической стороны мы считаем необходимым проводить изучение норм, начиная с первых концепций изучаемых технических дисциплин), освещены самые разнообразные приложения электричества; в то же время достаточно глубоки и теоретические сведения.

Начало изложения исходит из предположения о том, что понятие электрического тока, замыкания и размыкания цепи и т. п. общизвестны; далее дается определение основных величин в цепи тока и связи между ними различные схемы соединений, описываются энергия и различные действия тока, дается теория магнитных и электрических (весьма кратко) полей и затем излагается теория переменных токов. К числу наиболее удачных глав принадлежат раздел теории магнитного поля и теории переменных токов. Изложение законов переменных токов весьма обстоятельно и иллюстрируется большим количеством векторных и развернутых диаграмм. Особо следует отметить весьма наглядное выполнение диаграмм: как на векторных, так и на развернутых диаграммах токи (векторы и синусоиды) вычертены красными линиями, напряжение—синими линиями. Это придает чертежам особую выразительность.

Издана книга безукоризненно.

Инж. Б. М. Тареев

ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

Электромашиностроение

W. C. PEARSON, Новый сварочный агрегат постоянного тока „Iron and Steel Engineer“, August, 1933, pp. 209—210.

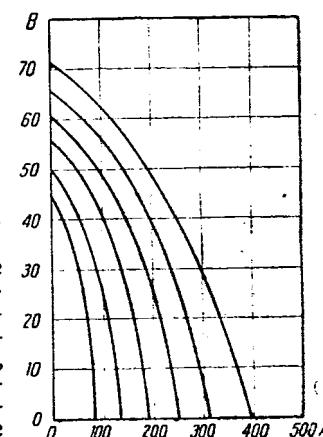
Большинство работающих сварочных машин для однопостовой работы имеют серийную обмотку возбуждения, соединенную против поля независимого возбуждения. Машины этого типа имеют падающие характеристики (рис. 1). Машины с такими характеристиками не обладают еще всеми необходимыми свойствами, требующимися при сварке. Кривые рис. 1 получены путем включения постоянного сопротивления во внешнюю цепь генератора и записи падения напряжения в сопротивлении и значений проходящего по сопротивлению тока при установленных условиях; величина сопротивления каждый раз менялась, и в результате было получено семейство кривых.

Однако в условиях сварки сопротивление цепи непрерывно меняется в относительно широких пределах в течение very короткого промежутка времени. Эти изменения вызываются разными причинами. Во-первых, свариваемый предмет в месте сварки и электродная проволока при расплавлении находятся в непрерывном движении, вызывающем непрерывное изменение расстояния между деталью и электродом, даже если сварщик устойчиво держит дугу.

Во-вторых, стекающие с конца электрода капли металла различной величины также вызывают изменения сопротивления дуги. Наконец, сварщик не может совершенно однообразно подавать электрод к свариваемому предмету, чем вызываются дополнительные изменения сопротивления дуги. Поэтому для сохранения надлежащей величины тока необходимо, чтобы генератор почти мгновенно менял напряжение соответственно изменениям сопротивления цепи.

стигать пяти-восьмикратной величины нормального рабочего тока. Для уменьшения этих колебаний такие генераторы снабжены реакторами. Однако при помощи реакторов невозможно получить достаточно быстрое изменение напряжения генератора, так как при установке реактора с достаточно большим индуктивным сопротивлением дуга становится неустойчивой. Кроме того, большие реакторы заметно увеличивают стоимость оборудования.

Фирма Westinghouse разработала новый метод быстрого изменения напряжения генератора в соответствии с изменением сопротивления дуги и выпустила новые сварочные агрегаты, работающие по этому методу. Эти агрегаты снабжены стабилизаторами, резко отличающимися от применявшихся до последнего времени реакторов. Стабилизатор представляет собою трансформатор, первичная обмотка которого состоит из небольшого числа витков из шинной меди достаточного сечения, чтобы пропустить рабочий ток генератора, а вторичная обмотка состоит из большого числа витков примерно такого же сечения меди, как и обмотка независимого возбуждения. Вторичная обмотка соединена последовательно с обмоткой возбуждения генератора. Ток, проходящий через первичную обмотку стабилизатора, индуцирует напряжение во вторичной обмотке, которое



изменения напряжения генератора почти мгновенно следуют за изменениями сопротивления дуги и при надлежащем расчете различных элементов цепи прикоснение электрода к свариваемому предмету не вызывает броска тока.

Новые сварочные генераторы Westinghouse имеют жесткие валы диаметром 75 мм и более в зависимости от размеров установки. Применение столь тяжелых валов имеет целью свести к минимуму их дрожание, являющееся часто причиной аварии.

Инж. Р. Хайнер

Опыты по использованию нестационарного режима вольтовой дуги для регулирования динамической характеристики сварочной машины были проведены в электросварочной лаборатории ВЭИ еще в 1931 г. над машиной типа Кремера в изготовлении завода „Электрик“.

Ред.

Быстрый метод испытания якорей. — The Electrical Times № 2192, October 1932, p. 544.

Следующий простой метод предлагается для проверки обмоток и коллекторов тяговых моторов постоянного тока. Способ этот разработан для напряжения 550 V, но испытание можно изменить на любое напряжение, требуемое техническими данными.

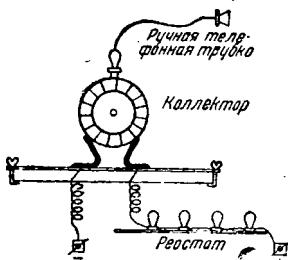


Рис. 1

Для этого испытания применяется ручной телефон, соединенный с ручкой, имеющей контакты, плотно прилегающие к коллектору. При этом испытании оператор должен быть для безопасности хорошо изолирован от земли.

Ручка ставится таким образом, чтобы контакты прилегали к седим пластинам.

Если изоляция хорошая, то оператор услышит в телефон ясный звук. Затем якорь поворачивается и испытывается другая пара пластин.

Если пластины замкнуты, то звук будет неслышен или слабо слышен, что будет зависеть от степени сопротивления замыкающего пластины. Способ этот очень несложен и рентабелен.

Инж. В. Баев

Электрификация транспорта

LOUER P. Новая схема пуска автоматических тяговых подстанций при приближении поезда „La Traction Electrique“, 1933, № 12, pp. 253—254.

Автоматический пуск тяговых подстанций обычно производится или от контактных часов, или от реле, реагирующего на падение напряжения в контактном проводе против данной подстанции.

Неудобство применения контактных часов особенно резко чувствуется при малом числе поездов, так как время включения и выключения подстанции приходится ставить с известным „запасом“ против того, которое необходимо по расписанию, вследствие чего время холостой работы подстанции будет большим.

Недостатком включения подстанции от реле, реагирующего на падение напряжения в контактной сети около данной подстанции, кроме необходимости в постоянно работающей ручной или автоматической подстанции, поддерживающей напряжение в контактном проводе, является невозможность при параллельном питании контактной сети добиться селективного пуска, т. е. того, чтобы пускалась только ближайшая к поезду подстанция без пуска всех остальных.

Достижение такого селективного пуска подстанций осуществляется применением схемы рис. 1 (французский патент 724044). Подстанции 1 и 2 предназначены для параллельной работы на контакт-

ную сеть двух путей 4 и 5 через контакторную будку 3, работающую по американской схеме (с общей шиной).

Быстро действующие автоматы фидеров подстанций и контакторной будки нормально включены. В этих фидерах имеются шунты, питающие дифференциальные реле D, которые управляют пуском подстанций 1 и 2 напряжение в контактной сети поддерживается постоянно работающей подстанцией, находящейся в наиболее нагруженной части электрифицированной дороги. На схеме эта подстанция не показана, но направление токов дано в предположении, что она находится влево от подстанции 1. Пусть в точке 10 между контакторной будкой 3 и подстанцией 2 происходит пуск поезда. Токи в фидерах 14-14 и 15-15 всех подстанций, расположенных между постоянно работающей подстанцией и местом пуска поезда, например, на подстанции 1 остановлены. Следовательно, дифференциальное реле не будет реагировать. На ближайший к месту пуска ток будет идти лишь в тех фидерах, которые отходят в сторону контакторной будки 3, равновесие токов дифференциальных реле нарушится, контакты их замкнутся и включат подстанцию. Когда поезд пройдет контакторную будку 3 и окажется в правом плече подстанции 1, то равновесие токов дифференциальных реле этих подстанций нарушится. Действительно, токи, идущие к подстанции 1 от постоянно работающей подстанции по фидерам 14 и 15, примерно равны между собой вследствие равенства сопротивлений контактной проводки того и другого пути; токи, отходящие от подстанции 1, не равны, так как по фидеру 14 включена только часть контактного провода 4, прилегающая к подстанции 1, а по фидеру 15 весь перегон от подстанции 1 до будки 3 по пути 5 и прилегающая к будке часть контактной проводки пути 4. Следовательно, приходящий по равно нагруженным фидерам 14 и 15 ток разветвляется на две неравные части, это вызовет нарушение равновесия дифференциальных реле и пуск подстанции 2. Остановка подстанции 2 произойдет после первого же выключения тока поездом, прошедшим контакторную будку 3.

Описанная схема не найдет широкого применения на электрических дорогах СССР с их густым движением и беспрерывной нагрузкой подстанций в течение всех суток. В отдельных случаях, например, для концевых подстанций длинных пригородных линий как Софрино или Загорск Северных ж. д., где в зимние вечера продолжительные промежутки времени подстанции не имеют нагрузки, описанное устройство может дать экономию энергии на холостой ход подстанций.

Настоящая схема характерна для пораженного кризисом капитализма, изыскивающего способы экономного использования громадных капиталовложений, ставших излишними в результате падения спроса на перевозки.

Инж. В. Соловьев

HIERZELLER. Троллейбусная линия в Лозанне „BBC Mittelungen“ 1934, № 3, стр. 58—60

От пристани до центрального вокзала в Лозанне (Швейцария) сообщение поддерживает канатная дорога и трамвайная линия. Неудобство канатной дороги заключается в том, что от пристани до нижней станции этой дороги надо пройти пешком несколько сотен метров; неудобство трамвайной линии в том, что она проложена в обход 1500-м 85% (!) подъема, отделяющего пристань от вокзала.

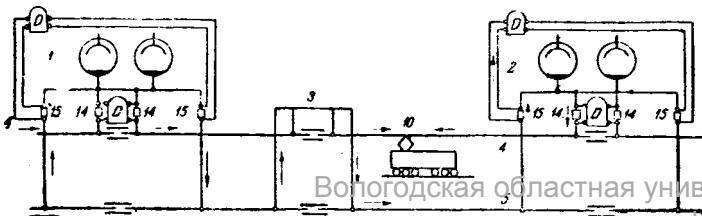
Однако этот подъем не представляет затруднений для троллейбуса на пневматиках, который в порядке опыта былпущен на этом участке с 1 ноября 1932 г.

Троллейбус имеет:

Длину кузова	8 600	мм
Ширину кузова	2 370	"
Высоту кузова	2 750	"
Расстояние между передней и задней осями . . .	5 800	"
Мест для сидения	24	
Мест для стояния	20	
Часовая мощность мотора	87,5	л. с.
Передаточное число оборотов задняя ось—		
вал мотора	1 : 9,5	
Скорость на площадке	40	km/h
" 50% подъема	28	
" 85% "	25	
Напряжение между контактными проводами . . .	650	V
Тару	8,4	t

Тяговый двигатель—последовательного возбуждения с самовентиляцией. Передача подобна автомобильной, но не имеет коробки скоростей. Управление с помощью педального контроллера через посредство контакторов, питаемых от аккумуляторной батареи 24 V. Токоприемник служат две тонкостенные стальные штанги длиной по 6 м, которые позволяют троллейбусу проходить по всей мостовой от одного тротуара до другого.

Электробус имеет три тормоза:—тормоз „короткого замыкания“ для электродинамического торможения двигателем на реостаты, пневматический тормоз, действующий на все 4 колеса, и ленточный тормоз на вал двигателя. Электродинамический и воздушный тормоза работают от отдельных моторов.



Кузов имеет раму из высококачественной стали, обшивка у опытного троллейбуса из тонкой листовой стали, у других—из легкого, противостоящего коррозии сплава „Антикородаль”, содержащего алюминий, магний и марганец. Освещение и отопление кузова производится от контактного провода, кроме нескольких ламп дежурного освещения, питаемых от аккумуляторной батареи.

Удачный опыт эксплуатации первого троллейбуса привел к тому, что к концу 1933 г. число троллейбусов увеличено до трех.

Инж. В. Соловьев

Об электрической тяге на участке Нью-Йорк — Филадельфия. „ETZ“, 28/XII 1933, стр. 1270

С середины января 1933 г. на линии длиной в 147 км между Нью-Йорком и Филадельфией стала применяться электрическая тяга поездов. Сначала таких поездов было только четыре пары, а затем эта линия полностью перешла на электрическую тягу. При пробных поездках, которые были совершены перед открытием регулярного движения, было установлено, что на пробег участка нужно около 81 мин, включая же трехкратные остановки,—102 мин; по прежнему же расписанию, при паровозной тяге и при одной остановке для смены паровозов, требовалось ровно 2 часа.

Работающие здесь электрические локомотивы имеют по 6 моторов общей мощностью в 3 400 л. с. Тяговое усилие 24,3 т. Вес локомотива около 180 т, из которых приходится на 3 ведущих оси по 36,3 т. Локомотивы построены на скорость в 145 км/ч. При пробных поездках они везли по 13—18 пассажирских вагонов весом по 77 т на горизонтальном пути на подъеме с 1/200 длиной в 30 км. Питающий ток переменный 25 Гц напряжением 11 кВ.

Дальнейшим шагом электрификации будет введение электрической тяги поездов на линии от Нью-Йорка до Вильмингтона, на юг, а вслед затем до Паоли в направлении на запад. К этому моменту понадобится иметь 72 электрических локомотива (в первое время требовалось только 12), причем общая длина сети Пенсильванской железной дороги с электрической тягой поездов дойдет до 233,5 км. Все ветви, сходящиеся в Филадельфии, будут тогда электрифицированы. Стоимость всех потребных для этой цели расходов около 100 млн. долларов.

Инж. И. И. Тихонов

Новый электрический маневровый локомотив австрийских железных дорог. „ETZ“, 5/X 1933, стр. 969

Обыкновенные паровые локомотивы при маневровой службе с большими остановками мало выгодны с хозяйственной стороны, так как расходуют топлива на тонно-километр в 3—5 раз больше, чем поездные. Вследствие этого уже давно пытаются заменить их дизель-электрическими и т. п. Управление австрийских железных дорог, очень много занимавшееся изучением этого вопроса, выработало и ввело в употребление для этой работы на своих сетях, работающих на однофазном переменном токе напряжением в 15 000 В, специальные локомотивы с верхним подводом тока. Локомотивы эти, которых теперь уже 21, имеют следующую характеристику: мощность часовая—950 л. с., длительная—775 л. с. Тяговое усилие часовое 9 600 кг, длительное—6 900 кг. Наивысшая скорость 40 км/ч. Вес в рабочем состоянии—56,0 т. Вторая и четвертая оси игры не имеют, а две другие могут свободно перемещаться в сторону на ± 25 мм. Вследствие этого локомотив этот может проходить по кривой радиусом в 90 м.

Все рукоятки от механизмов и все приспособления так устроены, что машинист может на них действовать и тогда, когда он глядит из окна. Электрическое оборудование сделано с большим вниманием, особенно по мотору. Мотор этот двенадцатиполюсный. Наибольшее число оборотов у него 900 в минуту. Диаметр коллектора 830 миллиметров. Он вполне безупречно работает и при самых малых скоростях (на горках—только 2 км/ч).

Инж. И. И. Тихонов

Электроматериалы

Применение алюминия в электротехнике. „Е. и. М.“, № 3, 1932, стр. 49.

Воздушные линии передачи. Начиная с 1926 г., в течение пяти лет в Европе были сооружены воздушные линии передачи из алюминия или его сплавов общим весом около 4 400 т. Поломки отдельных жил алюминиевых проводов, наблюдавшиеся раньше у клемм и объяснявшиеся вибрациями проводов из-за ветра, в настоящее время полностью устранены путем надлежащей конструкции клемм. Так называемая алюминиевая краска представляет собой весьма надежное и стойкое покрытие для металлических опор в линиях передачи.

Распределительные устройства. При применении алюминия в распределительных устройствах для большой силы тока получается экономия в весе по сравнению с медью до 50%. Преодолеватели с плавкими вставками из алюминия как нельзя лучше пригодны для установки в небольших помещениях. Вследствие

Электрическая аппаратура. Якоря и тормозные диски в счетчиках изготавливаются почти исключительно из алюминия благодаря его высокой проводимости и малому удельному весу, что облегчает нагрузку для всех опор тонкого механизма. Помощью простого химического способа можно покрывать алюминий изолирующей оксидной пленкой, которая выдерживает нагрев до 400° С. Это позволяет применять алюминий с оксидной пленкой в качестве материала для обмоток подъемных электромагнитов для подъема нагретых предметов, для тормозных магнитов и т. д.

Электрические машины и трансформаторы. Изготовление асинхронных моторов с короткозамкнутым ротором с одинарной и с двойной беличьей клеткой чрезвычайно упростилось благодаря заливке алюминием под давлением пазов ротора. Заодно отливаются и кольца, и, таким образом, беличья клетка представляет собой одно общее целое, тесно связанное со всем железным пакетом. Такая конструкция повышает механическую прочность ротора и улучшает условия охлаждения. Как показал опыт, железо ротора при подобной заливке николько не страдает.

Применение алюминия в качестве проводникового материала в обмотках роторов у синхронных генераторов и для неподвижных обмоток с большими сечениями имеет за собой преимущество более легкого монтажа и уменьшения общего веса машины. У синхронных машин и трансформаторов с алюминиевой обмоткой по сравнению с медной обмоткой при равных мощностях и при одинаковой нагрузке получаются следующие соотношения:

	Генераторы	Трансформаторы
При алюминии линейные размеры больше на . . . %	4	7
При алюминии потери в железе и в обмотках больше на . . . %	15	21
При алюминии вес обмотки меньше на . . . %	41	37

Алюминиевые провода, предназначенные для катушек трансформаторов, покрываются оксидной пленкой и погружаются в особую защитную массу, обладающую высокой теплостойкостью. Эта масса придает катушкам большую прочность и защищает их от проникновения влаги.

Опытный трансформатор в 20 кВА, 6 000/380 В с воздушным охлаждением, изготовленный с подобными катушками, мог выносить 100% перегрузки, причем нагрев катушек сверх температуры окружающего воздуха доходил до 200° С.

Л. Г.

Аппаратура

Выключатель с автоматическим размыканием. „The Engineer“, 27/X 1933, стр. 414

Этот выключатель применяется в тех случаях, когда в сети возникают небольшие неисправности. Его можно замкнуть три раза подряд, увеличивая в каждом случае время выдержки, но после третьей операции выключатель остается открытым, и индикатор указывает линейному монтеру участок, где имеется неисправность. Небольшие неисправности на воздушных линиях, которые при применении обычных выключателей увеличивают число долгих перерывов в питании электрической энергией, в данном случае устраняются автоматически. Время, необходимое для возобновления питания, сводится до минимума.

Механизм заключен в небольшую стальную коробку, которая выполняет роль обычной рабочей рукоятки и которая расположена на основании полюса. Она вращается от руки и может быть установлена на одну, две или три операции размыкания. Если инспектор при осмотре полюса найдет, что выключатель по какому-либо случаю замыкается один раз или дважды, но неподвижен в цепи, он может установить механизм на полное число операций, не прерывая цепи.

Механизм работает вполне автоматически и не имеет мотора или какого-либо другого электрического механизма. Энергия, необходимая для работы выключателя, запасается в мощной спиральной пружине, заключенной в непроницаемый для пыли кожух, через который проходит вал, на который опирается пружина. Кривошип, расположенный сзади кожуха, передает движение выключателю при помощи шатуна, нового посадочного хода замедляется при помощи ударного стакана с той целью, чтобы дать необходимую выдержку времени между замыканием и размыканием. Обычный рекомендуемый промежуток времени равен приблизительно 30 сек. Когда выключатель замыкается электрически, действие рукоятника освобождает автоматический размыкающий механизм, который сразу же начинает замедленный новый посадочный ход, сопровождаемый быстрым ходом замыкания. Если при этом остается ток короткого замыкания, выключатель

третьей операции размыкания выключатель вполне открыт, то он автоматически затормаживается и должен быть переставлен от руки после устранения неисправности.

При помощи рычага, находящегося с нижней стороны кожуха, можно в любое время открыть рубильник и при этом невозможно медленно выключить ток. Движением рычага влево выключатель замыкается и имеются средства для запирания рычага в начальном и

конечном положениях. Индикатор, установленный на передней части кожуха, указывает сразу количество операций размыкания, на которые установлен механизм, и когда выключатель "свободен". Здесь учтена также возможность, что прибор может обслуживаться неквалифицированными лицами, причем перекручивание устраивается при помощи остановочного механизма.

Инж. А. П. Шингель

Поправки

По вине автора и редакции в статью инж. С. И. Тетельбаума, "Параметрическое возбуждение в электротехнике", помещенную в № 5 "Электричество" 1934 г., вкрались следующие опечатки:

Напечатано

Должно быть

Стр. 21 левый столб. первая снизу формула

$$\frac{\Delta C}{C} = K$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 2K$$

Стр. 23 прав. столб. 26 строка сверху

$$\delta_0 = \frac{R}{2L_0}; T = \frac{R}{\omega_0 L_0}$$

$$\delta_0 = \frac{R}{2L}; T = \frac{R}{\omega_0 L_0}$$

Стр. 24 лев. столб. 10 стр. снизу

$$f = \frac{m \cdot n}{2}$$

$$f = \frac{m \cdot n}{120}$$

Стр. 26 лев. столб. 4 стр. снизу

возбуждение генератора было включено

возбуждение генератора было выключено

Стр. 26 прав. столб. 1 стр. снизу

считают возможность явлений исключенной

считают возможность явлений резонансного характера исключенной

В № 7 журнала "Электричество" 1934 г. в заметке "Приборы для исследования перенапряжений", в отделе хроники по вине редакции имела место досадная опечатка:

Напечатано:

Стр. 5, 2-й столбец
11-я строка снизу

Опытная эксплуатация клиодиографа ЛЭФИ . . .
показала безобразную работу механизма

Должно быть:

Опытная эксплуатация клиодиографа ЛЭФИ . . .
показала безотказную работу механизма

ОНТИ—ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Технич. редактор Г. Г. Андреев

РЕДКОЛЛЕГИЯ: инж. Е. С. Авактов, проф. В. И. Вейц, инж. В. Н. Глазанов, инж. М. Н. Грановская, инж. Я. А. Климовицкий, акад. Г. И. Кржижановский, инж. А. М. Николаев, инж. И. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, инж. Н. А. Сазонов, проф. М. А. Шателен, акад. К. И. Шенфер, проф. Я. Н. Шашльрейн. **ОТВ. РЕДАКТОР** инж. Н. А. Сазонов.

Сдано в набор 20/V—34 г. Подписано к печати 28/VI—34 г. Бумага 62×94. Печатных листов 6,5. Печатных знаков в листе 78 800

Уполн. Главл. В—88289

Москва, тип. Госбанка СССР, Неглинная, 12. Зак. 1863

Тираж 10 000+200

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ

30 июня с.г.
истекает срок полугодовой
подписки на журнал

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Во избежание перерыва в высылке
журнала не забудьте заблаговре-
менно возобновить подписку

Подписная цена
за 6 месяцев
12 руб. 50 коп.

Заказы и деньги направляйте по адресу:
Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27,
Главная контора периодических и подписных
изданий

ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru



■ ■ ■ ОТКРЫТА ПОДПИСКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ СССР

Под общей редакцией А. В. Винтера, Г. М. Крижановского и Г. И. Ломова

ИЗДАНИЕ СОСТОИТ ИЗ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ
ЧАСТИ И ТЕКСТОВОЙ.

КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ СОДЕРЖИТ:

- 16 районных карт природных энергетических ресурсов всех областей, краев и республик СССР;
1 сводную карту энергоресурсов СССР;
1 карту ветроэнергетических ресурсов СССР;
1 карту гелиоэнергетических ресурсов и
1 лист (таблицу) условных обозначений к картам

ТЕКСТОВАЯ ЧАСТЬ СОСТОИТ ИЗ 2-Х ТОМОВ

Все издание выйдет из печати и будет разослано подписчикам к 1 ноября 1934 г.

Подписчики получат дерматиновую папку формата 38 × 56 см² для карт Энергоатласа и две папки для I и II томов текста.

Подписная цена 135 рублей.

При подписке вносится задаток в размере 25 руб.
Остальные 110 руб. уплачиваются по мере получения издания наложенным платежом.

Пересылка АТЛАСА производится наложенным платежом, по действительной стоимости за счет подписчика.

Подписку и деньги направляйте по адресу:
Москва, 19. Гоголевский бульвар, 27, Главная контора периодических и подписных изданий ОНТИ „Техпериодика“ и Ленинград, проспект 25 октября, внутри Гостинного двора, помещение 100 — „Техпериодика“.

Деньги переводите по почте или перечисляйте
на расчетный счет „Техпериодика“ № 3708, в Московской областной конторе Госбанка.

Подписка принимается также всеми отделениями,
магазинами, киосками и уполномоченными „Техпериодикой“ и Книгосбыта.

ПРОСПЕКТЫ ВЫСЫЛАЮТСЯ ПО ПЕРВОМУ ТРЕБОВАНИЮ.

— КНИГОСБЫТ — ОНТИ —

в | оступил
| родажу

■ ■ ■ Англо-русский технический **СЛОВАРЬ**

Словарь содержит
100 000 слов и выражений
из основных областей
науки и техники

Под ред. инж. А. Чернухина

Гостехтеоретиздат 1934, стр. 1216, цена в перепл. 11 руб.

Продажа во всех книжных магазинах и киосках
КНИГОСБЫТА и КОГИЗа

Заказы по почте наложенным платежом без задатка направлять:
Москва, Мясницкая, 6. Книжный магазин ОНТИ, № 1

ОНТИ

Энергоиздат

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1934 г. НА ЖУРНАЛ „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Год издания 55-й

Орган Главэнергопрома и Главэнерго НКТП, Энергетического института академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерно-технической общественности (ВЭИ-РНИТО)

20 номеров в год

Подписная цена:

**на 6 мес. . . 12 р. 50 к.
на 3 мес. . . 6 р. 25 к.
Отдельн. номер 1 р. 25 к.**

В группе энергетических журналов СССР „Электричество“ является основным руководящим научно-техническим органом, рассчитанным на квалифицированных работников электропромышленности и электрохозяйства.

Программа журнала: Современные научно-исследовательские, теоретические и практические проблемы электротехники и, в частности, вопросы электро-машинно- и аппаратостроения и техники высоких напряжений. Наиболее важные технические и технико-экономические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации электростанций и вопросы электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Освещение работы электротехнических научно-исследовательских институтов и крупнейших лабораторий. Освещение работы важнейших энергетических съездов, конференций и ВЭИТО. Основные вопросы подготовки кадров, рационализации и стандартизации в электропромышленности и электрохозяйстве. Критическая библиография о вновь выходящей электротехнической литературе. Обзоры электрификации СССР и капиталистических стран. Рефераты на статьи в иностранной электротехнической печати.

Подпишите на журналы и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“. Подпись принимается отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ всеми почтовыми отделениями и письмоносцами.

**ОНТИ
ЭНЕРГОИЗДАТ**

**ОНТИ
ЭНЕРГОИЗДАТ**

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 2-е полугодие 1934 года

на ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

6 НОМЕРОВ В ГОД

ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА:

освещать технико-производственные проблемы электрозвозостроения и производство электрооборудования для тепловозов, мотор-вагонов, метрополитена, трамвая, электробусов и электрооборудования электрических железных дорог.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН:

на инженеров, техников, студентов и квалифицированных рабочих.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на 12 мес. (6 номеров) — 12 руб., на 6 мес. (3 номера) — 6 руб. Цена отдельного номера — 2 руб.

ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ И ДЕНЬГИ НАПРАВЛЯЙТЕ ПО АДРЕСУ:

Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“, Москва, 19, Гоголевский бульвар, д. 27.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ:

отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами Когиза, всеми почтовыми отделениями и письмоносцами.

АДРЕС РЕДАКЦИИ: Москва, Неглинная, 8/2

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

**ОНТИ
ЭНЕРГОИЗДАТ**

**ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ
на 1934 год**

**ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ
СЛАБОГО ТОКА**

Орган Всесоюзного объединения электро-
слаботочкой промышленности (ВЭСО).

Рассчитан на инженеров, техников, студентов
и высококвалифицированных рабочих.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Главэнергопрома,
ВЭНИТО и Энергетического
института академии наук СССР

Рассчитан на квалифицированных рабочих
электропромышленности и электрохозяйства.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—12 р. 50 к., на 3 мес.—6 р. 25 к.

Отдельный номер—1 р. 25 к.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОРГАН
ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров-энергетиков и учащихся вузов.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—8 р.,
на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

**ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**

имени
Ф. Дзержинского

Орган ВТИ имени Ф. Дзержинского.

Рассчитан на инженеров, техников и студентов втуз.

10 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—10 р. Отдельный номер—2 р.

ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЕ

Орган Всесоюзного дизельного
объединения, научно-исследова-
тельского института дизель-
строения и научно-технических обществ дизелестроителей.

Рассчитан на ИТС заводов, сотрудников институтов, пре-
дпринимателей вузов и техникумов и инженерно-технический
персонал дизельных установок и судов.

6 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—5 р. 40 к. Отдельный номер—1 р. 80 к.

ТЕПЛО и СИЛА

ОРГАН
ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров-энергетиков, инженерно-техни-
ческих работников электростанций и студентов вузов.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к.
Отдельный номер—1 р. 50 к.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Орган Гидроэлектропроекта, Сектора водных ресурсов Госплана
СССР, Гидротехники, Института гидротехники и гидроэнергетики,
исследовательского института строительной гидротехники и
инженерной гидрологии, Союзводстроя и Средволгостроя

Рассчитан на инженерно-технических работников, занятых про-
изводством и эксплуатацией гидротехнических сооружений.

10 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—7 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

ВЕСТНИК КОЧЕГАРА

Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального
бюро по обучению рабочих теплосылкового хозяйства.

Рассчитан на конечеров стационарных и судовых
котельных установок, на машинистов, на началь и
средний администрации-технический персонал.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
1 р. 80 к., на 3 мес.—90 к. Отдельный номер—30 к.

Подпись на журналы и деньги направляйте по адресу:

Москва, 19, Гоголевский бульвар, д. 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“.

Подпись принимается отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удосто-
верениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗа, всеми
почтовыми отделениями и письмоносцами.

Вниманию подписчиков 1934 г.: С 1-го января 1934 г. Главной конторой „Техпериодика“ ОНТИ организована специальная
экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 г. обращайтесь непосредственно в адрес конторы.

В 1934 г. все журналы ОНТИ будут экспедированы по ярлычной (адресной) системе.

ПОДПИСКА МЕНЬШЕ ЧЕМ НА 3 МЕС. НЕ ПРИНИМАЕТСЯ.

**ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ
ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА**

Рассчитан на инженерно-технический персонал
 заводов ВЭТ и инженеров электротехников.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—9 р.,
на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 80 к.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ
Выпуск ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ**

РЕФЕРАТНЫЙ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров и техников.

10 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—8 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОМОНТЕР

Орган Гла-
вэнергопрома

Рассчитан на квалифицированного электромонтера,
младший и средний техперсонал и прорабов.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—4 р. 20 к., на 3 мес.—2 р. 10 к. Отдельный номер—70 к.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ
Выпуск ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ**

РЕФЕРАТНЫЙ ЖУРНАЛ ГЛАВЭНЕРГО.

Рассчитан на инженеров-теплотехников.

10 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

„СОВЕТСКОЕ КОЛЛОУРБОСТРОЕНИЕ“

(бывш. „Вестник Коллутурбиностроительной промышленности“).

Орган Всесоюзного научно-исследовательского института тепло-
гидротехнического оборудования, Центрального котельного кон-
структормского бюро МТУ и заводов Главэнергопрома.

Рассчитан на инженерно-технический персонал заводов и
научно-исследовательских институтов коллутурбостроений.

6 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—2 р.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Орган Главэнергопрома и постоянного бюро ставов
по электрификации жел. дорог.

Рассчитан на квалифицированного рабочего, техника, студента,
мастера и инженера, работающих по электрической тяге.

6 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—2 р.

СВЕТОТЕХНИКА

Орган Главэнергопрома и Светотехнической секции ЭНИА

Рассчитан на инженеров, техников, студентов,
квалифицированных рабочих и мастеров.

6 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—8 р. Отдельный номер—1 р.

МАШИНИСТ

Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального
бюро по обучению рабочих теплосылкового хозяйства.

Рассчитан на машинистов стационарных и подвиж-
ных теплосылковых установок.

12 номеров в год ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на 6 мес.—2 р. 10 к., на 3 мес.—1 р. 05 к.
Отдельный номер—35 к.