

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

50

6

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

СОДЕРЖАНИЕ

Г. И. Атабеков — Общие принципы выполнения дистанционных омметров	3
Д. Е. Трофименко — Определение потокораспределения в кольцевой сети	6
М. И. Цейтлин — Выбор схем и параметров городских распределительных систем	13
Н. В. Горохов — Регулировочные характеристики серийной машины при шунтировании обмотки возбуждения	17
А. В. Иванов - Смоленский — Влияние скорости изменения скольжения на момент асинхронной машины	21
В. Н. Щепетов — Расчет электромагнитного привода электронского станка	26
В. В. Енько — Работа генераторов постоянного тока при неизменном сопротивлении внешней цепи	31
Л. И. Молтава — Построение характеристик схемы генератор—двигатель с тремя обмотками возбуждения генератора	36
Ф. И. Чернявский — Каскад асинхронного двигателя с ртутным выпрямителем	38
М. В. Беляев — Переходные режимы в простейшей схеме электромашиной автоматики	42
М. М. Аюдис — Нарастание обратного напряжения при коммутации в ионных вентилях	46
Н. Н. Линниченко — О нормировании восстанавливающегося напряжения	53
Г. Б. Холявский — Графоаналитический метод определения электродинамических усилий в высоковольтных аппаратах	58
Э. Г. Удерман — Измерение мощности и угла потерь при высокочастотном диэлектрическом нагреве	63
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Г. В. Сербиновский — Опыт эксплуатации электроустановок на московских предприятиях	67
И. М. Самсонов — Расчет распределения переменного тока по пластинам сложного токопровода	72
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
ДИСКУССИИ	
К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей	80
Правила устройства электротехнических установок	83
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К статье И. М. Чалидзе, Н. А. Златева, и Ю. А. Варьяша „К вопросу о схемах коммутации крупных гидроэлектростанций“	87
ХРОНИКА	
Профессор М. А. Бонч-Бруевич (к 10-летию со дня смерти)	88
Встреча работников науки и стахановцев городского электротранспорта	89
В секциях электротермии МОНИТОЭ и Дома инженера и техника им. Дзержинского	90
БИБЛИОГРАФИЯ	
Л. Л. Крапивенский — Книга Н. Г. Вострокнутова „Техника измерений электрических и магнитных величин“	91
Г. П. Хализев — Книга А. С. Сандлера „Электрооборудование металлорежущих станков“	92
Д. И. Марьяновский — Книга Р. Ольденбурга и Г. Сарториуса „Динамика автоматического регулирования“	93
А. М. Ганелин — Книга Е. Л. Шаца „Ремонт асинхронных электродвигателей и трансформаторов“	94
Р. М. Лакерник и Д. Л. Шарле — Книга М. Ю. Пошерстника и Н. Г. Туркина „Производство кабелей связи“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	95
Номограмма для определения превышения температуры в процессе нагревания тела (на 3-й странице обложки)	



ВОЛОГДСКАЯ
ОБЛАСТНАЯ
УНИВЕРСАЛЬНАЯ
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**,
член-корр. АН СССР **М. П. Костяно**, академик **В. Ф. Миткевич**,
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80

Адрес для телеграмм: Москва Электричество

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

Общие принципы выполнения дистанционных омметров

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ

ЦНИЭЛ МЭС

В практике релейной защиты находят применение дистанционные омметры различных типов. Тип дистанционного омметра определяется его характеристикой срабатывания, вычерченной в комплексной плоскости. Эта характеристика представляет собой обычно окружность или прямую линию, ограничивающую ту или иную часть комплексной плоскости.

На рис. 1 и 2 показаны характеристики омметров полного и реактивного сопротивления, нашедших применение на практике. Окружность 1 (рис. 1) представляет характеристику омметра полного сопротивления общего вида. Она расположена эксцентрично относительно начала координат. Окружность 2 представляет характеристику направленного омметра полного сопротивления, проходящую через начало координат. Наконец, окружность 3 представляет характеристику ненаправленного омметра полного сопротивления, с центром, расположенным в начале координат.

На практике различают омметры минималь-

Рассмотрена принципиальная возможность выполнения основных типов дистанционных омметров полного и реактивного сопротивления на базе использования систем: детекторной, балансной и индукционной, с вращающимся полем. Работа представляет изложение докладов, прочитанных автором в ЦНИЭЛ и Мосэнерго в январе 1949 г.

ного и максимального сопротивления. Условием срабатывания омметра минимального полного сопротивления является нахождение конца вектора полного сопротивления,

измеренного на его зажимах, в пределах круга характеристики.

В свою очередь, условием срабатывания омметра максимального сопротивления служит нахождение конца вектора полного сопротивления вне круга. Таким образом, условие срабатывания омметра минимального сопротивления является одновременно условием несрабатывания омметра максимального сопротивления и наоборот. Поэтому достаточно рассмотреть только одну из этих категорий реле.

Можно показать, что характеристики, изображенные на рис. 1 и 2, выражаются в полярных координатах следующим образом:

на рис. 1 кривая 1:

$$z^2 - z(z' - z'') \cos(\varphi - \delta) - z'z'' = 0, \quad (1)$$

кривая 2:

$$z - z' \cos(\varphi - \delta) = 0, \quad (2)$$

кривая 3:

$$z = z'. \quad (3)$$

На рис. 2:

$$z \sin \varphi = x'. \quad (4)$$

Уравнения (2) и (3) являются частными случаями уравнения (1), а именно уравнение (2) соответствует случаю $z'' = 0$, а уравнение (3) — случаю $z' = z''$. Здесь z' , z'' , x' , δ — основные параметры реле, причем $Z' = z' e^{j\delta}$, $Z'' = z'' e^{j\delta}$. Полное сопротивление, измеренное на зажимах омметра,

$$Z = \frac{U}{I} = z e^{j\varphi}, \quad (5)$$

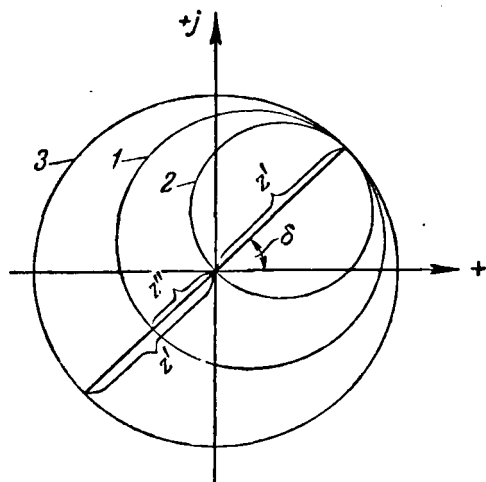


Рис. 1.

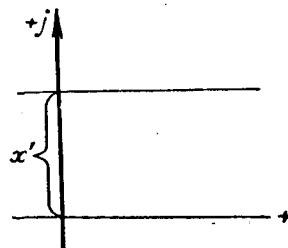


Рис. 2.

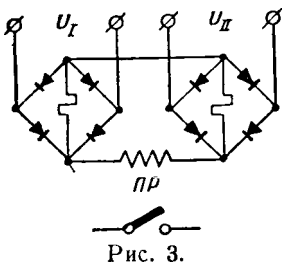


Рис. 3.

где \dot{U} и I — напряжение и ток, подводимые к омметру от измерительных трансформаторов.

Характеристика омметра общего вида, соответствующая выражению (1), может быть получена с помощью реле, сравнивающего абсолют-

ные величины напряжений

$$U_I = \left| \dot{U} - \frac{Z' - Z''}{2} I \right| \text{ и } U_{II} = \left| \frac{Z' + Z''}{2} I \right|.$$

Действительно, при условии трогания

$$\left| \dot{U} - \frac{Z' - Z''}{2} I \right| = \left| \frac{Z' + Z''}{2} I \right|$$

имеем:

$$\left| Z - \frac{Z' - Z''}{2} \right| = \left| \frac{Z' + Z''}{2} \right|.$$

С учетом принятых ранее обозначений

$$\left| z e^{j\varphi} - \frac{z' - z''}{2} e^{j\delta} \right| = \frac{z' + z''}{2},$$

или, что то же

$$\left| z e^{j(\varphi - \delta)} - \frac{z' - z''}{2} \right| = \frac{z' + z''}{2}.$$

Отсюда получается уравнение

$$\left[z \cos(\varphi - \delta) - \frac{z' - z''}{2} \right]^2 + z^2 \sin^2(\varphi - \delta) = \left(\frac{z' + z''}{2} \right)^2,$$

приводящееся к (1).

Полагая $z'' = 0$, получаем выражения подлежащих сравнению напряжений для случая направленного омметра полного сопротивления

$$U_I = \left| \dot{U} - \frac{Z'}{2} I \right| \text{ и } U_{II} = \left| \frac{Z'}{2} I \right|.$$

В свою очередь, полагая $Z' = Z''$, получаем выражение напряжений для случая ненаправленного омметра полного сопротивления

$$U_I = |\dot{U}| \text{ и } U_{II} = |Z' I|.$$

Характеристики вида (1) — (4) могут быть получены при помощи различных систем реле.

На рис. 3, 4 и 5 изображены системы реле: детекторная, основанная на применении поляризованного реле ПР (или электронно-ионного прибора), включенного в схему с выпрямителями; электромагнитная балансная; индукционная с вращающимся полем.

Любая из этих систем может быть применена для получения омметра того или иного типа путем сравнения абсолютных величин напряжений \dot{U}_I и \dot{U}_{II} , указанных в табл. 1.

В детекторной системе (рис. 3) сравнение абсолютных величин напряжений \dot{U}_I

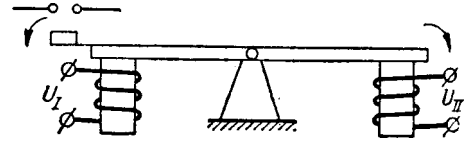


Рис. 4.

и \dot{U}_{II} производится после их выпрямления. Условие срабатывания детекторного омметра:

$$|\dot{U}_I| < |\dot{U}_{II}|. \quad (6)$$

Взамен поляризованного реле с одной обмоткой может быть применено поляризованное реле, имеющее две одинаковые обмотки, включенные порознь на выпрямленные напряжения $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ — вместо сопротивлений, показанных на рис. 3. Благодаря встречному включению обмоток, такое реле реагирует на разность ампервитков, создаваемых обеими обмотками.

Преимущества детекторного принципа выполнения омметров заключаются в: 1) быстроте действия поляризованных реле (или электронно-ионных приборов), приключаемых к выходным зажимам детекторных устройств, 2) потреблении относительно малых мощностей в целях тока и напряжения и 3) возможности осуществления безинерционного управления высокочастотными передатчиками непосредственно с выходных зажимов детекторных устройств.

В балансной электромагнитной системе (рис. 4) сравнение абсолютных величин подводимых напряжений осуществляется в результате сравнения механических усилий, создаваемых двумя электромагнитами. Механические усилия пропорциональны квадратам приложенных напряжений, и условием срабатывания балансного омметра является:

$$|\dot{U}_I|^2 < |\dot{U}_{II}|^2, \quad (7)$$

что математически равносильно условию (6).

Таблица 1

Тип омметра	Характеристика омметра	Напряжение			
		\dot{U}_I	\dot{U}_{II}	$\dot{U}_I + \dot{U}_{II}$	$\dot{U}_I - \dot{U}_{II}$
Полного сопротивления общий случай ($Z' \neq Z'' \neq 0$)		$\dot{U} - \frac{Z' - Z''}{2} I$	$\frac{Z' + Z''}{2} I$	$\dot{U} + Z' I$	$\dot{U} - Z' I$
Полного сопротивления направленный ($Z'' = 0$)		$\dot{U} - \frac{Z'}{2} I$	$\frac{Z'}{2} I$	\dot{U}	$\dot{U} - Z' I$
Полного сопротивления ненаправленный ($Z' = Z''$)		\dot{U}	$Z' I$	$\dot{U} + Z' I$	$\dot{U} - Z' I$
Реактивного сопротивления		\dot{U}	$\dot{U} - j2x' I$	$Z(0 - jx' I)$	$j2x' I$

Таблица 2

Тип омметра	Условие срабатывания (в полярных координатах)	Система омметра		Индукционная с вращающимся полем
		Детекторная	Балансная	
Полного сопротивления, общий случай ($z' \neq z'' \neq 0$)	$z^2 < z(z' - z'') \cos(\varphi - \delta) + z'z''$	$ \dot{U} - \frac{z' - z''}{2} i < \left \frac{z' + z''}{2} i \right $	$ \dot{U} - \frac{z' - z''}{2} i ^2 < \left \frac{z' + z''}{2} i \right ^2$	$(\dot{U} + z' i)(\dot{U} - z' i)'_0 < 0$
Полного сопротивления, направленный ($z' = 0$)	$z < z' \cos(\varphi - \delta)$	$ \dot{U} - \frac{z'}{2} i < \left \frac{z'}{2} i \right $	$ \dot{U} - \frac{z'}{2} i ^2 < \left \frac{z'}{2} i \right ^2$	$[\dot{U}(\dot{U} - z' i)]_0 < 0$
Полного сопротивления, ненаправленный ($z = z'$)	$z < z'$	$ \dot{U} < z' i $	$ \dot{U} ^2 < z' i ^2$	$(\dot{U} + z' i)(\dot{U} - z' i)'_0 < 0$
Реактивного сопротивления	$z \sin \varphi < z'$	$ \dot{U} < \dot{U} - j2x' i $	$ \dot{U} ^2 < \dot{U} - j2x' i ^2$	$(\dot{U} - jx' i)(-\dot{U} - jx' i)'_0 < 0$

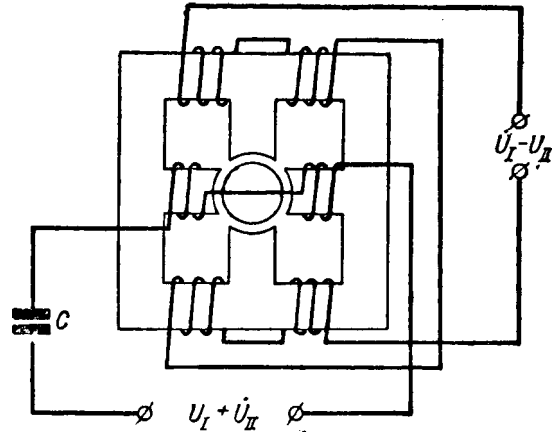


Рис. 5.

Сравнение абсолютных величин напряжений \dot{U}_I и \dot{U}_{II} может быть также произведено при помощи индукционной системы с вращающимся полем (предложение А. С. Тулина — авторское свидетельство № 56610 от 26 декабря 1937 г.). Для этого необходимо к индукционному реле с диском или с цилиндрическим ротором¹, имеющему две обмотки напряжения (рис. 5), подвести напряжения $\dot{U}_I + \dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I - \dot{U}_{II}$, причем последовательно с одной из обмоток реле должен быть включен конденсатор. Элементы цепи напряжения подбираются таким образом, чтобы вращающий момент реле при сдвиге 90° между напряжениями $\dot{U}_I + \dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I - \dot{U}_{II}$, подводимыми к обмоткам реле, был равен нулю.

Условием срабатывания такого реле является

$$[(\dot{U}_I + \dot{U}_{II})(\dot{U}_I - \dot{U}_{II})]_0 < 0, \quad (8)$$

здесь буква δ означает, что во внимание принимается только действительная часть комплексного выражения, заключенного в квадратные скобки. Значок \wedge обозначает сопряженный вектор.

Условие (8) равносильно условиям (6) и (7). Действительно

$$[(\dot{U}_I + \dot{U}_{II})(\dot{U}_I - \dot{U}_{II})]_0 = [U_I^2 - U_{II}^2 - j2U_I U_{II} \sin \psi]_0 = U_I^2 - U_{II}^2,$$

здесь ψ — фазовый сдвиг \dot{U}_I относительно \dot{U}_{II} .

В табл. 1 приведены выражения напряжений $\dot{U}_I + \dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I - \dot{U}_{II}$, которые должны быть подведены к индукционной системе с вращающимся полем для получения омметра того или иного типа.

В табл. 2 даны условия срабатывания омметров различных типов, выполненных на основе любой из рассмотренных выше систем².

¹ Результаты исследований индукционного омметра с цилиндрическим ротором, проведенных Теплоэлектропроектом, доложены В. Л. Фаурикантом на научно-технической сессии ВНИТОЭ по электроавтоматике и телемеханике в Ленинграде в 1949 г.

² В реле ИР-105 взамен омметра, реагирующего на косинус угла между напряжениями $\dot{U} - jx' I$ и $jx' I$, применен омметр, реагирующий на синус угла между напряжением $\dot{U} - jx' I$ и током I .

Как следует из табл. 1 и 2, в зависимости от типа и системы реле, к напряжению \dot{U} в некоторых случаях должно быть добавлено (со знаком плюс или минус) напряжение, пропорциональное току \dot{I} . Такое добавление напряжения осуществляется обычно при помощи вспомогательного устройства, аналогичного трансформатору тока с воздушным зазором в сердечнике. Как известно, на выходных зажимах такого устройства получается напряжение, прямо пропорциональное току.

Наряду со способом, указанным в табл. 1 и 2, возможно также выполнение индукционных омметров на базе описанного автором [Л. 1] принципа сравнения абсолютных величин $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$, представляющего дальнейшее развитие и обобщение способа А. С. Тулина. В соответствии с этим принципом сравнение указанных величин может быть произведено с помощью индукционного реле, реагирующего на косинус угла между напряжениями $\dot{U}_I e^{j\alpha} + \dot{U}_{II} e^{-j\alpha}$ и $\dot{U}_I e^{j\beta} - \dot{U}_{II} e^{-j\beta}$, при условии, что $\cos(\alpha - \beta) \neq 0$.

В частности, в работе автора [Л. 1] было показано, что двухфазные короткие замыкания могут быть охвачены одним реле, производящим сравнение по абсолютной величине напряжений

$$\dot{U}_I = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z'_1 \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = \dot{U}_2 - \dot{I}_2 Z'_1.$$

Полагая $\alpha = 0$ и $\beta = -30^\circ$, находим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_I + \dot{U}_{II} &= (\dot{U}_A - \dot{U}_0) - (\dot{I}_A - \dot{I}_0) Z'_1, \\ \dot{U}_I e^{-j30^\circ} - \dot{U}_{II} e^{j30^\circ} &= j[(\dot{U}_B - \dot{U}_0) - (\dot{I}_B - \dot{I}_0) Z'_1]. \end{aligned}$$

Полученный таким образом омметр, реагирующий на синус угла между напряжениями $(\dot{U}_A - \dot{U}_0) - (\dot{I}_A - \dot{I}_0) Z'_1$ и $(\dot{U}_B - \dot{U}_0) - (\dot{I}_B - \dot{I}_0) Z'_1$, представляет собой разновидность индукционной системы, предложенной А. М. Бреслер для защиты от двухфазных коротких замыканий.

Литература

1. Г. И. Атабеков. Новый принцип выполнения направленной дистанционной защиты. Электричество, № 1, 1950.

[6. 8. 1949]



Определение потокораспределения в кольцевой сети

Кандидат техн. наук, доц. Д. Е. ТРОФИМЕНКО

Уральский политехнический институт им. Кирова

Наиболее распространенные методы расчета кольцевых сетей, к которым относятся метод трансформации и метод контурных уравнений, не позволяют сразу находить потокораспределение с учетом потерь мощности и не могут использоваться при расчетах сети, отдельные участки которых связаны трансформаторами различных коэффициентов трансформации.

Излагаемые ниже методы — аналитический и графоаналитический, являются более общими и могут применяться при нахождении потокораспределения в сети, содержащей трансформаторы с различными коэффициентами трансформации и разными группами соединения обмоток или же трансформаторы с продольно-поперечным регулированием напряжения.

Изложены два метода вычисления потокораспределения в кольцевой сети, содержащей трансформаторы с различными коэффициентами трансформации или трансформаторы продольно-поперечного регулирования. Оба метода позволяют находить на одном участке сети поток мощности сразу с учетом потерь в сети. В частном случае, когда потери мощности и трансформаторы с неравновесными коэффициентами трансформации не рассматриваются, аналитический метод дает выражение, не отличающееся от выражения потока мощности для сети, питаемой с двух сторон.

Аналитический метод позволяет вычислять потокораспределение с учетом потерь мощности, не пользуясь способом последовательного приближения, и дает при этом допустимую для практики точность.

Графоаналитический метод является вполне точным и одновременно позволяет производить расчеты с учетом статических характеристик нагрузок (выражающих изменение активной и реактивной мощности от напряжения), что может, например, требоваться при расчетах статической устойчивости.

Аналитический метод. Вывод основного выражения, при помощи которого с учетом потерь в сети может быть найден поток мощности на одном из участков кольцевой сети, проводится для схемы, изображенной на рис. 1.

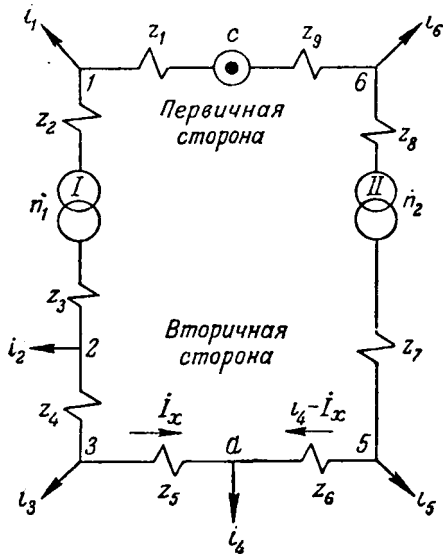


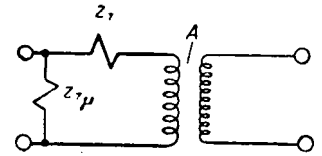
Рис. 1. Схема кольцевой сети.

В этой схеме точка *c* является точкой основного питания, а точка *a* — точкой с известным напряжением U_a . Сопротивления участков сети выражены в омах и отнесены к собственному напряжению, а трансформаторы представлены в виде схемы замещения по рис. 2. Коэффициенты трансформации трансформаторов даны в комплексном виде, т. е. для трансформатора *I* коэффициент трансформации $n_1 = n_1 e^{j\alpha_1}$, а для трансформатора *II* $n_2 = n_2 e^{j\alpha_2}$, где n_1 и n_2 — отношения линейных напряжений первичных и вторичных сторон трансформаторов *I* и *II* при холостом ходе, а α_1 и α_2 — углы между линейными напряжениями холостого хода первичных и вторичных сторон. Угол α_1 (или α_2) положителен, если линейное напряжение холостого хода первичной стороны опережает напряжение вторичной стороны; так, например, для трансформатора с соединением обмоток $\Delta/\Delta-11$ угол $\alpha = -30^\circ$, для трансформатора $\Delta/\Delta-1$ угол $\alpha = +30^\circ$.

Если токи нагрузок, питаемых от данной сети, рассматривать ориентированными относительно напряжения в точке *a*, то токи на отдельных участках сети, при обозначении тока на участке *a-3* через I_x , будут:

$$\begin{aligned} I_{3-2} &= I_x + i_3; \\ I_{2-1} &= I_x + i_3 + i_2; \\ I_{1-1} &= (I_x + i_3 + i_2) \frac{1}{n_1} \cdot e^{j\alpha_1}; \\ I_{1-c} &= (I_x + i_3 + i_2) \frac{1}{n_1} e^{j\alpha_1} + i_1; \\ I_{a-5} &= i_4 - I_x; \\ I_{5-II} &= i_4 - I_x + i_5; \\ I_{II-6} &= (i_4 - I_x + i_5) \frac{1}{n_2} \cdot e^{j\alpha_2}; \\ I_{6-c} &= (i_4 - I_x + i_5) \frac{1}{n_2} \cdot e^{j\alpha_2} + i_6. \end{aligned}$$

Рис. 2. Схема замещения трансформатора *A*. Идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации $n = ne^{j\alpha}$,



Падение напряжения от этих токов между точками *a* и *c* может быть записано в виде следующего выражения

$$\begin{aligned} \left[\frac{U_a}{\sqrt{3}} + I_x z_5 + (I_x + i_3) z_4 + (I_x + i_3 + i_2) z_3 \right] n_1 e^{j\alpha_1} + \\ + (I_x + i_3 + i_2) \frac{1}{n_1} e^{j\alpha_1} z_2 + \\ + \left[(I_x + i_3 + i_2) \frac{1}{n_1} e^{j\alpha_1} + i_1 \right] z_1 = \left[\frac{U_a}{\sqrt{3}} + \right. \\ \left. + (i_4 - I_x) z_6 + (i_4 - I_x + i_5) z_7 \right] n_2 e^{j\alpha_2} + \\ + (i_4 - I_x + i_5) \frac{1}{n_2} e^{j\alpha_2} z_8 + \\ \left. + \left[(i_4 - I_x + i_5) \frac{1}{n_2} e^{j\alpha_2} + i_6 \right] z_9. \right. \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначим сдвиг между напряжением на нагрузке в некоторой точке *n*, расположенной на стороне вторичного напряжения, и напряжением в точке *a* через δ_n , тогда ток нагрузки может быть выражен (рис. 3):

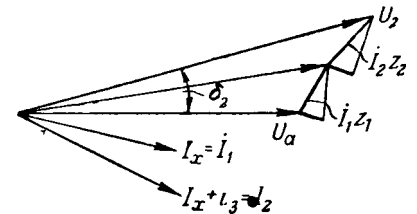
$$\begin{aligned} i_n &= \frac{\hat{S}_n}{\sqrt{3} \cdot U_n e^{-j\delta_n}} = \frac{\hat{S}_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} (\cos \delta_n + j \sin \delta_n) = \\ &= \frac{\hat{S}_n}{\sqrt{3} U_n} \cdot \frac{U_a + \sqrt{3} \Sigma iz}{U_n} = i_{(n)} \cdot k_n \left[1 + \frac{\sqrt{3} \Sigma iz}{U_a} \right], \end{aligned}$$

где $\sqrt{3} \cdot \Sigma iz$ — сумма падений напряжений на участке контура между точками *a* и *n*;

$i_{(n)} = \frac{\hat{S}_n}{\sqrt{3} U_a}$ — расчетный ток нагрузки;

k_n — коэффициент, равный квадрату отношения напряжений U_a и U_n .

Рис. 3. Векторная диаграмма напряжения для двух участков сети.



Аналогично, для нагрузки, подключенной в точке *n'*, расположенной на стороне первичного напряжения, ток, приведенный к стороне вторичного напряжения,

$$\begin{aligned} i_{n'} &= \frac{\hat{S}_{n'}}{\sqrt{3} \cdot U_{n'} \cdot e^{-j(\delta_{n'} + \alpha)}} = i'_{(n')} \left(\frac{U_a}{U_{n'}} \right)^2 \times \\ &\times \left[1 + \frac{\sqrt{3} \cdot \Sigma i \cdot z}{U_a} \right] e^{j\alpha} = i'_{(n')} \cdot k_{n'} \cdot \left[1 + \frac{\sqrt{3} \cdot \Sigma i \cdot z}{U_a} \right] \cdot e^{j\alpha}, \end{aligned}$$

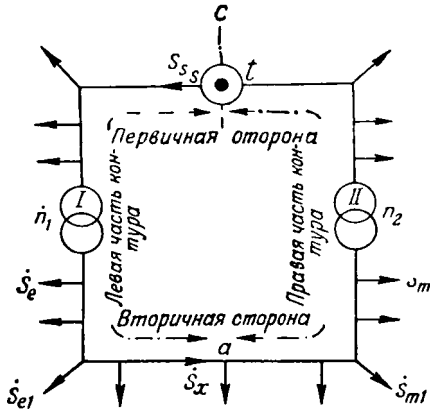


Рис. 4. Схема кольцевой сети с произвольным количеством нагрузок.

где $U'_{n'}$ — напряжение в точке n' , приведенное к стороне вторичного напряжения.

Если нагрузка расположена в левой части контура, то $U'_{n_1} = \frac{U'_{n'}}{n_1}$, а если в правой части, то

$$U'_{n'} = \frac{U'_{n'}}{n_2}.$$

Пользуясь этими выражениями, можно приближенно представить токи нагрузок сети по рис. 1, в следующем виде:

$$\begin{aligned} i_3 &= i_{(3)} \cdot k_3 \left(1 + \frac{i_x z_5}{U_a} \sqrt{3} \right); \\ i_2 &\approx i_{(2)} \cdot k_2 \cdot \left[1 + i_x (z_4 + z_5) \frac{\sqrt{3}}{U_a} + i_{(3)} k_3 \cdot z_4 \cdot \frac{\sqrt{3}}{U_a} \right]; \\ i'_1 &\approx i'_{(1)} \cdot k_1 \cdot \left[1 + i_x (z'_2 + z_3 + z_4 + z_5) \frac{\sqrt{3}}{U_a} + \right. \\ &\quad \left. + i_{(3)} \cdot k_3 \cdot (z'_2 + z_3 + z_4) \frac{\sqrt{3}}{U_a} + \right. \\ &\quad \left. + i_2 k_2 \cdot (z'_2 + z_3) \frac{\sqrt{3}}{U_a} \right] e^{j\alpha_1}; \\ i_5 &= i_{(5)} \cdot k_5 \cdot \left[1 + (i_{(4)} - i_x) z_6 \frac{\sqrt{3}}{U_a} \right]; \\ i'_6 &\approx i'_{(6)} \cdot k_6 \cdot \left[1 + i_{(4)} (z_6 + z_7 + z'_8) \frac{\sqrt{3}}{U_a} + i_{(5)} \cdot k_5 \times \right. \\ &\quad \left. \times (z_7 + z'_8) \frac{\sqrt{3}}{U_a} - i_x (z_6 + z_7 + z'_8) \frac{\sqrt{3}}{U_a} \right] e^{j\alpha_2}; \\ i_4 &= i_{(4)}. \end{aligned}$$

Подставляя эти выражения в уравнение (1), после преобразований находим

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{U_a (n_2 - n_1)}{\sqrt{3} \cdot z} - \frac{n_1}{z} (i'_{(1)} k_1 z'_{1c} + i_{(2)} k_2 z'_{2c} + \\ &\quad + i_{(3)} k_3 z'_{3c}) + \frac{n_2}{z} (i_4 z'_{4c} + i_5 k_5 z'_{5c} + i'_{(6)} k_6 z'_{6c}) - \\ &\quad - \frac{\sqrt{3} n_1}{U_a \cdot z} (i'_{(1)} i_{(2)} k_1 k_2 z'_{12} z'_{1c} + i'_{(1)} i_{(3)} k_1 k_3 z'_{13} z'_{1c} + \\ &\quad + i_{(2)} i_{(3)} k_2 k_3 z'_{23} z'_{2c}) + \frac{\sqrt{3} \cdot n_2}{U_a \cdot z} (i_{(5)} i_{(4)} k_5 z'_{54} z'_{5c} + \end{aligned}$$

$$+ i'_{(6)} i_{(4)} k_6 z'_{64} z'_{6c} + i'_{(6)} i_{(5)} k_5 k_6 z'_{65} z'_{6c}),$$

где $z = (z'_1 + z'_2 + z_3 + z_4 + z_5) n_1 + (z_6 + z_7 + z'_8 + z'_9) n_2 + \frac{\sqrt{3}}{U_a \cdot n_1} (i'_{(1)} \cdot k_1 \cdot z'_{1a} \cdot z'_{1c} \cdot n_1^2 +$
 $+ i_{(2)} \cdot k_2 \cdot z_{2a} \cdot z'_{2c} \cdot n_1^2 + i_{(3)} \cdot k_3 \cdot z'_{3a} \cdot z'_{3c} \cdot n_1^2) +$
 $+ \frac{\sqrt{3}}{U_a \cdot n_2} (i_{(5)} \cdot k_5 z'_{5a} \cdot z'_{5c} \cdot n_2^2 + i'_{(6)} \cdot k_6 \cdot z'_{6a} z'_{6c} \cdot n_2^2);$
 $z'_{1c} = z'_1; z'_{2c} = z'_1 + z'_2 + z_3; z'_{3c} = z'_1 + z'_2 +$
 $+ z_3 + z_4; z'_{4c} = z_6 + z_7 + z'_8 + z'_9; z'_{5c} = z_7 +$
 $+ z_8 + z'_9; z'_{6c} = z'_9; z'_{12} = z'_2 + z'_3; z'_{13} = z'_2 +$
 $+ z_3 + z_4; z'_{23} = z_4; z'_{54} = z_6; z'_{64} = z_6 + z_7 +$
 $+ z_8; z'_{65} = z_7 + z'_8; z'_{1a} = z'_2 + z_3 + z_4 + z_5;$
 $z'_{2a} = z_4 + z_5; z'_{3a} = z_5; z'_{5a} = z'_{54} = z_6; z'_{6a} =$
 $= z_6 + z_7 + z'_8; z'_1 = \frac{z_1}{n_1^2}; z'_2 = \frac{z_2}{n_1^2}; z'_8 = \frac{z_8}{n_2^2};$
 $z'_9 = \frac{z_9}{n_2^2}; i'_1 = i_1 \cdot n_1; i'_6 = i_6 \cdot n_2.$

В общем случае, когда схема имеет вид рис. 4, выражение для тока:

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{U_a (n_2 - n_1)}{\sqrt{3} \cdot z} - \frac{1}{z} \sum i_{(l)} \cdot k_l \cdot z_{lc} + \frac{1}{z} \sum i_{(m)} \cdot k_m \cdot z_{mc} - \\ &\quad - \frac{\sqrt{3}}{U_a \cdot n_1 \cdot z} \sum i_{(l)} \cdot i_{(l)} \cdot k_l \cdot k_{l_1} \cdot z_{ll_1} \cdot z_{lc} + \\ &\quad + \frac{\sqrt{3}}{U_a \cdot n_2 \cdot z} \sum i_{(m)} \cdot i_{(m)} \cdot k_m \cdot k_{m_1} \cdot z_{mm_1} \cdot z_{mc}. \end{aligned}$$

Умножая правую и левую части последнего уравнения на $\sqrt{3} \cdot U_a$, получаем:

$$\begin{aligned} \hat{S}_x &= \frac{U_a^2 (n_2 - n_1)}{z} - \frac{1}{z} \sum \hat{S}_l \cdot k_l \cdot z_{lc} + \frac{1}{z} \sum \hat{S}_m \cdot k_m \cdot z_{mc} - \\ &\quad - \frac{1}{U_a^2 \cdot n_1 \cdot z} \sum \hat{S}_l \cdot \hat{S}_{l_1} \cdot k_l \cdot k_{l_1} \cdot z_{ll_1} \cdot z_{lc} + \frac{1}{U_a^2 \cdot n_2 \cdot z} \times \\ &\quad \times \sum \hat{S}_m \cdot \hat{S}_{m_1} \cdot k_m \cdot k_{m_1} \cdot z_{mm_1} \cdot z_{mc}, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $z = z_{alc} + z_{amc} + \frac{1}{U_a^2 \cdot n_1} \sum \hat{S}_l \cdot k_l \cdot z_{lc} \cdot z_{la} +$
 $+ \frac{1}{U_a^2 \cdot n_2} \sum \hat{S}_m \cdot k_m \cdot z_{mc} \cdot z_{ma}.$ (3)

В этих формулах все сопротивления являются расчетными. Для каждого участка контура расчетное сопротивление представляет произведение коэффициента трансформации (в комплексном виде) на сопротивление участка, пересчитанное к стороне вторичного напряжения. Для левой части контура расчетные сопротивления вычисляются через коэффициент трансформации трансформатора I, а для правой части контура — через коэффициент трансформации трансформатора II.

Отдельные члены представляют собой:

$\frac{U_a(\dot{n}_2 - \dot{n}_1)}{z}$ — поток уравнительной мощности, вызванный разницей коэффициентов трансформации трансформаторов;

$\frac{1}{z} \sum \hat{S}_l \cdot k_l \cdot z_{lc}$ — поток мощности, обусловленный нагрузками левой части контура, исключая нагрузку в точке с заданным напряжением в точке *a*. Через \hat{S}_l обозначена нагрузка в точке *l*, а через z_{lc} суммарное расчетное сопротивление участков контура между точками *l* и *c*;

$\frac{1}{z} \sum \hat{S}_m \cdot k_m \cdot z_{mc}$ — поток мощности, обусловленный нагрузками правой части контура, включая нагрузку в точке с заданным напряжением U_a . Через z_{mc} обозначено суммарное расчетное сопротивление между точками *m* и *c*.

Последние два члена представляют собой дополнительные потоки мощности, вызванные потерями мощности в сети. Произведение $\hat{S}_l \cdot \hat{S}_l$ есть попарное произведение всех нагрузок левой части контура, исключая нагрузку в точке *a*, а $\hat{S}_m \cdot \hat{S}_m$ — правой части контура, включая нагрузку в точке *a*. Сопротивление z_{ll} есть суммарное расчетное сопротивление между точками *l* и *l*, а z_{lc} — между точками *l* и *c*. Сопротивления z_{mm} , и z_{mc} представляют собой расчетные сопротивления между точками *m* и *m* и *m* и *c*, расположенными в правой части контура.

Выражение (3) представляет собой условное суммарное сопротивление контура, в котором: z_{alc} — суммарное расчетное сопротивление левой части контура, z_{amc} — суммарное расчетное сопротивление правой части контура, а последние два члена — фиктивные сопротивления, учитывающие потери мощности и сдвиги между напряжениями в отдельных точках контура. В эти два последних члена не входит нагрузка в точке *a* с заданным напряжением.

Так как при нахождении потокораспределения неизвестны напряжения в отдельных точках контура, то коэффициенты

$$k_l = \left(\frac{U_a}{U_l}\right)^2 \text{ и } k_m = \left(\frac{U_a}{U_m}\right)^2,$$

где U_l и U_m — модули напряжений в точках *l* и *m*, приведенные к стороне вторичного напряжения, принимаются приближенно, исходя из ожидаемых значений напряжений в отдельных точках контура.

В частном случае, когда группы соединений обмоток и коэффициенты трансформации трансформаторов одинаковы, выражение (2) прини-

мает следующий вид, если пренебречь потерями мощности в сети:

$$\hat{S}_x = \frac{1}{z_0} \sum \hat{S}_m \cdot z_{mc} - \frac{1}{z_0} \sum \hat{S}_l \cdot z_{lc}, \quad (4)$$

где $z_0 = z_{alc} + z_{amc}$.

Сравнивая это выражение с выражением, применяемым для расчета сети, питаемой с двух сторон сети:

$$\hat{S}_x = \frac{1}{z_0} \sum \hat{S}_m z_{mc} + \frac{1}{z_0} \sum \hat{S}_l z_{cal}, \quad (5)$$

убеждаемся в их тождественности; разница между ними состоит лишь в том, что по формуле (5) определяется поток мощности на участке, прилегающем к точке основного питания *c*, а по формуле (4) находится поток на участке, прилегающем к точке *a* с заданным напряжением.

При выводе формулы (2) раздел мощности в схеме рис. 1 был принят в точке *a* с заданным напряжением; можно убедиться, что формула (2) сохраняет тот же вид, если раздел мощности происходит в другой точке или в нескольких точках контура. Такое преимущество не получилось бы для выражения искомого потока мощности, если за исходное напряжение принять напряжение в точке основного питания *c*, и за неизвестный поток мощности — поток на участке, прилегающем к этой же точке. В этом последнем случае формула искомого потока мощности была бы более сложной, а пересчет сопротивлений через коэффициенты трансформации — неопределенен и затруднителен, так как выражение для расчетных сопротивлений получилось бы зависящим от точки потокораздела.

Из уравнения (2) следует, что потокораспределение в контуре с трансформаторами, имеющими разные коэффициенты трансформации, может рассматриваться как наложение потока уравнительной мощности, вызванного разными коэффициентами трансформации на потокораспределение, найденное в предположении равенства коэффициентов трансформации. Такое наложение является правильным только в том случае, если сопротивления участков сети предварительно пересчитаны через коэффициенты трансформации и заменены расчетными сопротивлениями.

Графоаналитический метод. Этим методом поток мощности на участке, прилегающем к точке основного питания *c* (рис. 4), находится следующим путем.

Разрезав контур в точке основного питания *c* и получив сеть *s—t*, производим ее расчет по заданному напряжению $U_s = U_c$ в точке *c* и произвольно принятому значению потока \hat{S}_s на участке *s—l*. В результате этого расчета находим напряжение U_l в конце разомкнутой сети и сдвиг δ между напряжениями U_l и U_s . Прделав ряд таких расчетов для различных произвольных значений потоков мощности на участке *s—l* и определив из них напряжения U_l и угол δ , строим семейство кривых, выражающих изменение на-

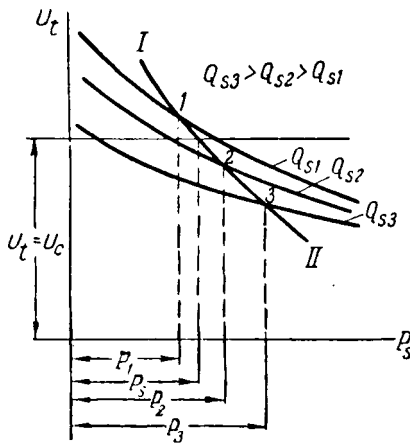


Рис. 5. Кривые $U_t = f(P_s; Q_s)$.

пряжения U_t и угла δ от активного потока мощности при различных величинах потока Q_s реактивной мощности на участке $s-1$ (рис. 5 и 6).

Сопротивления отдельных участков сети при вычислениях напряжения U_t и угла δ принимаются действительными, т. е. не пересчитанными через коэффициенты трансформации, а трансформаторы принимаются по схеме замещения рис. 2. Напряжения во всех точках сети вычисляются в комплексной форме, при этом при определении напряжения на вторичной стороне трансформатора I напряжение первичной стороны делится на коэффициент трансформации $n_1 = n_1 e^{j\alpha_1}$, а при определении напряжения на первичной стороне трансформатора II напряжение вторичной стороны умножается на $n_2 = n_2 e^{j\alpha_2}$. Обозначения n_2 и n_1 здесь приняты такими же, как и в рассмотренном выше аналитическом методе.

Имея кривые рис. 5 и 6 и зная, что угол δ должен быть равен нулю, а напряжение U_t равно U_c , в дальнейшем поступаем следующим путем. Из кривых рис. 6 определяем потоки активной мощности P_1, P_2, P_3 , отвечающие значению угла $\delta = 0$, и откладывая их величины по оси абсцисс

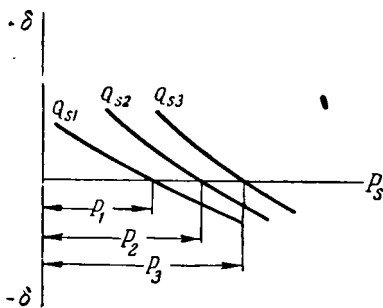


Рис. 6. Кривые $\delta = \varphi(P_s; Q_s)$.

кривых рис. 5, находятся точки 1, 2, 3. Соединив эти точки между собой, получаем кривую I—II, выражающую зависимость напряжения от потока активной мощности на участке $s-1$ при

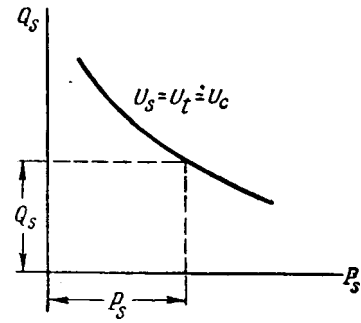


Рис. 7. Зависимость Q_s от P_s при $U_s = U_t = U_c$.

$\delta = 0$. Проведя затем на рис. 5 прямую, параллельную оси абсцисс, ордината которой равна заданному напряжению, находят точку пересечения этой прямой с кривой I—II и соответствующий ей искомый поток активной мощности. Поток реактивной мощности Q_s определяется из кривой рис. 7, построенной на основе графика рис. 6, при $U_t = U_c$.

Данный метод дает точные результаты, и в отличие от аналитического метода позволяет находить потоки распределение с учетом изменения нагрузок по статистическим характеристикам. Последнее обстоятельство дает возможность применять этот метод при вычислениях статических пределов мощности.

Приложение. Пример вычисления аналитическим методом. Требуется найти потокораспределение в сети, представленной на рис. 8; нагрузки выражены в мегаваттах и мегавольтамперах, а сопротивления участков, включая реактивности рассеяния трансформаторов, даны в омах и отнесены к собственному напряжению.

Трансформатор № I с продольно-поперечным регулированием напряжения имеет коэффициент трансформации $0,85 e^{j15}$. Трансформаторы 220/110 кВ имеют соединение обмоток $\lambda/\Delta-11$; повысительный трансформатор — 110/240 кВ, а понизительный — 220/120 кВ. Напряжение в точке 5 $U_a = 110$ кВ.

Перемещая понизительный трансформатор 220/120 кВ в точку основного питания I и совмещая его с повысительным трансформатором 110/240 кВ, получаем схему с одним трансформатором, коэффициент трансформации которого равен

$$r_2 = \frac{110}{240} \cdot e^{j30} \cdot \frac{220}{120} \cdot e^{-j30} = 0,84,$$

а сопротивления участков 5—6 и 6—1, пересчитанные к напряжению 110 кВ:

$$z_{56} = (19 + j85) \left(\frac{120}{220} \right)^2 = 5,67 + j25,4;$$

$$z_{61} = (23,9 + j130) \left(\frac{120}{220} \right)^2 = 8,64 + j38,8.$$

Для полученной таким путем схемы находим расчетные сопротивления, приведенные в табл. 1.

Приняв ориентировочно коэффициенты k_1 и k_m равными:

$$k_2 = 0,81; \quad k_3 = 0,903; \quad k_6 = 0,9,$$

определяем отдельные члены формулы (2).

Вычисление выражения $\frac{1}{U_a^2 n_1} \cdot \sum \hat{S}_l k_l z_{lc} z_{la}$ для левой части контура (табл. 2):

$$\frac{1}{U_a^2 n_1} \sum \hat{S}_l k_l z_{lc} z_{la} = \frac{24 \cdot 100 \cdot |114,7^\circ}{110^2 \cdot 0,85 \cdot |15,0^\circ} = -0,349 + j2,31.$$

Вычисление выражения $\frac{1}{U_a^2 n_1} \sum \hat{S}_l \hat{S}_l k_l k_{l_1} z_{ll_1} z_{lc}$ для левой части контура (табл. 3):

$$\frac{1}{U_a^2 n_1} \sum \hat{S}_l \hat{S}_l k_l k_{l_1} z_{ll_1} z_{lc} = 62,7 + j111,5.$$

Вычисление выражения $\frac{1}{U_a^2 n_2} \sum \hat{S}_m k_m z_{mc} z_{ma}$ для правой части контура (табл. 4):

$$\frac{1}{U_a^2 n_2} \sum \hat{S}_m k_m z_{mc} z_{ma} = \frac{23 \cdot 600 \cdot |121,1^\circ}{110^2 \cdot 0,84} = -1,2 + j1,98.$$

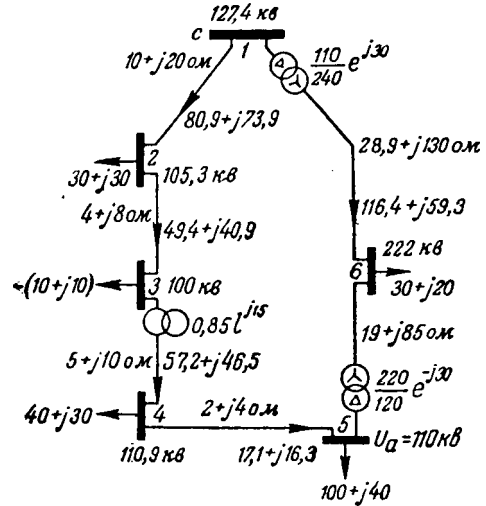


Рис. 8. Схема, рассматриваемая в примере.

Расчетное сопротивление z (3), следовательно, равно

$$z = 22 + j102,8 - 0,394 + j2,31 - 1,2 + j1,98 = 109,7 | 79,3^\circ.$$

Таблица 1

Наименование участка	Сопротивление, ом	Коэффициент трансформации	Сопротивления участков, приведенных к стороне вторичного напряжения	Расчетные сопротивления $z_p = z'n$
1(c) — 2	$10 + j20$	0,85 15°	$13,85 + j27,7 = 31 63,4^\circ$	$26,3 78,4^\circ$
2 — 3	$4 + j8$		$5,53 + j11,05 = 12,4 63,4^\circ$	$10,55 78,4^\circ$
3 — 4	$5 + j10$		$5 + j10 = 11,2 63,4^\circ$	$9,53 78,4^\circ$
4 — 5(a)	$2 + j4$		$2 + j4 = 4,47 63,4^\circ$	$3,8 78,4^\circ$
5(a) — 6	$5,67 + j25,4$	0,84	$5,67 + j25,4 = 26,0 77,4^\circ$	$21,8 77,4^\circ$
6 — 1(c)	$8,64 + j38,8$		$8,64 + j38,8 = 39,7 77,4^\circ$	$33,3 77,4^\circ$

$$\sum z_p = 22 + j102,8 = 105 | 77,9^\circ$$

Таблица 2

l	\hat{S}_l	k_l	z_{lc}	z_{la}	$\hat{S}_l k_l z_{lc}$	$\hat{S}_l k_l z_{lc} z_{la}$
2	$30 - j30 = 42,5 -45^\circ$	0,81	$26,3 78,4^\circ$	$23,88 78,4^\circ$	$905 33,4^\circ$	$21 \cdot 600 111,8^\circ$
3	$-10 + j10 = 14,1 -45^\circ$	0,903	$36,85 78,4^\circ$	$13,33 78,4^\circ$	$-470 33,4^\circ$	$-6 \cdot 270 111,8^\circ$
4	$40 - j30 = 50 -33,9^\circ$	1,0	$46,38 78,4^\circ$	$3,8 78,4^\circ$	$2 \cdot 320 41,5^\circ$	$8 \cdot 800 119,9^\circ$
					$2 \cdot 120 + j1 \cdot 775$	$24 \cdot 100 114,7^\circ$

Таблица 3

$l-l_1$	\hat{S}_l	\hat{S}_{l_1}	k_{l_1}	z_{ll_1}	$\hat{S}_l k_{l_1} z_{ll_1}$	$\hat{S}_l k_{l_1} z_{ll_1} z_{lc}$ (из табл. 2)
2 — 3	$42,5 -45^\circ$	$-14,1 -45,0^\circ$	0,903	$10,55 78,4^\circ$	$-134,5 38,4^\circ$	$905 33,4^\circ$
3 — 4	$-14,1 -45,0^\circ$	$50 -36,9^\circ$	1,0	$9,53 78,4^\circ$	$476 41,5^\circ$	$-470 33,4^\circ$
4 — 2	$50 -36,9^\circ$	$42,5 -45,0^\circ$	0,81	$20,8 78,4^\circ$	$717 33,4^\circ$	$2 \cdot 320 41,5^\circ$

Таблица 4

m	\hat{S}_m	k_m	z_{mc}	z_{ma}	$\hat{S}_m k_m z_{mc}$	$\hat{S}_m k_m z_{mc} z_{ma}$
5 (a)	$100 - j40 = 107,5 \angle -21,8^\circ$	1,0	$55,1 \angle 77,4^\circ$	0	$5930 \angle 55,6^\circ$	0
6	$30 - j20 = 36,1 \angle -33,7^\circ$	0,9	$33,3 \angle 77,4^\circ$	$21,8 \angle 77,4^\circ$	$1083 \angle 43,7^\circ$	$23600 \angle 121,1^\circ$
					$4130 + j5650$	$23600 \angle 121,1^\circ$

Таблица 5

$m-m_1$	\hat{S}_m	\hat{S}_{m_1}	k_{m_1}	z_{mm_1}	$\hat{S}_{m_1} k_{m_1} z_{mm_1}$	$\hat{S}_m k_m z_{mc}$	$\hat{S}_m \hat{S}_{m_1} k_m k_{m_1} z_{mm_1} z_{mc}$
5-6	$107 \angle -21,8^\circ$	$36,1 \angle -33,7^\circ$	0,9	$21,8 \angle 77,4^\circ$	$708 \angle 43,7^\circ$	$5930 \angle 55,6^\circ$	$4,2 \cdot 10^6 \angle 99,3^\circ$

Вычисление выражения

$$\frac{1}{U_a^2 n_2} \sum \hat{S}_m \hat{S}_{m_1} k_m k_{m_1} z_{mm_1} z_{mc}$$

для правой части контура, приведенное в табл. 5, следующее:

$$\frac{1}{U_a^2 n_2} \sum \hat{S}_m \hat{S}_{m_1} k_m k_{m_1} z_{mm_1} z_{mc} = \frac{4,2 \cdot 10^6 \angle 99,3^\circ}{110^2 \cdot 0,84} = -66,9 + j407.$$

Вычислив

$$U_a^2 (n_2 - n_1) = 110^2 (0,84 - 0,85 \angle 15^\circ) = 230 - j26600$$

и подставив в формулу (2) значения, приведенные выше, получаем

$$\hat{S}_x \cdot z = 230 - j26600 - 2120 - j1775 + 4130 +$$

$$+ j5650 - 62,7 - j111,5 - 66,9 + j407 = 2110 + j1510 = 2590 \angle 35,6^\circ,$$

т. е.

$$\hat{S}_x = \frac{2590 \angle 35,6^\circ}{109,7 \angle 79,3^\circ} = 23,6 \angle -43,7^\circ = 17,1 - j16,3.$$

Имея этот поток мощности, путем последовательного обхода участков левой части контура, а затем правой части, можно найти потоки на остальных участках и определить напряжение на шинах всех подстанций.

Результаты этого подсчета нанесены на схеме рис. 8. Точность расчета получилась вполне приемлемой, так как напряжение в точке основного питания /, найденное при обходе левой части контура, равно $127,4 \text{ кВ} \angle 21,5^\circ$, а при обходе правой части контура $127,7 \text{ кВ} \angle 21,1^\circ$.

[21. 10. 1940]



Выбор схем и параметров городских распределительных систем

Кандидат техн. наук М. И. Цейтлин

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

Городские распределительные системы, включающие питательные и распределительные сети высокого и низкого напряжения, распределительные и трансформаторные пункты и прочие эле-

менты, имеют своей основной задачей надежное и бесперебойное электроснабжение городских потребителей при достаточно высоких качественных показателях. Распределение электроэнергии должно вместе с тем осуществляться при минимальных капитальных затратах и эксплуатационных расходах с соблюдением строжайшей экономии цветных металлов и электроэнергии.

Совмещение перечисленных условий представляет сложную и подчас трудно выполнимую задачу, в особенности при тех темпах роста городов и подъема их благоустройства, которые имеют место в СССР.

В условиях социалистического строительства темпы развития городов исключительные, совершенно не свойственные ни одному капиталистическому государству. В связи с этим перед городскими распределительными системами, пропуская способность которых, естественно, ограничена, возникают трудные задачи по обеспечению столь бурно растущих потребностей. В ряде случаев в результате перегрузок городские сети имеют низкие качественные показатели при значительных потерях электроэнергии и высокой стоимости ее распределения.

Наибольшее распространение в городах СССР получила система двух напряжений: высокого (6 или 10) кВ для питательных и первичных распределительных сетей, и низкого напряжения — для вторичных распределительных сетей. Узловыми пунктами сети являются распределительные пункты для первичных распределительных сетей трансформаторные пункты — для низковольтных линий. Эти схемы, однако, уже не удовлетворяют потребности большинства городов, и, таким образом, выдвигается задача коренной реконструкции современных городских сетей.

Рассмотрен вопрос выбора напряжения и мощности трансформаторных пунктов и подстанций, а также выбора системы распределения электроэнергии в городах. Дан ряд принципиальных решений по выбору систем распределения электроэнергии для разных типов городов. Приведено графическое и аналитическое решение для определения экономичности вариантов при переменных исходных величинах.

Основными направлениями реконструкции сетей могут явиться:

1. Применение для питательных сетей более высокого напряжения — 35 кВ и преобразование существующих систем двух на-

пряжений (6/0,4 или 10/0,4 кВ) в систему трех напряжений. В своем законченном виде подобная схема состоит из высоковольтных линий 35 кВ, распределительной сети 10 (или 6) кВ, и низковольтных линий. Основными узлами сети в данном случае являются подстанции 35/10 или 35/6 кВ, играющие роль распределительных пунктов, мощность которых должна оставаться в определенных, сравнительно небольших, пределах. При этой схеме сохраняется вся существующая сеть высокого напряжения, используемая как чисто распределительная.

2. Коренная реконструкция всей сети путем замены существующего напряжения 6(10) кВ на более высокое (15 или 20 кВ). При этом сохраняется в основном система двух напряжений, но к трансформаторным пунктам подводится непосредственно высокое напряжение. Подобная система повлечет за собой изменение существующих соотношений между всеми элементами распределительных систем. В первую очередь это касается, наряду с напряжением, мощности трансформаторных и распределительных пунктов.

Названные две системы распределения электроэнергии были исследованы на примере теоретических типовых городов с населением в 100; 200; 300 и 400 тыс. жителей при различных нагрузках. Объектами исследований при системе двух напряжений были: напряжение высоковольтной сети, мощность трансформаторных пунктов и количество распределительных пунктов.

Для системы трех напряжений были приняты стандартные напряжения — 35; 6 (или 10) и 0,4 кВ и подвергнута исследованию мощность трансформаторных подстанций 35/6 или 36/10 кВ.

Основным критерием при исследовании и сопоставлении вариантов принимались годовые

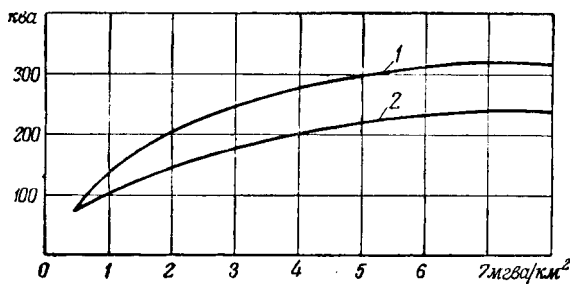


Рис. 1. Оптимальная мощность трансформаторных пунктов в зависимости от плотности нагрузок при напряжениях 15, 20 и 35 кВ (кривая 1) и 6, 10 кВ (кривая 2).

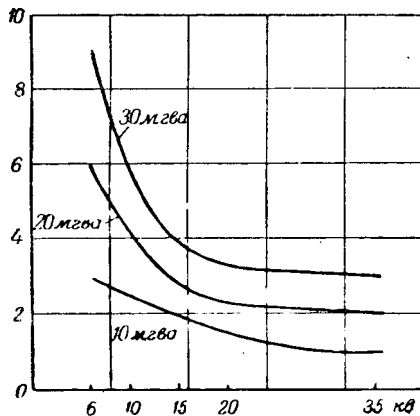


Рис. 2. Число распределительных пунктов в зависимости от напряжения.

эксплуатационные расходы. Мощность трансформаторных пунктов, рассмотренная под этим углом зрения, представляет собой функцию напряжения сети и плотности электропотребления (рис. 1). В особенности значительна роль электропотребления. Тем не менее эта мощность остается все же в сравнительно ограниченных пределах и возрастает довольно медленно, что объясняется ролью низковольтной сети, стоимость которой с увеличением мощности трансформаторных пунктов при сохранении заданных условий качества электроэнергетики резко возрастает.

Мощность распределительных пунктов и их количество также зависят от названных двух факторов. Однако, в данном случае напряжение, безусловно, сказывается значительно, и пределы изменения мощности несравненно шире. Определяющим фактором является соотношение между стоимостью оборудования и стоимостью линий высокого напряжения. С повышением напряжения затраты на оборудование превосходят экономия затрат на сооружение линий, вследствие чего экономичность дробления распределительных пунктов становится весьма проблематичной.

Поэтому в системе двух напряжений число распределительных пунктов с повышением напряжения резко убывает. Если при напряжении 6 кВ и нагрузке 20 мгва необходимо сооружение

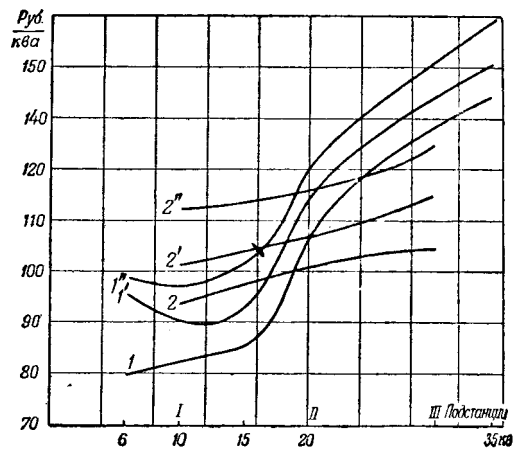


Рис. 3. Эксплуатационные расходы по распределительной системе для городов с населением 100 — 300 тыс. жителей. Нагрузка 10 тыс. кВа.

1—система двух напряжений; 2—система трех напряжений; 1, 2—100 тыс. жителей; 1', 2'—200 тыс.; 1'', 2''—300 тыс. жителей.

6 пунктов, то при 35 кВ и той же нагрузке достаточно двух пунктов. Таким образом, мощность пункта возрастает примерно в 3 раза. Общий характер зависимости числа распределительных пунктов от напряжения сети показан на рис. 2.

Рассмотренная аналогичным образом в системе трех напряжений¹ мощность подстанций дает также определенную зависимость их числа от нагрузки города. Эта зависимость представлена на кривых рис. 3—5.

Центральным вопросом при рассмотрении систем двух напряжений является выбор напряжения сети. При сопоставлении вариантов напряжение менялось в пределах от 6 до 35 кВ.

В результате проведенных исследований представляется возможным сделать ряд выводов. Эти выводы представлены в виде кривых (рис. 3—5).

Для города в 100 тыс. жителей при нагрузке в 10 тыс. кВа оптимальным является напряжение 6 кВ, при более высоких нагрузках — 10 кВ; для города с 200 тыс. жителей оптимальное напряжение — 10 кВ в пределах нагрузки до 20 тыс. кВа. При более высоких нагрузках преимущество получает следующая ступень напряжения — 15 кВ; города с 300 тыс. жителей имеют оптимальное напряжение 10 кВ только при нагрузке в 10 тыс. кВа; при более высоких нагрузках это напряжение уже оказывается недостаточным, необходимо переходить на более высокое напряжение — 15 кВ. Зоны оптимальных напряжений для разных городов при разных нагрузках наглядно представлены на рис. 6.

Аналогичным образом была установлена для городов более крупных (с населением в 400 тыс. жителей и выше) целесообразность применения повышенного напряжения, в частности, 20 кВ. Так, сопоставление ряда показателей для такого города при разных напряжениях сети дает сле-

¹ Относящиеся к этому разделу исследования были выполнены Б. Л. Шифринсон.

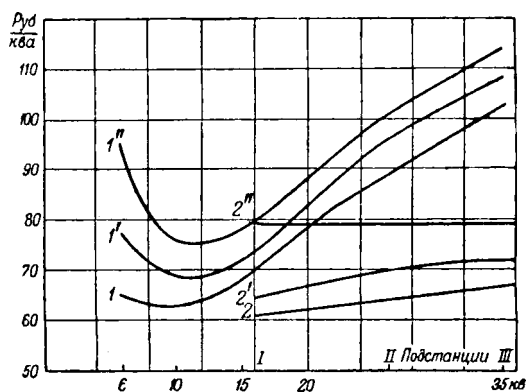


Рис. 4. Эксплуатационные расходы по распределительной системе для городов с населением 100—300 тыс. жителей. Нагрузка 20 тыс. кв. 1—система двух напряжений; 2—система трех напряжений; 1, 2—100 тыс. жителей; 1', 2'—200 тыс.; 1'', 2''—300 тыс. жителей.

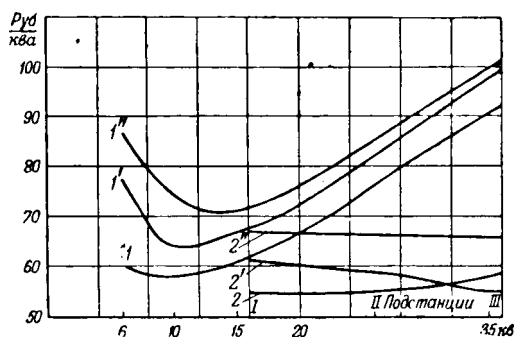


Рис. 5. Эксплуатационные расходы по распределительной системе для городов с населением 100—300 тыс. жителей. Нагрузка 30 тыс. кв. 1—система двух напряжений, 2—система трех напряжений; 1, 2—100 тыс. жителей, 1', 2'—200 тыс., 1'', 2''—300 тыс. жителей.

дующие соотношения (в процентах) для отдельных показателей:

Показатели	Напряжение, кв		
	6/0,4	±5/6/0,4	±0/0,4
Капитальные затраты	100	113	103
Потери энергии	100	68,5	71,5
Расход цветных металлов	100	69,0	35,3
Эксплуатационные расходы (при стоимости энергии 0,1 руб/квтч)	100	82,5	80,3

Отсюда следует, что в крупном городе со значительной нагрузкой порядка 75 тыс. кв при системе двух напряжений рационально ввести напряжение 20 кв. Однако, с этой системой вполне сопоставима и система трех напряжений 35/6/0,4 кв и в особенности 35/10/0,4 кв, которая также дает довольно значительную экономию в эксплуатационных расходах при незначительных дополнительных затратах.

Таким образом, для малых и средних городов (до 200 тыс. жителей и 20 тыс. кв нагрузки) выбор системы распределения электроэнергии решается сравнительно просто и однозначно. Беспорное преимущество имеет система двух напряжений — 6/0,4 кв или 10/0,4 кв, и при возможности выбора напряжения, несомненно, следует предпочесть 10 кв, как более перспективное напряжение, обеспечивающее развитие электроснабжения города.

Для крупных городов дело обстоит значительно сложнее. Прежде всего следует иметь в виду, что при разработке электроснабжения крупного города сталкиваются с уже существующей, более или менее развитой электрической сетью, с которой, разумеется, нельзя не считаться при реконструкции. Далее, выбирая систему распределения электроэнергии, необходимо учитывать, что менять ее каждые 5—10 лет и, в частности, заново выбирать напряжения сети не представляется возможным.

Отсюда следует, что применительно к городам с 300 тыс. жителей населения и более — выбор системы электроснабжения не решается однозначно. Возможно применение как системы трех напряжений, так и двух.

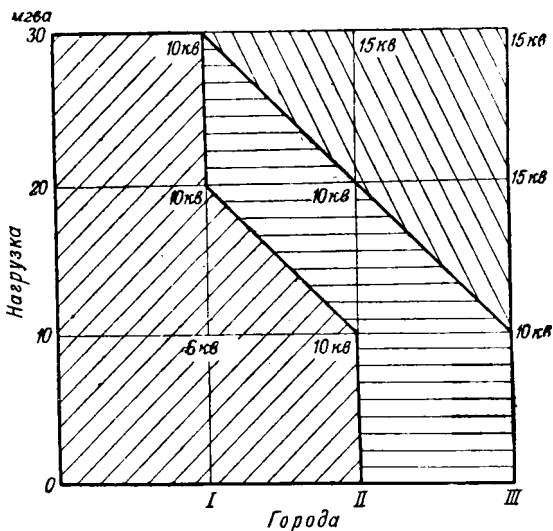


Рис. 6. Зоны оптимальных напряжений.

Система трех напряжений — 35/10/0,4 или 35/6/0,4 кв при наличии соответственно развитой сети 6 или 10 кв может в ряде случаев оказаться единственно правильным решением для электроснабжения городов. Благодаря наличию 35 кв система электроснабжения города приобретает достаточную гибкость, и обеспечение потребностей его осуществляется наиболее просто и легко путем сооружения дополнительных подстанций 35/10 или 35/6 кв. Другой возможной системой для электроснабжения крупного города может явиться система двух напряжений. При этой системе приобретает решающее значение выбор напряжения высоковольтной сети.

Выявленное преимущество для некоторых городов напряжения 15 кв носит переходящий характер и касается ограниченного числа городов.

К выбору напряжения практически возвращаться не приходится, поэтому при реконструкции сети необходимо выбирать такое напряжение, которое соответствовало бы развитию города на длительный период. Таким напряжением с системой двух напряжений может явиться, в случае его введения в стандарт, напряжение 20 кв. Распределение электроэнергии по городу будет осуще-

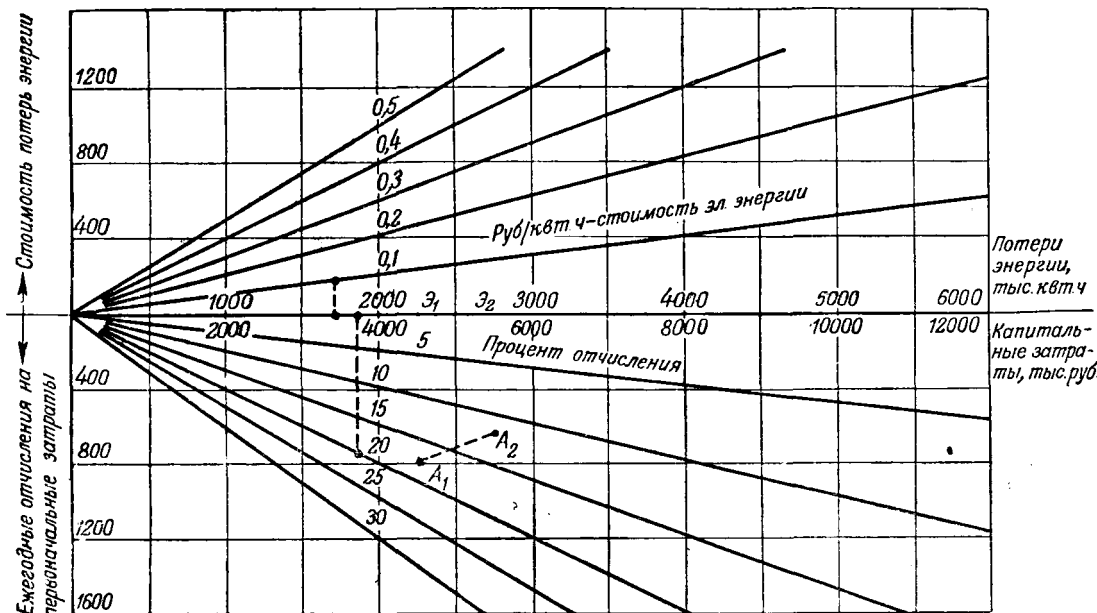


Рис. 7. Графическое определение эксплуатационных расходов при переменной стоимости энергии и различном числе процентов отчислений на первоначальные затраты.

ствляться от распределительных пунктов 20 кВ и трансформаторных пунктов 20/0,4 кВ. Принципиальная схема электроснабжения такой системы мало отличается от современных схем двух напряжений. Следует лишь учесть, что число распределительных пунктов при данном напряжении должно быть значительно меньше, чем при напряжении 10 кВ или, тем более, 6 кВ.

Суммируя все вышесказанное, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Для городов с 100—200 тыс. жителей при нагрузке сети общего пользования в пределах 10—20 мвга основным рекомендуемым напряжением при сооружении новой сети должно быть напряжение 10 кВ.

Дальнейшее развитие этой сети, в соответствии с ростом нагрузок города, может осуществляться либо путем перехода на напряжение 20 кВ, либо путем ввода напряжения 35 кВ в качестве третьего напряжения сети и преобразования системы двух напряжений в систему трех напряжений.

2. Для крупных городов основными системами распределения электроэнергии могут быть: системы трех напряжений — 35/10/0,4 кВ или 35/6/0,4 кВ; система двух напряжений 20/0,4 кВ.

Вопрос о преимущественном применении той или иной системы решается в зависимости от конкретных условий отдельных городов. Решающим моментом в выборе системы электроснабжения является степень развития существующей сети.

Не меньшее значение приобретают также такие вопросы, как упрощение распределительных устройств, применение высоковольтных предохранителей и разъединителей мощности, комплектных распределительных устройств и т. п., что значительно облегчит внедрение высокого напряжения в городские электрические сети.

В отношении напряжения 20 кВ следует обратить особое внимание на введение и освоение на

городских электростанциях генераторного напряжения 20 кВ, во избежание промежуточной трансформации электроэнергии на это напряжение, а также на разработку конструкции высокоэкономичных маломощных трансформаторов 20/0,4 кВ для распределения электроэнергии при данном напряжении.

Приложение. Как указывалось, основным критерием рассмотрения вариантов явились годовые эксплуатационные расходы. Предполагалось, что они складываются из отчислений на капитальные затраты и стоимости потерь электроэнергии. Как те, так и другие зависят от принятых процентов отчислений и стоимости электроэнергии.

Для учета возможных изменений в работе принят излагаемый ниже метод.

На рис. 7 построена диаграмма, на оси абсцисс которой откладываются в определенном масштабе потери электроэнергии. Из начала координат проводится ряд наклонных линий под углами, соответствующими разной стоимости электроэнергии. Отрезки по оси ординат от любой точки оси абсцисс до пересечения с этими линиями будут обозначать стоимость потерь электроэнергии при разной стоимости последней. Аналогично на той же оси абсцисс откладываются капитальные затраты. Из начала координат с наклоном вниз проводится ряд линий под углами, соответствующими разным процентам отчислений от капитальных затрат. Отрезки по оси ординат вниз будут обозначать размер годовых отчислений при заданном их проценте.

При соответствующем подборе масштабов перечисленных величин годовые эксплуатационные расходы могут быть получены путем простого суммирования отрезков между двумя наклонными линиями, из которых одна будет обозначать стоимость потерь электроэнергии, а другая — размеры годовых отчислений.

Изложенный метод позволяет графическим путем установить условия равноценности нескольких вариантов. Так, при неизменности годовых отчислений равенство эксплуатационных расходов разных вариантов может наступить при определенной стоимости электроэнергии. Это может быть установлено графически. На рис. 7 видно, что для двух вариантов, из которых в одном выше составляющая потеря электроэнергии, а в другом — составляющая отчислений — для получения равных суммарных эксплуатационных расходов обоих вариантов, необходимо найти в верхней части диаграммы наклонную линию, которая была бы параллельна линии $A_1 - A_2$, соединяющей в нижней части диаграммы точки, соответствующие величинам годовых отчислений.

Аналитически это же может быть выражено следующим образом.

Обозначая для двух сравниваемых вариантов: A_1 и A_2 — первоначальные затраты; ε_1 и ε_2 — соответствующие потери электроэнергии, x и y — соответственно проценты отчислений и стоимость электроэнергии, можно годовые эксплуатационные расходы выразить следующим образом: $x A_1 + y \varepsilon_1$ — годовые эксплуатационные расходы при первом варианте; $x A_2 + y \varepsilon_2$ — то же, при втором варианте.

При равенстве годовых эксплуатационных расходов обоих вариантов

$$x A_1 + y \varepsilon_1 = x A_2 + y \varepsilon_2.$$

Отсюда следует, что стоимость электроэнергии при этих условиях

$$y = x \cdot \frac{A_1 - A_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (a)$$

Если фактическая стоимость электроэнергии больше полученной из выражения (a), то более экономичен вариант с более высокими капитальными затратами и меньшими потерями. В противном случае, при более низкой стоимости электроэнергии преимущество получает вариант с меньшими капитальными затратами и большими потерями.

[31. 10. 1949]



Регулировочные характеристики серийной машины при шунтировании обмотки возбуждения

Доктор техн. наук, проф. Н. В. ГОРОХОВ

Москва

При анализе принято, что машина — компенсированная и магнитная система не насыщена. Ограничения, обусловленные механической прочностью и коммутацией, не учитываются.

Рассмотрены скоростная, механическая и регулировочная характеристики машины постоянного тока с последовательным возбуждением при шунтировании обмотки возбуждения. При анализе использован метод относительных величин. Установлено влияние основных параметров машины на форму рабочих кривых.

При $\rho = 1$ (серийная машина без шунтирования поля) получим:

$$n = \frac{U}{C \cdot I} - \frac{R_x}{C} - \frac{c}{C} = n_0 - \Delta n; \quad (4)$$

$$n_0 = \frac{U}{C I},$$

кривая пограничной скорости и

$$\Delta n = \frac{R_x + r_c}{C} = \frac{R}{C} = \Delta n_x + \Delta n_c$$

— падение скорости, обусловленное наличием сопротивлений цепи якоря R_x и обмотки возбуждения r_c .

Таким образом, прямая Δn является асимптотой для кривой $n = f(I)$.

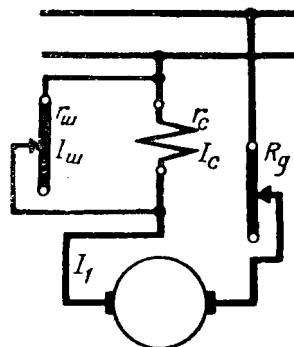


Рис. 1. Схема включения серийной машины с шунтированием обмотки возбуждения.

Согласно обозначениям рис. 1 можно написать: здесь

$$I_1 = I_c + I_w,$$

$$I_c r_c = I_w \cdot r_w,$$

откуда

$$I_c = \rho I_1,$$

где

$$\rho = \frac{r_w}{r_c + r_w}.$$

Величина ρ называется коэффициентом шунтирования поля, он изменяется в пределах $1 \div 0$.

При $r_w = \infty, \rho = 1, I_c = I$ и мы имеем уравнения для серийной машины без шунтирования поля.

Напишем совершенно очевидные равенства:

$$U = E_1 + I_1 \cdot R_s, \quad (1)$$

$$E_1 = C_E \cdot \Phi_1 \cdot n_1 = C_E \cdot k \cdot I_c \cdot n_1 = C \cdot \rho \cdot I_1 \cdot n_1, \quad (2)$$

$$\Phi_1 = k \cdot I_c,$$

$$R_s = (r_x + R_d) + \rho \cdot r_c = R_x + \rho \cdot r_c,$$

$$C = C_E \cdot k.$$

Индекс 1 здесь и в дальнейшем указывает, что речь идет о машине с шунтированием поля. Решая уравнения (1) и (2) относительно n_1 , получим уравнение скоростной характеристики машины в виде

$$n_1 = \frac{U}{C I_1 \rho} - \frac{R_x}{C \cdot \rho} - \frac{r_c}{C} = \frac{U}{C I_1 \cdot \rho} - \Delta n_1. \quad (3)$$

Подобный результат, как показал впервые Е. В. Нитусов [Л. 1], справедлив только при отсутствии насыщения магнитной цепи машины.

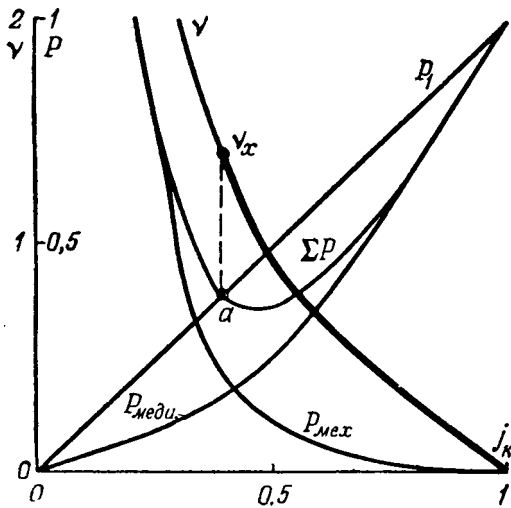


Рис. 2. Определение скорости холостого хода сериесной машины графическим способом.

Применяя аппроксимацию

$$\Phi = \frac{\Phi_n (1 + Y)}{I_n + YI} I,$$

где I_n — номинальное значение тока, а Φ_n и Y — параметры, определяемые из характеристики намагничивания. Е. В. Нитусов показал, что в этом случае асимптотой кривой $n = f(I)$ является прямая

$$\Delta n' = \frac{(U - I_n R) - YRI}{C\Phi_n (1 + Y)},$$

наклоненная к оси абсцисс под углом

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{YR}{C\Phi_n (1 + Y)}.$$

Влияние насыщения особенно сказывается при работе машины в режиме противовключения. В дальнейшем, в основном рассматривается двигательный режим машины. Поэтому в качестве первого приближения, как указано выше, принимаем магнитную цепь машины не насыщенной. Такое упрощение позволяет в весьма простой и наглядной форме установить основные связи для статических характеристик машины.

Сделаем одно небольшое попутное замечание.

При построении кривой $n = f(I)$ или $n = f_1(M)$ сериесной машины часто пренебрегают слагающей Δn , так что эти кривые асимптотически приближаются к оси абсцисс. Кроме того, не учитывая физики явления, левую ветвь этих гипербол продолжают вверх, в бесконечность.

Не представляет труда освободиться от этих двух, вовсе лишних и физически не оправданных, допущений.

Рассматриваемые кривые, при условии $\Delta n \neq 0$, как известно, пересекают ось абсцисс в точках I_k и M_k . Точка же холостого хода n_{xx} легко определяется с практической точностью потерями в машине.

На рис. 2 показано графическое определение скорости холостого хода n_{xx} для машины М8 а [Л. 2].

В точке a пересечения прямой подведенной мощности $P_1 = U \cdot I$ с кривой суммарных потерь

$$\Sigma P = P_{мед} + P_{мех} + P_{ст}$$

имеем равенство

$$P_1 = \Sigma P.$$

Зная точку a , можно найти скорость холостого хода n_{xx} . На рис. 2 кривые построены в относительных единицах, причем за единицы сравнения приняты: I_k , P_{1k} , n_n . Потерями в стали пренебрегается, так как подсчет показал, что они очень малы.

Введя в равенство (3) пограничную скорость n_0 и падения скорости Δn_x и Δn_c , получим:

$$n_1 = \frac{n_0}{\rho} - \frac{\Delta n_x}{\rho} - \Delta n_c = n_{01} - \Delta n_{x1} - \Delta n_c. \quad (5)$$

Таким образом, при шунтировании поля пограничная скорость n_{01} и падение скорости Δn_{x1} , обусловленное сопротивлением цепи якоря $R_{я}$, изменяются в отношении $1:\rho$. Падение скорости Δn_c не меняется.

При анализе схемы рис. 1 целесообразно использовать метод относительных величин.

Для выражения (5) в качестве основной величины примем скорость $n_{0н}$ по кривой $n_0 = f(I)$, соответствующую номинальному значению тока I_n и, следовательно, номинальному значению момента M_n .

Таким образом, будем иметь:

$$v = \frac{n}{n_{0н}}, \quad \Delta v_x = \frac{\Delta n_x}{n_{0н}},$$

$$v_0 = \frac{n_0}{n_{0н}}, \quad \Delta v_c = \frac{\Delta n_c}{n_{0н}} \text{ и } j = \frac{I}{I_n}.$$

При этих условиях уравнение скоростной характеристики примет вид

$$v_1 = \frac{v_0}{\rho} - \frac{\Delta v_x}{\rho} - \Delta v_c. \quad (6)$$

Легко показать, что

$$v_0 \cdot j = 1.$$

Действительно

$$n_0 = \frac{U}{CI} \quad n_{0н} = \frac{U}{CI_n};$$

$$v_0 = \frac{n_0}{n_{0н}} = \frac{U}{CI} : \frac{U}{CI_n} = \frac{I_n}{I} = \frac{1}{j} \text{ и } v_0 j = 1.$$

Рассмотрим полученное выражение (6). При постоянной величине коэффициента шунтирования поля ρ это уравнение (6) представляет собой кривую, весьма просто связанную с кривой пограничной скорости $v_0 = f(j)$, как это показано на рис. 3, где по оси абсцисс отложены относительные значения тока $j = I:I_n$.

Очевидно, что в общем случае скорость v_1 равна нулю при соблюдении условия

$$v_0 = v'_0 = \Delta v_x + \rho \cdot \Delta v_c.$$

На рис. 3 приведены кривые $v_1 = f(j_1)$ для $\Delta v_x = 0,4$, $\Delta v_c = 0,2$ и коэффициенте шунтирования поля $\rho = 0,5$. Здесь $v'_0 = 0,5$ и $j_1 = 2$.

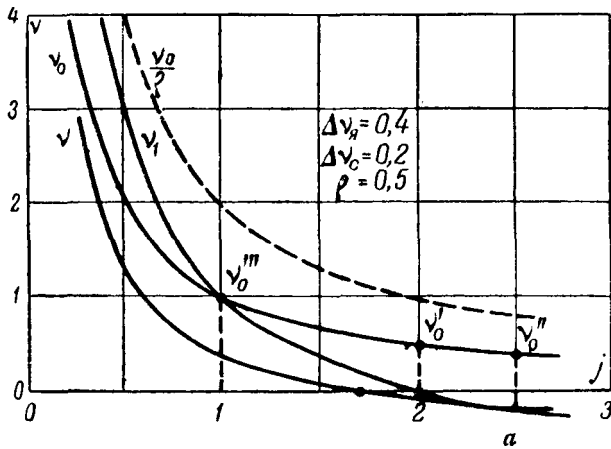


Рис. 3. Скоростные характеристики машины с шунтированием обмотки возбуждения и без шунтирования.

Как видно из рассмотрения рис. 3, соответствующие кривые $v=f(j)$ и $v_1=f_1(j_1)$ пересекаются в точке a , которая может быть найдена из условия равенства $v_1=v$. Последнее, как это легко проверить, приводит к равенству $v_0''=\Delta v_{\text{я}}$ и, следовательно, $j''=\frac{1}{\Delta v_{\text{я}}}$. Для примера рис. 3 $\Delta v_{\text{я}}=0,4$ и $j''=2,5$.

Таким образом, при условии

$$n_0 = \Delta n_{\text{я}} = \frac{R_{\text{я}}}{C}$$

скорость серийной машины при шунтировании поля равна скорости серийной машины без шунтирования поля. Этот результат ограничивает часто встречающееся положение: для одного и того же значения тока якоря скорость серийного двигателя при шунтировании поля возрастает.

Подставив в (6) вместо v_0 величину $\Delta v_{\text{я}}$, получим величину скорости шунтированной машины v_0'' , при которой $v_1=v$:

$$v_0'' = \frac{\Delta v_{\text{я}}}{\rho} - \frac{\Delta v_{\text{я}}}{\rho} - \Delta v_{\text{с}} = -\Delta v_{\text{с}}$$

Отсюда следует, что точка пересечения кривых $v=f_1(j_1)$ и $v=f(j)$ получается в области тормозного режима машины.

Отметим, что сравнение скоростей машины для одного и того же значения тока предполагает, что регулирование ведется для $P_1=\text{const}$. Это обстоятельство, как правило, не подчеркивается.

При шунтировании поля и наличии дополнительного сопротивления R_0 в цепи якоря, общее сопротивление цепи машины

$$R_s = r_{\text{я}} + R_0 + \rho \cdot r_c$$

При обычных величинах сопротивлений $r_{\text{я}}$, r_c и $\rho < 1$ в ряде случаев можно положить $R_s \approx \text{const}$. Отсюда следует, что при этих условиях

$$P_s = P_1 - I_1^2 \cdot R_s \approx \text{const},$$

регулирование при $P_1 = \text{const}$ является одновременно регулированием при $P_s = \text{const}$.

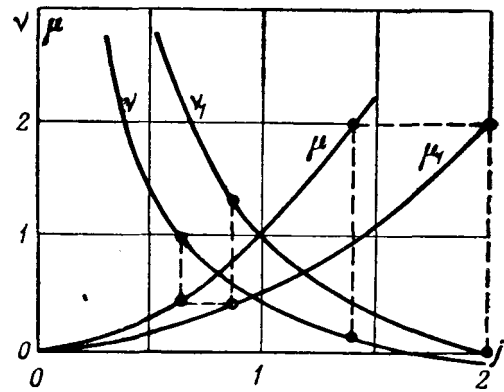


Рис. 4. Определение скорости вращения машины с шунтированием обмотки возбуждения и без шунтирования при одном и том же значении вращающего момента.

При регулировании шунтированием поля возможно получить $n_1 > n_0$.

Это будет иметь место при выполнении условия:

$$v_1 = \frac{v_0}{\rho} - \frac{\Delta v_{\text{я}}}{\rho} - \Delta v_{\text{с}} > v_0,$$

отсюда получим:

$$v_0''' > \frac{\Delta v_{\text{я}} + \rho \cdot \Delta v_{\text{с}}}{1 - \rho}$$

и

$$j''' = \frac{1 - \rho}{\Delta v_{\text{я}} + \rho \cdot \Delta v_{\text{с}}}$$

Для примера рис. 3: $j''' = 1$.

Рассмотрим регулирование при $M = \text{const}$, $\rho = \text{var}$. С этой целью на рис. 4 нанесем кривые $v=f(j)$ и $v_1=f_1(j_1)$, а также $\mu=f_2(j)$ и $\mu_1=f_3(j_1)$.

Для величины вращающего момента при шунтировании поля можно написать:

$$M = C_m \cdot \Phi_1 \cdot I_1 = C_m \cdot k \cdot I_c \cdot I_1 = C_m k I_1^2 \cdot \rho = M \cdot \rho, \quad (7)$$

где M — момент, развиваемый серийной машиной при отсутствии шунтирования поля.

Введя относительные величины

$$\mu_1 = M_1 : M_n \quad \text{и} \quad f_1 = I_1 : I_n,$$

получим:

$$\mu_1 M_n = C_m \cdot k \cdot I_n^2 j_1 \cdot \rho,$$

откуда

$$\mu_1 = j_1^2 \cdot \rho \quad \text{и} \quad j_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\rho}}.$$

На рис. 4 построены кривые $\mu_1=f_1(j_1)$ для $\rho=1$ и $\rho=0,5$. Рассмотрение этих кривых показывает, что для различных величин вращающего момента машины возможны случаи как $v_1 > v$, так и $v_1 < v$ (см. точки на кривых рис. 4, соответствующие $\mu_1 = \mu = 0,4$ и $\mu_1 = \mu = 2$).

Более наглядно эти результаты можно получить, выразив n в функции M , т. е. из уравнения механической характеристики.

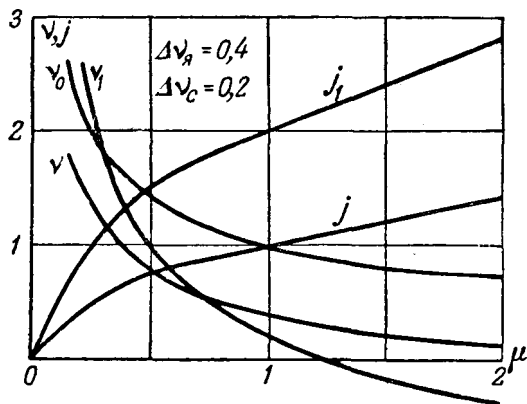


Рис. 5. Механические характеристики машины с шунтированием обмотки возбуждения и без шунтирования.

Из выражения (7) для вращающего момента машины при шунтировании поля получим

$$I = \sqrt{\frac{M_1}{C_m k \cdot \rho}} \tag{8}$$

При $\rho = 1$

$$I_1 = I = \sqrt{\frac{M}{C_m k}}$$

Отсюда, между прочим, следует, что

$$\text{при } I_1 = I, \quad M_1 = M \cdot \rho,$$

$$\text{при } M_1 = M, \quad I_1 = \frac{I}{\sqrt{\rho}}.$$

Подставим выражение (8) в (3) и получим:

$$n_1 = \frac{U}{C_1 \sqrt{M_1} \cdot \sqrt{\rho}} - \frac{\Delta n_x}{\rho} - \Delta n_c \tag{9}$$

При $\rho = 1$ будем иметь известное выражение для механической характеристики серийной машины:

$$n = \frac{U}{C_1 \sqrt{M}} - \Delta n = n_0 - \Delta n,$$

где n_0 — кривая пограничной скорости для данного случая.

Очевидно, что для $\rho \neq 1$ можно написать:

$$n_1 = \frac{n_0}{\sqrt{\rho}} - \frac{\Delta n_x}{\rho} - \Delta n_c$$

или, введя, как и выше, относительные величины, получим выражение механической характеристики в следующем виде:

$$v_1 = \frac{v_0}{\sqrt{\rho}} - \frac{\Delta v_x}{\rho} - \Delta v_c \tag{10}$$

Легко показать, что в этом случае

$$v_0 \cdot \sqrt{\mu} = 1 \quad \text{и} \quad \mu = \frac{1}{v_0^2}.$$

На рис. 5 представлены зависимости $v_1 = f(\mu_1)$ для значений $\rho = 1$ и $\rho = 0,25$, где принято, как и выше, $\Delta v_x = 0,4$, $\Delta v_c = 0,2$. Здесь же приведена кривая пограничной скорости $v_0 = f_2(\mu)$.

Как видно из рассмотрения этого рисунка, кривые $v_1 = f_1(\mu_1)$ и $v = f(\mu)$ пересекаются в точке, соответствующей $v_0 = 1,2$. При $v_0 > 1,2$ мы имеем $v_1 > v$ и при $v_0 < 1,2$, наоборот, $v > v_1$. Таким образом, при данном коэффициенте шунтирования поля, например $\rho = 0,25$, скорость машины с шун-

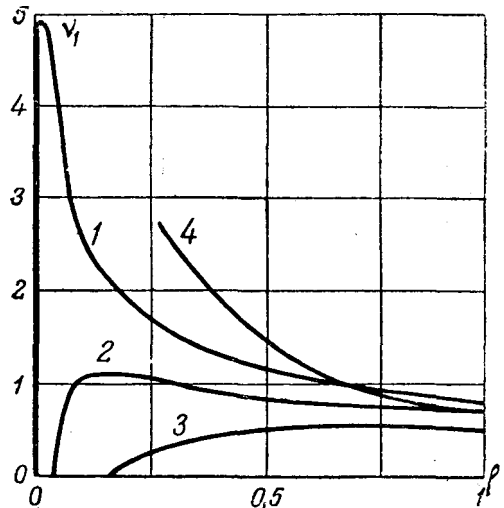


Рис. 6. Регулировочные характеристики машины при шунтировании обмотки возбуждения.

тированием поля может быть и больше и меньше скорости машины без шунтирования поля ($\rho = 1$).

При $v_0 = 1,8$, $v_1 = v_0 = 1,8$, здесь $\mu = 0,309$.

Из выражения (10) можно легко получить следующие соотношения в общем виде:

1) $v_1 = 0$ при условии

$$v_0' = \frac{\Delta v_x + \rho \cdot \Delta v_c}{\sqrt{\rho}};$$

2) $v_1 = v$ при условии

$$v_0'' = \Delta v_x \cdot \frac{1 + \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}}.$$

Величина скорости v_1'' найдется из выражения:

$$v_1'' = \frac{\Delta v_x}{\sqrt{\rho}} - \Delta v_c;$$

3) $v_1 = v_0$ при условии

$$v_0''' = \frac{\Delta v_x + \rho \cdot \Delta v_c}{\sqrt{\rho} (1 - \sqrt{\rho})}.$$

Кривые $j_1 = f_1(\mu_1)$ и $j = f(\mu)$ для принятых выше условий представлены на рис. 5.

Найдем закон изменения скорости машины при постоянном значении вращающего момента $M = \text{const}$ и $\rho = \text{var}$ [Л. 3], $n_1 = f(\rho)$, другими словами, найдем уравнение регулировочной характеристики.

Очевидно, что уравнение (10), если в нем положить $v_0 = \text{const}$, или $\mu_1 = \text{const}$ и $\rho = \text{var}$, и будет уравнением регулировочной характеристики. Таким образом, задавшись величинами v_0 , Δv_x , Δv_c , можно построить кривую $v_1 = f(\rho)$, как это показано на рис. 6.

Из кривых рис. 6 следует, что при изменении коэффициента шунтирования ρ от 1 до 0 скорость машины v_1 при заданном вращающем моменте $v_0(\mu_1)$ вначале (от $\rho = 1$) возрастает, достигает максимума и затем снижается до нуля, после чего при наличии активного момента на валу машины она переходит в тормозной режим.

Величины падения скорости Δv_x и Δv_c весьма существенно влияют на характеристику $v_1 = f(\rho)$.

При малых значениях Δv_x получаются большие пределы изменения скорости при регулировании.

Не представляет труда аналитически исследовать закон изменения v_1 в функции ρ . Найдем, при какой величине ρ_0 скорость v_1 равна нулю. Из уравнения (10) получим:

$$\frac{v_0}{\sqrt{\rho}} - \frac{\Delta v_x}{\rho} - \Delta v_c = 0,$$

откуда найдем:

$$\rho_{0(1,2)} = \left[\frac{v_0 \pm \sqrt{v_0^2 - 4 \cdot \Delta v_x \cdot \Delta v_c}}{2 \cdot \Delta v_c} \right]^2. \quad (11)$$

Величину ρ_m , соответствующую максимальному значению скорости v_m , легко получим, взяв производную по ρ от выражения (10) и приравняв ее нулю.

Решая, найдем:

$$\rho_m = \left[2 \cdot \frac{\Delta v_x}{v_0} \right]^2 = \mu_1 [2 \cdot \Delta v_x]^2$$

$$v_m = \frac{v_0^2}{4 \cdot \Delta v_x} - \Delta v_c = \frac{1}{4 \Delta v_x \cdot \mu_1} - \Delta v_c. \quad (12)$$



Влияние скорости изменения скольжения на момент асинхронной машины

Кандидат техн. наук А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ

Московский энергетический институт им. Молотова

Современная теория электропривода пренебрегает влиянием скорости изменения скольжения на механические характеристики асинхронной машины. Предполагается, что каждому скольжению машины соответствует вполне определенное значение электромагнитного момента как при установившемся, так и при изменяющемся с некоторой скоростью скольжении (пуск, торможение). Между тем, статическая механическая характеристика вполне точна только при установившихся скольжениях.

В 1944 г. был опубликован частный пример расчета зависимости электромагнитного момента от скольжения, изменяющегося с постоянной скоростью [Л. 3]. Из этого примера расчета, проведенного с помощью интеграла, можно было заметить, что электромагнитный момент, найденный с учетом скорости изменения скольжения и называемый динамическим электромагнитным моментом M , иногда значительно отличается от статического электромагнитного момента M_s .

В 1945 г. Е. Я. Казовский, пренебрегая активным сопротивлением статора машины и считая

Таким образом, на величину ρ_m оказывает влияние только относительное падение скорости Δv_x , обусловленное наличием сопротивления R_x в цепи якоря.

Полученные выражения (10)—(12) легко поддаются анализу, поэтому не представляет труда выявить влияние отдельных параметров v_0 , μ_1 , Δv_x , Δv_c на характер протекания кривой $v_1=f(\rho)$. Анализ мы здесь не приводим.

Регулировочную характеристику при $P_1 = \text{const}$ мы получим, положив в равенстве (6) $v_0 = \text{const}$ и $\rho = \text{var}$. Эта характеристика $v_{11}=f_1(\rho)$ для $v_0 = \mu = 1$, $\Delta v_x = 0,2$ и $\Delta v_c = 0,1$ приведена на рис. 6. Как видно, кривая $v_{11}=f_1(\rho)$ получается более мягкой, чем кривая $v_1=f(\rho)$.

Литература

1. Е. В. Нитусов. Об энергетике торможения двигателей последовательного возбуждения. Электричество, № 11—12, 1944.

2. В. А. Талалай. Электромоторы постоянного тока облегченной конструкции мощностью от 0,5 до 50 вт. Издание ЦАГИ им. Жуковского. 1937.

3. С. А. Ринкевич. Теория электропривода. ГОНТИ НКТП СССР, 1938.

[10. 11. 1949]

Предлагается критерий, позволяющий найти максимальную ошибку при вычислении электромагнитного момента асинхронной машины без учета скорости изменения скольжения.

скорость изменения скольжения постоянной

$$2a = \frac{ds}{dt} = \text{const},$$

решил рассматриваемую задачу в общем виде и дал аналитическое выражение для определения динамического электромагнитного момента [Л. 1, уравнение (192)].

На рис. 1 приведено сравнение кривых статического (кривая В) и динамических моментов (кривые А, Г и В), рассчитанных автором по методу Казовского. При построении этих кривых предполагалось, что переходный режим, связанный с включением машины в сеть, успел закончиться до начала процесса изменения скольжения. Параметры машины:

$x_r = x_s = 3,07$; $x_m = 2,99$; $r_s = r_r = 0,01$, где x_s , x_r — полные индуктивные сопротивления статора и ротора;

x_m — индуктивное сопротивление взаимной индукции;

r_s , r_r — активные сопротивления статора и ротора.

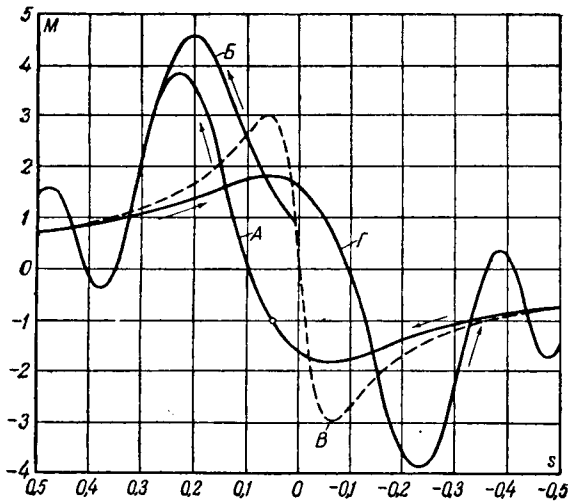


Рис. 1.

Скорость изменения скольжения для кривых А и Б составляет:

$$2a = \frac{ds}{dt} = 4,18 \text{ 1/сек.}$$

Начальные значения скольжения: $s_0 = -0,5$ (кривая А), $s_0 = +0,01$ (кривая Б).

Моменты выражены в долевых единицах; за единицу момента принят момент ($P_{стали} = 0, r_s = 0$)

$$M_1 = 975 \frac{P_n (\text{квв})}{n_c (\text{об/мин})} [\text{кгм}].$$

Максимальную ошибку, которая получается при часто практикуемой замене динамического момента статическим, удобно характеризовать отношением

$$\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}, \quad (1)$$

где $\Delta M_m = [M_d - M_s]$ — абсолютное значение максимальной разности моментов M_d и M_s , соответствующих одному и тому же скольжению; M_{sm} — максимальный статический момент.

В рассматриваемом примере эта ошибка для кривой А достигает 1,33 при скольжении $s = 0,05$, очевидно, в данном случае необходимо вести расчет с учетом скорости изменения скольжения [Л. 1, уравнение (192)]. Такой расчет весьма трудоемок и требует даже при известном навыке и использовании рядов, приведенных в [Л. 2], 5—8 часов работы. Поэтому очень важно знать заранее до проведения такого расчета, на сколько динамический момент может отличаться от статического и какая максимальная ошибка будет иметь место, если воспользоваться статической механической характеристикой.

Особенно важно знать порядок величины ΔM_m при исследовании сложных переходных режимов в системе синхронных и асинхронных машин, так как учет влияния скорости изменения скольжения на электромагнитный момент в такой системе чрезвычайно сложен.

Чтобы найти, от чего зависит упомянутая ошибка, рассмотрим физическую картину переходного процесса, связанного с изменением скольжения.

Физическое истолкование переходного режима. Рассмотрим асинхронную машину, работающую в установившемся режиме, характеризуемом токами I_s, I_r и скольжением s_0 . Пусть в результате изменения внешнего момента, приложенного к валу машины, ее скольжение изменилось за время Δt на величину Δs и стало $s_1 = s_0 + \Delta s$. Этому значению скольжения при установившемся режиме должны соответствовать новые значения токов I_{s1} и I_{r1} :

$$I_{s1} = I_s + \Delta I_s,$$

$$I_{r1} = I_r + \Delta I_r.$$

Если изменение скольжения произойдет с достаточно большой скоростью, процесс изменения токов машины, связанный с изменением энергии магнитных полей, может значительно отстать от изменения скольжения. Отставание будет тем заметнее, чем больше постоянные времени обмоток T'_s и T'_r , скорость изменения скольжения $2a$ и величины ΔI_r и ΔI_s (в относительных единицах). Сравнивая кривые статического и динамического моментов при изменении скольжения с постоянной скоростью, можно заметить, что максимальная разность между этими моментами наблюдается в области скольжения s_m , соответствующего максимальному статическому моменту M_{sm} .

Учитывая это обстоятельство, легко показать, что при одном и том же Δs , лежащем в области s_m , величина ΔI_r (или ΔI_s) будет тем больше, чем меньше критическое скольжение s_m .

Действительно, изменение тока ротора

$$\Delta I_r = \frac{\partial I_r}{\partial s} \Delta s.$$

Ток ротора

$$I_r = \frac{U_1 s}{\sqrt{r_r^2 + s^2 x_k^2}} \quad (r_s = 0).$$

При скольжении

$$s = s_m = \frac{r_r}{x_k}.$$

Изменение тока ротора ΔI_r обратно пропорционально s_m

$$\Delta I_r = \frac{U_1}{2\sqrt{2} r_r} \Delta s \approx \frac{c}{s_m} \quad (x_k \approx \text{const}).$$

Следовательно, разность между установившимися и переходными значениями токов в области s_m будет тем больше, чем больше постоянные времени обмоток T'_r и T'_s , чем выше скорость изменения скольжения $2a$ и чем меньше величина s_m .

Критерий k_m . Исходя из физической картины явления, можно предположить, что максимальная разность между динамическим и статическим моментом, отнесенная к максимальному статическому моменту [уравнение (1)], будет зависеть от критерия

$$k_m = \frac{T'_s[2a]}{s_m} \approx \frac{[2a]}{s_m^2 \omega} \approx \frac{[2a]}{380} \left[\left(\frac{I_n}{I_k s_n} \right)^2 - 4,8 \right] \quad (2)$$

где $2a = \frac{ds}{dt} = \frac{375 M_j}{GD^2 n_c} = \text{const};$

M_j — средний момент, обуславливающий изменение кинетической энергии вращающихся частей, кгм;

n_c — синхронная скорость вращения, об/мин;

$s_m = \frac{r_r}{x_k}$ — скольжение, соответствующее максимуму статического момента;

$$T'_s = \frac{x_s}{r_s \omega} \left(1 - \frac{x_m^2}{x_r x_s} \right) \approx \frac{2x_k}{\omega r_k} \approx \frac{1}{\omega s_m}$$

— постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутой обмотке ротора, сек¹;

r_k, x_k — индуктивное и активное сопротивления короткого замыкания;

s_n — номинальное скольжение.

По своему физическому смыслу критерий k_m представляет собой отношение заданного ускорения $2a$ к такому ускорению $\frac{s_m}{T'_s}$, при котором скольжение изменяется на величину s_m в течение времени T'_s .

Сопоставляя ряд расчетов динамического момента при скольжении, изменяющемся с постоянной скоростью, удалось показать, что критерий k_m вполне определяет максимальную разность между статическим и динамическим моментом, если только область изменения скольжения включает скольжения, близкие к $\pm s_m$. Например, кривая А (рис. 1) и кривая² А (рис. 2), представ-

¹ При вычислении постоянных времени сопротивлений $r_s = \frac{r_k}{2}$. Сопротивление r_s принимается равным нулю только в тех выражениях, где оно не оказывает существенного влияния на определяемую величину.

² Кривые (рис. 2) рассчитаны для короткозамкнутого двигателя МКМБ 14/3, 6 кат; 380 в; 13,6 а при χ ; 970 об/мин $r_k = 0,0683$; $x_k = 0,154$; $x_s = 1,76$; $GD^2 = 0,565$ кгм², $2a = 5,5$ 1/сек; $k_m = 3,38$; $s_0 = -0,5$. Максимальная ошибка ΔM_m наблюдается при $s = 0,17$.

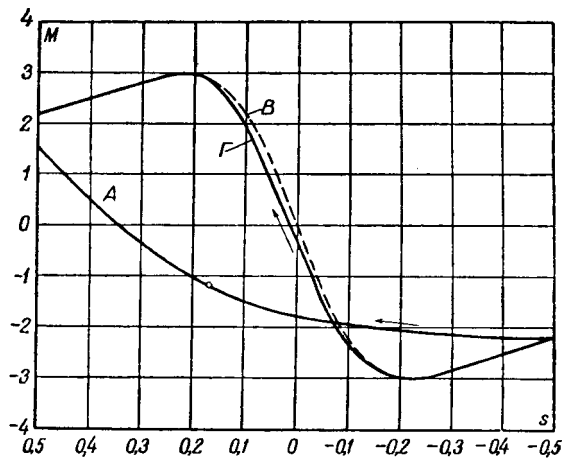


Рис. 2.

ляющие собой динамические моменты совершенно различных машин, при одном и том же значении $k_m = 3,38$, дают одинаковые значения

$$\frac{\Delta M_m}{M_{sm}} = 1,33.$$

На рис. 3 показаны значения $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$, рассчитанные для трех различных машин при нескольких значениях критерия k_m . По оси абсцисс отложены $\sqrt{k_m}$. Пунктиром показана зависимость $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ от $\sqrt{k_m}$. В интервале от $\sqrt{k_m} = 0$ до $\sqrt{k_m} =$

$\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ от $\sqrt{k_m}$. В интервале от $\sqrt{k_m} = 0$ до $\sqrt{k_m} = 2$ величина $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ пропорциональна $\sqrt{k_m}$ и может быть с достаточной точностью определена из уравнения

$$\frac{\Delta M_m}{M_{sm}} = 0,7 \sqrt{k_m}; \quad (k_m < 4), \quad (3)$$

соответствующего сплошной прямой на рис. 3.

При увеличении $\sqrt{k_m}$ от 0 до 2 наблюдается интенсивное возрастание величины $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ до 1,35.

При дальнейшем увеличении $\sqrt{k_m}$ величина $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ практически не изменяется.

Из рис. 3 следует, что уравнение (3) дает удовлетворительное совпадение с расчетом $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$

[по уравнению (192) [Л. 1] и, следовательно, позволяет заранее до проведения такого расчета иметь суждение о порядке максимальной ошибки, которая будет иметь место, если пользоваться статической механической характеристикой машины в практическом диапазоне скольжений и ускорений.

Особенности кривых динамического момента. На величину $\frac{\Delta M_m}{M_{sm}}$ не оказывает влияния

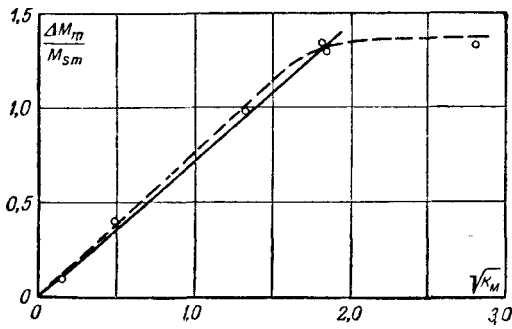


Рис. 3. Зависимость максимальной ошибки при расчете по статической механической характеристике от $\sqrt{k_m}$.

знак ускорения. Сравнивая кривую А с кривой Г рис. 1, построенной при $2a = 4,18$ 1/сек, $s_0 = 0,5$, можно увидеть, что одна из кривых является зеркальным отражением отрицательных значений другой в оси ординат (при $r_s = 0$):

$$M_d(s_0 + 2at) = -M_d(-s_0 - 2at). \quad (4)$$

При изменении s от $\pm\infty$ до $\mp\infty$ максимальная ошибка $\Delta M_m/M_{sm}$ наблюдается при скольжении, близком $\pm s_m$, и совпадающем по знаку со скоростью изменения скольжения, иначе говоря, при скольжении, удовлетворяющем неравенству $\frac{2a}{s} > 0$ (кривые А и Г рис. 1).

Начальное скольжение s_0 сказывается только в первые мгновения переходного процесса в течение времени $t_0 \approx 2T'_s$.

За это время скольжение изменяется на величину

$$\Delta s = 2at_0 = 2(2aT'_s) = 2k_m s_m.$$

Как видно, начальное скольжение s_0 влияет на динамический момент только в интервале $\Delta s \leq 2k_m s_m$. Вне этого интервала кривые динамических моментов машины при различных s_0 и одинаковых скоростях изменения скольжения $2a$ совпадают друг с другом. Например, кривая А рис. 1 совпадает с кривой динамического момента ($s_0 = -1,0$; $2a = 4,18$ 1/сек)

при $s > s_0 + \Delta s = -1,0 + 0,422 = -0,678$,

где

$$\Delta s = 2k_m s_m = 2 \cdot 3,38 \cdot 0,0625 = 0,422.$$

Для кривой Б, рис. 1 этот интервал равен $1,4 k_m s_m$.

Во всех расчетах, использованных для получения формулы (3), начальное скольжение s_0

3.

$$s_m = \frac{r_r}{x_k} > 0.$$

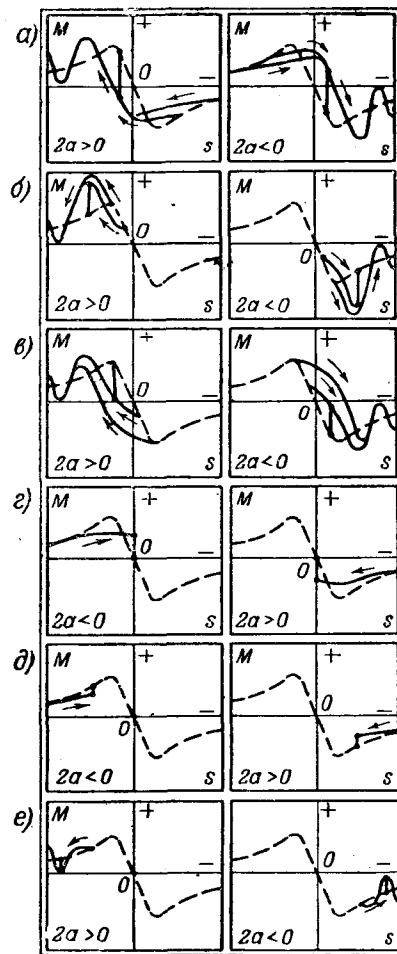


Рис. 4. Примерный вид кривых динамического момента при $2a = \text{const}$.

было выбрано так, что оно не сказывается на значении $\Delta M_m/M_{sm}$.

Если s_0 лежит от скольжения соответствующего максимальной ошибке $\Delta M_m/M_{sm}$ на расстоянии $\Delta s < 2k_m s_m$ (рис. 4, б, в и рис. 1 кривая Б) или, если область изменения скольжений не будет включать скольжения, соответствующего максимальной ошибке $\Delta M_m/M_{sm}$ (рис. 4, з), действительное наибольшее отклонение кривой динамического момента от кривой статического момента будет иметь порядок величины, определенной по формуле (3).

Наконец, если область изменения скольжения не включает интервал $\pm s_m$, действительное наибольшее отклонение кривой M_d от кривой M_s будет тем меньше, чем больше абсолютные значения скольжений, при которых происходит процесс (рис. 4, д, е). Практически такие режимы вряд ли встретятся.

Примерный вид кривых динамического момента для всех рассмотренных случаев изменения скольжения приведен на рис. 4.

Одновременно на рис. 4 даны пунктиром кривые статического момента. На рис. 4, а, б, в

показаны две кривых динамического момента для различных значений s_0 . Отрезок вертикальной линии, соединяющей кривые динамического и статического момента, равен наибольшей ошибке.

Закключение. В нормальном асинхронном приводе ошибка при пользовании статической характеристикой значительно меньше ошибок, рассмотренных в вышеприведенных примерах, где скорость изменения скольжения была выбрана произвольно. Например, для машины МКМБ 14/6 (см. выше), полагая, что приведенный к валу двигателя суммарный маховой момент в пять раз больше GD^2 двигателя, а средний момент, обуславливающий ускорение ротора, равен 0,3 единичного момента, получим $k_m = 0,0225$ и $\frac{\Delta M}{M_{sm}} = 0,10$. Кривая динамического момента для этого переходного режима при $s_0 = -0,5$; $2a > 0$, приведена на рис. 2 (кривая Г).

Из этого расчета видно, что даже в нормальном асинхронном приводе может встретиться необходимость в расчете с учетом скорости изменения скольжения [по уравнению (192) [Л. 1]]. Поэтому полезно знать порядок ошибки при расчете по статической характеристике. Чтобы найти эту ошибку при исследовании реального переходного процесса, где скорость изменения скольжения $2a \neq \text{const}$, следует при определении критерия k_m подставить в выражение для k_m среднюю скорость изменения скольжения, опре-

деленную в результате расчета по статической механической характеристике:

$$2a_{cp} = \left[\frac{s_1 - s_0}{t_1 - t_0} \right] 1/\text{сек},$$

где s_0 — начальное скольжение в мгновение t_0 ; s_1 — конечное значение скольжения при t_1 .

Зная параметры машины (хотя бы s_n), можно по (2) найти k_m , а затем по формуле (3) определить в первом приближении величину ошибки, допущенной в расчете по статической механической характеристике. При этом следует иметь в виду сделанные выше замечания.

Если окажется, что ΔM_m превышает желаемые пределы, следует проделать расчет с учетом скорости изменения скольжения. Используя уравнение (192) [Л. 2], можно методом последовательных интервалов произвести этот расчет при переменной скорости изменения скольжения или принять при вычислении M_a скорость изменения скольжения равной средней скорости его изменения при расчете по статической характеристике.

Литература

1. Е. Я. К а з о в с к и й. Обобщенное рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах. Электросила, № 2—3, 1945.
2. Е. Я. К а з о в с к и й. Переходные процессы в асинхронных машинах при включении и наорсе нагрузки. Вестник электропромышленности. стр. 5, № 2, 1949.
3. F. J. M a g i n i s s, N. R. S c h o u l t z. Performance of Induction Motors. Tr. AIEE, т. 63, стр. 64, 1944.

[16. 11. 1945]



Расчет электромагнитного привода электроискрового станка

Инж. В. Н. ЩЕПЕТОВ

Москва

Электроискровой способ обработки металлов возник в СССР в результате изобретения лауреатов Сталинской премии — доктора техн. наук Б. Р. Лазаренко и инж. Н. И. Лазаренко [Л. 1, 2].

Этот способ, получивший широкое применение в Советском Союзе, основан на использовании свойств физического явления, называемого электрической эрозией металлов. Станки, использующие явление эрозии, носят название станков электроискрового действия. Основным звеном каждого такого станка является следящая система — привод, связывающая его кинематическую и электрическую часть. Производительность процесса зависит от типа следящей системы и ее конструктивных особенностей.

Электромагнитный привод. Принципиальная схема электромагнитного привода, предложенного А. Л. Лившицем и П. Н. Розенталем, представлена на рис. 1. Во время установившегося искрового процесса в соленоид L поступает из питающей цепи ток I_0 . Величина его будет зависеть от величины зазора между электродами. Следовательно, и втягивающее усилие, передаваемое магнитным полем соленоида сердечнику привода, будет в конечном счете также функцией межэлектродного зазора. Это усилие соленоида, складываясь с усилием от уравновешивающего груза I , приподнимает электрод на столько, на сколько это требуется для установления заданного зазора, при котором сохраняется равновесие подвижной системы. При увеличении зазора, вследствие выброса частиц металла, происходит уменьшение тока питающей цепи и ослабление втягивающего усилия соленоида. Равновесие нарушается и электрод опускается. При уменьшении зазора ток питающей цепи увеличивается, возросшее втягивающее усилие заставляет электрод подниматься пока не восстановится необходимый зазор. При правильном подборе витков электрод находится во взвешенном состоянии и не делает скачкообразных движений.

Разобраны условия, обеспечивающие оптимальную подачу держателя электрода электроискрового станка с электромагнитным приводом. Правильность подачи держателя увеличивает производительность станка. Предложен метод контроля электромагнитного привода, позволяющий производить регулировку привода и определять относительные изменения величины электродного зазора в процессе работы.

Так как при электромагнитном приводе держателя электрода регулирующие импульсы тока поступают с минимальным запаздыванием, вся электрическая система работает более производительнее.

Рассмотренный электромагнитный привод с последовательно включенным в цепь соленоидом требует шунтирования катушки L емкостью для избежания пробоя батареи конденсаторов пиками высокого напряжения, получающимися обычно в соленоиде при размыкании цепи. Эта емкость на рис. 1 не показана.

Недостатком электромагнитного привода является квадратичная зависимость между силой втягивания сердечника в катушку и силой тока и, как следствие этого, малая чувствительность системы при малых значениях силы тока. Также существенным недостатком этой системы является зависимость втягивающего усилия от положения сердечника. Этот недостаток требует корректировки числа витков в процессе работы. Кроме того, эта система создает колебания электрода, понижающие производительность процесса.

Расчет оптимальных условий электромагнитного привода. Основной частью рассматриваемо-

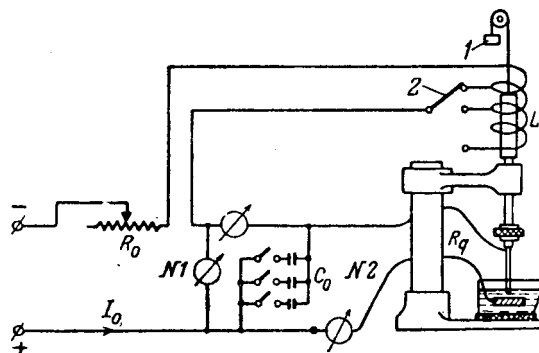


Рис. 1. Схема электромагнитного управления электродом.

L — соленоид; I — противовес; $N2$ — переключатель числа витков соленоида.

го станка, представленного на рис. 1, является следящая система с так называемым «плавающим» держателем, обеспечивающая значительно большую производительность процесса по сравнению с ручным или механическим приводом за счет более длительного равномерного перемещения сердечника. Кинетическая энергия K сердечника этой системы будет равна:

$$K = \frac{mx'^2}{2} + \frac{L_1 i_1^2}{2}, \quad (1)$$

где m — масса держателя.

Ток, проходящий через катушку электромагнита

$$I_1 = i_1^0 + i_1, \quad (2)$$

где i_1^0 — постоянная составляющая тока;

i_1 — переменная составляющая тока.

Координата положения держателя

$$x(t) = x_0 + \xi, \quad (3)$$

где ξ — перемещение от среднего положения.

Коэффициент самоиндукции

$$L_1(x) = L_1^0 + A_1 \xi + A_2 \xi^2 + \dots \quad (4)$$

Если подставить значения I_1 , x , $L_1(x)$, выраженные через уравнения (2), (3), (4), в уравнение (1), то получим:

$$K = \frac{m\xi'^2}{2} + \frac{L_1^0 i_1^0{}^2}{2} + \frac{A_1 i_1^0{}^2 \xi}{2} + L_1^0 i_1^0 i_1 + A_2 i_1^0 i_1 \xi^2 + \frac{A_2 i_1^0{}^2 \xi^2}{2} + \frac{L_1^0 i_1^2}{2} + \frac{A_1 \xi i_1^2}{2} + \frac{A_2 \xi^2 i_1^2}{2} + A_1 i_1^0 i_1 \xi. \quad (5)$$

Потенциальная энергия будет равна

$$\Pi = -mgx + \frac{q^2}{2C}, \quad (6)$$

где q — заряд на конденсаторе C ;

g — ускорение земного тяготения.

Диссипативная функция

$$F = \frac{1}{2} r x'^2 + \frac{1}{2} R_0 i_1^2 + \frac{1}{2} R_q(x) (I_1 + q')^2,$$

где r — трение;

R_0 — сопротивление зарядной цепи № 1;

R_q — сопротивление разрядного контура № 2.

Выпишем уравнение Лагранжа:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial H}{\partial x'} - \frac{\partial H}{\partial x} &= f_1 - F'_x, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial H}{\partial I_1} - \frac{\partial H}{\partial I_1} &= f_2 - F'_{I_1} \\ &\dots \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$f_1 = f_2 = 0, \quad f_2 = E_0, \quad H = K - \Pi.$$

Подставляя найденные выше значения H и F , легко получить уравнения движения, пренебрегая малыми величинами второго порядка

$$m\xi'' - \frac{A_1 i_1^0{}^2}{2} - A_1 i_1^0 i_1 - A_2 i_1^0{}^2 \xi - mg = -r\xi'. \quad (8)$$

Нас интересует только первое уравнение. Перепишем его в следующем виде:

$$m\xi'' = m v' = \left(mg - r v + \frac{A_1 i_1^0{}^2}{2} \right) + (A_1 i_1^0 i_1) + (A_2 i_1^0{}^2 \xi), \quad (9)$$

$$m v' = f_0 + f_1(i_1) + f_2(\xi).$$

Для того, чтобы было равномерное поступательное движение держателя в направлении оси x , необходимо, чтобы правая часть уравнения (9) равнялась нулю для всякого положения ξ , для любого момента времени t и для всех значений i_1 , т. е.

$$\left[-r v + mg + \frac{A_1 i_1^0{}^2}{2} \right] + [A_1 i_1^0 i_1] + [A_2 i_1^0{}^2 \xi] \equiv 0, \quad (10)$$

$$[f_0] + [f_1(i_1)] + [f_2(\xi)] \equiv 0.$$

Это условие будет выполнено только в том случае, если каждая часть уравнения, отделенная квадратными скобками, равна нулю. Из первого уравнения $f_0 = 0$ находим значения для скорости перемещения

$$r v = mg + \frac{A_1 i_1^0{}^2}{2}.$$

Выражение $f_1(i_1) = A_1 i_1^0 i_1$ будет равно нулю только при $A_1 = 0$, а выражение $f_2(\xi) = A_2 i_1^0{}^2 \xi$ при $A_2 = 0$. Для этого случая согласно уравнению (4) $L(x) = L_0$, т. е. самоиндукция, не будет зависеть от перемещения x и $r v = mg$; следовательно, в этом случае не будет взаимодействия между электромагнитом и механической частью станка. Этот случай нас не интересует. В реальной системе $A_1 \neq 0$ и A_2 может быть небольшим, и силой $A_2 i_1^0{}^2 \xi$ при малом отклонении ξ можно будет пренебречь.

Тогда из уравнения (10) найдем скорость перемещения v

$$v = \frac{1}{r} \left(mg + \frac{1}{2} A_1 i_1^0{}^2 \right) + \frac{1}{r} (A_1 i_1^0 i_1). \quad (11)$$

Заметим, что скорость v и сила тока $I_1 = i_1^0 + i_1$ определяются режимом обработки, т. е. величинами R_0 , C_0 , E_0 (рис. 1).

Для каждого режима обработки из уравнения (11) находится величина A_1 , при которой на небольшом участке будет равномерное перемещение держателя без срывов.

Практически A_1 для каждого режима подбирается переключателем числа витков 2 при настройке установки на максимум производительности или по тепловому прибору в разрядной цепи, или по амперметру в зарядной, или в конце концов на-слух по числу разрядов. При данном A_1 можно отрегулировать установку величиной массы m за счет изменения противовеса 1.

Все же рассмотренная нами следящая система имеет в выражении для скорости перемещения v значение $A_2 i_1^0{}^2 \xi$, которым можно пренебречь только

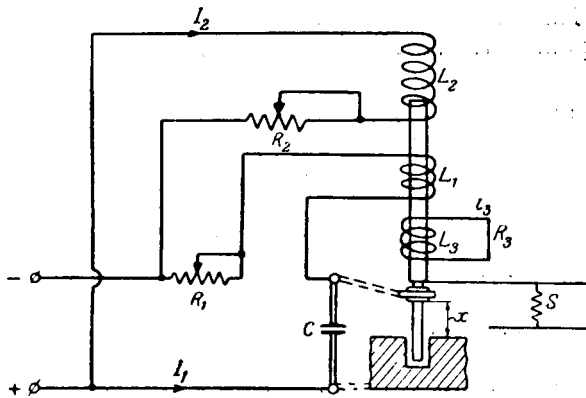


Рис. 2. Схема улучшенного электромагнитного управления электродом.

для небольшого интервала перемещения ξ . Если установка вышла из этого интервала, то равномерное движение держателя срывается, он начинает совершать короткие замыкания и размыкания цепи, что является причиной снижения производительности. Чтобы опять получить интервал равномерного перемещения, необходимо изменить самоиндукцию числом витков n (или величину противовеса — величиной m).

Равномерное перемещение на значительном интервале вообще будет только тогда, когда $\frac{dv}{dt} = 0$ при любых значениях ξ и $i_1(t)$. Этого можно достигнуть в том случае, если мы введем причины, которые уменьшили бы влияние сил $A_1 i_1^0 i_1$ и $A_2 i_1^0 \xi$ или создадим дополнительные силы с противоположными знаками по отношению к этим силам.

С этой целью рассмотрим влияние пружины, к которой подвешен „плавающий“ держатель. Здесь произойдет изменение только в потенциальной энергии, которая представится в виде

$$\Pi = -mgx + \frac{q^2}{2C} + \frac{sx^2}{2}, \quad (12)$$

где s — постоянная пружины.

Уравнение движения „плавающего“ держателя будет иметь следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = A_1 i_1^0 i_1 + A_2 i_1^0 \xi + \frac{1}{2} A_1 i_1^0 + mg - rv - sx_0 - s\xi. \quad (13)$$

В случае равномерного движения

$$i_1 [A_1 i_1^0] + \xi [A_2 i_1^0 - s] + \left[\frac{1}{2} A_1 i_1^0 + mg - sx_0 - rv \right] = 0 \quad (14)$$

или в других обозначениях

$$f_1(i_1) + f_2(\xi) + f_0 = 0.$$

Если мы хотим получить равномерное движение на всем интервале ξ , то необходимо, чтобы коэффициент при ξ равнялся нулю, т. е.

$$A_2 i_1^0 + s = 0. \quad (15)$$

Отсюда мы можем заключить, что подвешивание держателя к пружине дает возможность уничтожить силу, зависящую от ξ , и расширить интервал его равномерного движения. Но у нас есть еще сила, которая зависит от времени: $f(t) = A_1 i_1^0 i_1$. Она создает вибрации и с ней в рассматриваемой конструкции привода мы можем бороться только пассивно, т. е. за счет уменьшения A_1 , или за счет увеличения массы держателя m . В практических случаях сила $f_1(i_1)$ мала по сравнению с другими силами, например, по сравнению с силой $\frac{1}{2} A_1 i_1^0$. Пренебрегая $f_1(i_1)$, мы для скорости движения держателя получаем выражение

$$rv = mg - sx_0 + \frac{1}{2} A_1 i_1^0, \quad A_1 < 0. \quad (16)$$

Это уравнение показывает, что скорость v с увеличением x_0 , т. е. с опусканием держателя, уменьшается. Это уменьшение кажущееся, потому что коэффициент $|A_1|$ с увеличением x_0 также уменьшается. Одно изменение компенсирует другое, скорость подачи может быть сохранена на более широком интервале от одного x_0 к другому. При заданном $A_1 i_1^0$, т. е. при заданном электромагните, можно найти из формулы (15) необходимую упругость пружины s для заданного интервала равномерного перемещения сердечника. Из уравнения (16) находится положение x_0 , где условия такого движения выполняются. Практически это достигается перемещением держателя в катушке электромагнита в том случае, если стол имеет вертикальное перемещение.

Решение может быть обратным, т. е. по упругости s рассчитываются коэффициенты A_1 и A_2 , а по этим коэффициентам рассчитывается катушка электромагнита.

В заключение отметим, что мы за счет пружины несколько улучшили положение, уничтожив силы, зависящие от положения x_0 и от перемещения ξ . Попытаемся также уменьшить или совсем уничтожить за счет противоположной силы силу, зависящую от переменной составляющей тока $i_1(t)$, т. е.

$$f_1(i_1) = A_1 i_1^0 i_1.$$

Для этой цели возьмем кроме катушки основного соленоида еще дополнительную катушку L_2 с током I_2 (рис. 2), которая выполняет роль подмагничивания, и учтем вихревые токи, наводимые в латунном цилиндре с самоиндукцией L_3 . На этот латунный цилиндр надеты основная и дополнительная катушки. Внутри латунного цилиндра, который находится всегда в короткозамкнутом состоянии, перемещается „плавающий“ держатель.

Эта система имеет 5 степеней свободы, причем одна из них механическая.

Кинетическая энергия системы будет равна

$$K = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + \frac{1}{2} L_3 I_3^2 + M_{12} I_1 I_2 + M_{23} I_2 I_3 + M_{13} I_1 I_3. \quad (17)$$

В формуле (17) введены следующие обозначения:

$I_1 = i_1^0 + i_1$ — сила тока в основной катушке (рис. 2);

i_1^0 — постоянная составляющая тока;

i_1 — переменная составляющая тока;

$I_2 = i_2^0$ — сила тока в дополнительной катушке;

i_2^0 — постоянная составляющая тока;

$I_3 = i_3$ — сила тока в короткозамкнутом латунном цилиндре;

i_3 — переменная составляющая;

$L_1(x) = L_1^0 + A_1\xi + A_2\xi^2 + \dots$ — самоиндукция основной катушки;

$L_2(x) = L_2^0 + B_1\xi = B_2\xi^2 + \dots$ — самоиндукция дополнительной катушки;

$L_3(x) = L_3^0 + C_1\xi + C_2\xi^2$ — самоиндукция короткозамкнутого цилиндра;

$M_{13}(x) = M_{13}^0 + D_1\xi + \dots$ — взаимоиנדукция основной катушки с латунным цилиндром;

$M_{23}(x) = M_{23}^0 + E_1\xi + \dots$ — взаимоиנדукция дополнительной катушки с латунным цилиндром;

$M_{12}(x) = M_{12}^0 + F_1\xi + \dots$ — взаимоиנדукция основной катушки с дополнительной катушкой.

Если подставим значения I_1 , I_2 , I_3 , L_1 , L_2 и т. д. в выражение кинетической энергии K , будем иметь:

$$\begin{aligned}
 K = & \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} (L_1^0 + A_1\xi + A_2\xi^2 + \dots) (i_1^0 + i_1)^2 + \\
 & + \frac{1}{2} (L_3^0 + C_1\xi + C_2\xi^2 + \dots) i_3^2 + \frac{1}{2} (L_2^0 + \\
 & + B_1\xi + B_2\xi^2) i_2^{0^2} + \\
 & + (M_{12}^0 + D_1\xi + \dots) (i_1^0 + i_1) i_2^0 + \\
 & + (M_{13}^0 + E_1\xi + \dots) (i_1^0 + i_1) i_3 + \\
 & + (M_{23}^0 + F_1\xi + \dots) i_2^0 i_3 = \\
 = & \frac{1}{2} m v^2 + \left(\frac{1}{2} L_1^0 i_1^{0^2} + \frac{1}{2} L_2^0 i_2^{0^2} + \right. \\
 & + M_{12}^0 i_1^0 i_2^0 + (L_1^0 i_1^0 i_1 + \frac{1}{2} L_3^0 i_3^2 + M_{12}^0 i_2^0 i_1 + \\
 & + M_{13}^0 i_1 i_3 + M_{13}^0 i_1^0 i_3 + M_{23}^0 i_2^0 i_3) + \\
 & + \xi \left(\frac{1}{2} A_1 i_1^{0^2} + A_1 i_1^0 i_1 + \right. \\
 & + \frac{1}{2} B_1 i_2^{0^2} + \frac{1}{2} C_1 i_3^2 + D_1 i_2^0 i_1 + \\
 & \left. + E_1 i_1^0 i_3 + F_1 i_2^0 i_3 \right) + \dots
 \end{aligned} \quad (18)$$

Заметим, что потенциальная энергия $\Pi = \frac{1}{2} s x^2 + \frac{q^2}{2C} - mgx$, а диссипативная функция $F = \frac{1}{2} r v^2 + \frac{1}{2} R_1 I_1^2 + \frac{1}{2} R_2 I_2^2 + \frac{1}{2} R_3 I_3^2 + \frac{1}{2} R_4 (I_1 + q)$.

Напишем уравнения Лагранжа только для координаты ξ

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial (K - \Pi)}{\partial \xi'} \right] - \frac{\partial (K - \Pi)}{\partial \xi} = f - F'_{\xi},$$

где

$$\xi = x - x_0, \quad \xi' = x', \quad f = 0.$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 m v' = & [mg - rv - s x_0 + \\
 & + \left(\frac{1}{2} A_1 i_1^{0^2} + \frac{1}{2} B_1 i_2^{0^2} + D_1 i_1^0 i_2^0 \right)] + \\
 & + [i_1 (A_1 i_1^0 + D_1 i_2^0) + i_3 (E_1 i_1^0 + F_1 i_2^0)] + E_1 i_1 i_3 + \\
 & + \frac{1}{2} C_1 i_3^2 + \xi [(A_2 i_1^{0^2} + B_2 i_2^{0^2}) - s] + \\
 & + \xi (2 A_2 i_1^0 i_1 + C_2 i_3^2) + \dots
 \end{aligned} \quad (19)$$

Правая часть уравнения (19) должна быть равна нулю для случая равномерного поступательного движения держателя. Это условие, как и ранее, можно выполнить при пренебрежении малыми величинами второго порядка и только в том случае, если каждая скобка в отдельности равна нулю.

Пренебрегая малыми членами второго порядка, получим:

$$r v = mg - s x_0 +$$

$$\left\{ \frac{1}{2} A_1 i_1^{0^2} + \frac{1}{2} R_1 i_2^{0^2} + D_1 i_1^0 i_2^0 \right\}, \quad (20)$$

$$A_2 i_1^{0^2} + B_2 i_2^{0^2} - s = 0, \quad (21)$$

$$A_1 i_1^0 i_1 + D_1 i_2^0 i_1 + E_1 i_1^0 i_3 + F_1 i_2^0 i_3 = 0. \quad (22)$$

Величинами i_2^0 , s , A_2 , D_1 , A_1 , E_1 , D_1 , F_1 , ... мы можем варьировать при проектировании установки. Поэтому удовлетворение условий (20), (21), (22) возможно. Следовательно, возможно равномерное перемещение сердечника на некотором интервале длины катушки в системе с электромагнитным приводом, подвешенным к пружине s , имеющим, кроме того, вспомогательный соленоид с током i_2^0 и деформирующую катушку $L_3(x)$ с индуктируемым в ней током i_3 . Действие тока i_3 уменьшает вибрацию держателя от переменной составляющей тока основного соленоида.

Методика испытания приводов. При исследовании приводов представляется весьма важным иметь возможность быстро определять экспериментальные параметры отдельных элементов, например, величину межэлектродного зазора или напряжение на сопротивлении R_0 , и быстро проверять работу всей установки искрового действия.

При оценке качества электроискрового станка имеет значение, как реагирует следящая система

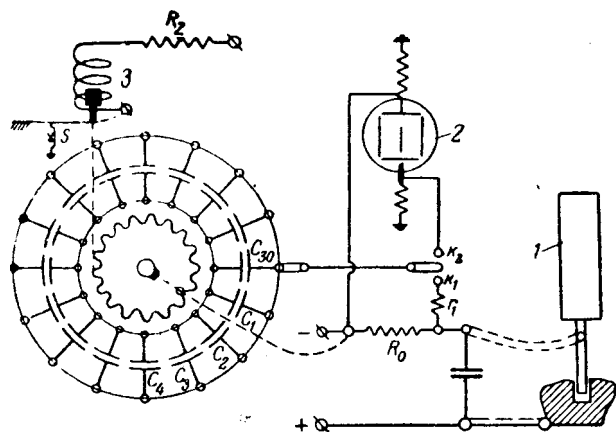


Рис. 3. Схема измерения электроискрового промежутка.
1—следящая система; 2—осциллограф; 3—зуммер.

на различные переходные величины межэлектродного зазора. Задача измерения переходного регулирования требует записи ξ от времени t , т. е. $\xi = \psi_1(t)$. Вместо величины зазора мы можем взять связанную с ней величину падения напряжения на сопротивлении R_0 (рис. 1), т. е. определить зависимость $\varphi = \psi_2(t)$.

Имеющиеся в распоряжении в настоящее время установки для записи переходного режима напряжения являются либо сложными по своей конструкции, либо связаны с фотографическим процессом. Ниже описывается «запоминающее» устройство, которое позволяет быстро и без фотографических процессов провести исследование привода с достаточной точностью. Принцип, на котором основано это устройство, не нов [Л. 4, 5]. Но его применение для регулировки приводов станков искрового действия представляет собой интересное решение.

«Запоминающий» регистратор переходных процессов в системе авторегулирования состоит из конденсаторов $C_1, C_2, C_3 \approx 1$ мкф, присоединяемых мгновенно через равные промежутки времени к напряжению на сопротивлении R_0 согласно схемы, показанной на рис. 3. Как видим, конденсаторы, смонтированные по окружности в изолирующий круг, контактами присоединяются к сопротивлению R_0 . Этот круг при помощи храпового колеса приводится во вращение вибрационным устройством. Число конденсаторов выбрано равным 30. Число колебаний вибратора равно 10 гц. Тогда каждый конденсатор заряжается фиксированной продолжительностью $\Delta t \approx 0,1$ сек, но переменной амплитудой напряжения. Для данной продолжительности мы можем рассматривать импульс как прямоугольник. Процесс зарядки всех 30 конденсаторов происходит за 3 сек. После зарядки последнего конденсатора диск доходит до защелки и останавливается. Переключатель перемещается из положения K_1 , в положение K_2 . Этим производится отсоединение конденсаторов от сопротивления и подсоединение к измерителю напряжения. Защелка снимается, и диск можно вращать

с медленной скоростью так, чтобы можно было успеть записать показание вольтметра или отключение катодного луча осциллографа.

Сопротивление утечки применяемых конденсаторов должно быть высоким в целях возможности записи напряжения в течение подходящего промежутка времени, 30 отсчетов можно сделать в течение одной минуты. Следовательно, обычные бумажные конденсаторы удовлетворяют этим целям. При испытании установлено, что напряжение лучше записывать с экрана катодного осциллографа при прямой подводке к вертикальным пластинам. После подсоединения конденсатора к вертикальным пластинам он начинает разряжаться непосредственно на землю через сопротивление, включенные между каждой вертикальной пластиной и землей. Если величины сопротивлений несколько мегом, то разряд протекает медленно, что позволяет определить начальное отклонение.

Точность описываемого прибора регистратора переходных процессов зависит от быстроты измерения напряжений на конденсаторах после переходного процесса. Обычно ошибка измерения не превышает 10%. Необходимо заметить, что межэлектродные зазоры не могут быть измерены никакими средствами в процессе работы с ошибками, меньшими 25—30%. Кроме того, второе преимущество данного прибора заключается в его надежной конструкции и в возможности получить в минимальное время достаточно точные количественные результаты. На этом приборе в час можно сделать до 30 записей, характеризующих процесс, что дает возможность представить себе полную картину перемещения держателя по всей длине катушки электромагнита.

По вышеописанной методике испытывался электромагнитный привод, принципиальная схема монтажа которого представлена на рис. 2. Все приведенные теоретические соображения были подтверждены экспериментально. После подвешивания держателя к определенной пружине s и введения дополнительных как демпфирующей, так и подмагничивающей катушек с заданными значениями L_2 и L_3 производительность была получена выше той, которая обычно имела место в электроискровых станках с электромагнитным приводом, применяемых в производстве. Кроме того, экспериментальная подгонка, проводимая сопротивлением R_2 и постоянной пружины s , давала также некоторое увеличение производительности. В некоторых случаях общее увеличение производительности станка было более, чем в 2 раза.

Литература

1. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Электрическая эрозия металлов. Вып. 2. Госэнергоиздат, 1946.
2. Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Физика электроискрового способа обработки металлов. 1946.
3. А. Л. Лившиц и П. Н. Розенталь. Промышленная энергетика, № 11—12, 1946.
4. W. E. Pakola. El. Eng., т. 57, стр. 682, 1938.
5. A. W. Zagen. El. Eng., т. 65, стр. 150, 1946.

[18. 11. 1949]



Работа генераторов постоянного тока при неизменном сопротивлении внешней цепи

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ЕНЬКО

Московский энергетический институт им. Молотова

Нормальные генераторы постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением работают в режиме нагрузки или при постоянном значении напряжения, или при постоянном значении сопротивления параллельной цепи возбуждения.

Первый случай соответствует режиму регулировочной характеристики

$$i_m = f(I) \text{ при } U = \text{const},$$

а второй — режиму внешней характеристики

$$U = f(I) \text{ при } r_m = \text{const};$$

здесь i_m — ток возбуждения в параллельной обмотке;

I — ток нагрузки;

U — напряжение на зажимах генератора;

r_m — сопротивление параллельной цепи возбуждения.

В случае нагрузки на постоянное внешнее сопротивление изменение тока нагрузки достигается регулировкой тока возбуждения путем изменения сопротивления параллельной цепи возбуждения. Соответственно меняется напряжение генератора. Таким образом, в этом случае величины i_m , U , I и r_m изменяются одновременно и зависимости

$$i_m = f(I) \text{ и } U = f(I)$$

приобретают новый смысл и характер. Они могут быть названы регулировочной, и внешней характеристиками лишь условно.

В рассматриваемом случае обе эти зависимости существуют одновременно и являются рабочими характеристиками.

Сказанное выше справедливо также и для соотношения $U = f(i_m)$, которое в данном случае может быть названо условно нагрузочной характеристикой, но по существу является рабочей характеристикой¹.

¹ Зависимость $U = f(i_m)$ нормально снимается при $I = \text{const}$ и является характеристикой не рабочего, а искусственного режима.

Дан анализ режима работы генератора постоянного тока на внешнюю цепь с постоянным сопротивлением. Приведены формулы и графические методы для построения рабочих характеристик этого режима. Предложен метод учета непропорциональности току горизонтального катета реактивного треугольника и учета остаточного намагничивания. Показано, что характеристика холостого хода может в некотором масштабе и соответствующей системе координат представить рабочие характеристики рассматриваемого режима работы.

Наконец, для рассматриваемого случая работы к числу рабочих характеристик может быть отнесена еще реостатная характеристика

$$r_m = f(I).$$

Таким образом, этот режим работы может быть охарактеризован следующими четырьмя рабочими зависимостями:

$$\left. \begin{array}{l} i_m = f(I), \quad U = f(i_m), \\ U = f(I), \quad r_m = f(I) \end{array} \right\} \text{ при } r_n = \text{const},$$

где r_n — внешнее сопротивление нагрузки.

Режим нагрузки при постоянном значении внешнего сопротивления практически встречается почти всегда в случаях возбуждения синхронных машин, за редкими исключениями, когда одновременно с шунтовым реостатом применяется так называемый магнитный регулятор.

Поэтому вышеприведенные зависимости могут быть названы рабочими характеристиками возбuditелей.

Кривая намагничивания возбuditелей отличается той особенностью, что уже в самом ее начале сказывается насыщение, так что характеристика почти не имеет прямолинейной части и является криволинейной, начиная от нуля. Эта особенность обусловлена необходимостью обеспечить достаточную устойчивость возбуждения и конструктивно достигается в возбuditелях отечественного производства выполнением полных сердечников с магнитными перешейками. Этот характер кривой намагничивания возбuditелей позволяет довольно точно выразить кривую аналитически. В частности хорошие результаты²

² Например, если для выражения характеристики холостого хода возuditеля типа В-6-250-1500 положить: $a = 2$ и $b = 1$, то получим следующие значения напряжения:

ток возбуждения	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5
напряжение по заводской кривой	0,4	0,66	0,85	1,0	1,2	1,31	1,39
напряжение по формуле (1) . .	0,4	0,67	0,86	1,0	1,2	1,33	1,43

получаются, если применить следующее уравнение [Л. 1]

$$E = \frac{ai_m}{b + i_m}. \quad (1)$$

В дальнейшем исследовании это уравнение взято за основу. Необходимо заметить, что функция $E = f(i_m)$ по уравнению (1) при безграничном возрастании тока i_m стремится к пределу

$$\lim_{i_m \rightarrow \infty} \frac{ai_m}{b + i_m} = a, \quad (2)$$

в то время как напряжение холостого хода должно было бы возрасть беспредельно. Однако, для практических целей это обстоятельство не имеет значения, так как ток возбуждения обычно не бывает выше трехкратного номинального значения.

В дальнейшем первоначально приняты следующие допущения: 1) стороны реактивного треугольника пропорциональны току; 2) ток якоря равен току нагрузки; 3) остаточный магнетизм равен нулю.

В конце дается метод учета непропорциональности горизонтального катета реактивного треугольника току и наличия остаточного намагничивания.

Генератор с параллельным возбуждением
Если в уравнении (1) учесть внутреннее падение напряжения, а также реакцию якоря, то напряжения на зажимах генератора

$$U = \frac{a(i_m - kI)}{b + i_m - kI} - IR_a, \quad (3)$$

где R_a — внутреннее сопротивление цепи якоря.

В рассматриваемом случае постоянного сопротивления внешней цепи

$$U = Ir_n. \quad (4)$$

Выражение (4) является одной из рабочих характеристик и условно может быть названо внешней характеристикой, которая в рассматриваемом случае представляет собой прямую линию.

Совместное решение (3) и (4) с исключением тока I дает функцию $f(U, i_m)$, которую удобно представить в виде зависимости $i_m = f(U)$

$$i_m = \frac{U[ukR - r_n(ak + bR)]}{r_n(UR - ar_n)}; \quad (5)$$

здесь $R = R_a + r_n$.

Выражение (5) зависимости $U = f(i_m)$ является обратной функцией.

Анализ выражения (5) показывает, что ток возбуждения i_m обращается в нуль при $U = 0$ и при условии

$$UkR - r_n(ak + bR) = 0, \quad (6)$$

откуда

$$U = \frac{a}{R} r_n + \frac{b}{k} r_n. \quad (7)$$

Принимая во внимание ограничение (2), приходим к заключению, что при положительном значении коэффициента k условие (6) невозможно, так как напряжение не может быть больше, чем

$$U \leq \frac{a}{R} \cdot r_n. \quad (8)$$

При отрицательном значении k условие (6) становится возможным. Этот случай рассмотрен ниже.

Характеристика $U = f(i_m)$ представлена на рис. 1. Она может быть построена чисто графически следующим образом.

Выбрав произвольную точку b_1 на характеристике холостого хода, проводят прямую b_1Q под углом β к оси абсцисс. При этом

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_a}{k},$$

где R_a и k должны быть взяты в масштабе рисунка.

Далее, делят ординату b_1 F в отношении $\frac{b_1g}{GF} = \frac{R_a}{r_n}$ и через точку G проводят линию, па-

раллельную оси абсцисс до пересечения с прямой b_1Q . Точка пересечения b должна лежать на кривой $U = f(i_m)$.

Для получения других точек b' , b'' и т. д. достаточно передвигать гипотенузу b_1b реактивного треугольника параллельно самой себе, одновременно изменяя ее величину пропорционально ординатам точек b'_1 , b''_1 и т. д.

Так как напряжение U и ток нагрузки I связаны линейной зависимостью (4), то кривая $U = f(i_m)$ представляет собой одновременно зависимость $I = f(i_m)$ в соответствующем масштабе, а также и обратную зависимость $i_m = f(I)$, которая является рабочей характеристикой рассматриваемого режима и может быть условно названа регулировочной характеристикой.

Эта характеристика изображена на рис. 1 в четвертом квадранте; ее построение ясно из рисунка.

Аналитическое выражение характеристики $i_m = f(I)$ может быть получено совместным решением (3) и (4) с исключением напряжения U . Это выражение следующее:

$$i_m = \frac{I[IkR - (ak + bR)]}{IR - a}. \quad (9)$$

Учитывая сказанное выше при анализе зависимости (5), заключаем, что ток i_m (9) обращается в нуль при одном условии $I = 0$.

Остается еще зависимость $r_m = f(I)$, также являющаяся одной из рабочих характеристик исследуемого режима.

Для получения аналитического выражения этой характеристики будем исходить из следующей очевидной зависимости:

$$U = i_m r_m. \quad (10)$$

Совместное решение (3), (4) и (10) с исключением напряжения U и тока возбуждения i_m дает интересующую нас зависимость

$$r_m = \frac{r_n(IR - a)}{IkR - (ak + bR)} \quad (11)$$

Величина сопротивления r_m изменяется от критического значения r_{mk} до значения сопротивления параллельной цепи возбуждения r_{m0} при полностью выведенном шунтовом реостате. Критическое значение сопротивления может быть определено из производной $\frac{dU}{di_m}$, полагая напряжение равным нулю.

Применяя соотношение

$$\frac{dU}{di_m} = \frac{1}{\frac{di_m}{dU}}$$

получаем из уравнения (5)

$$r_{mk} = \frac{1}{\frac{di_m}{dU}|_{U=0}} = \frac{ar_n}{ak + bR} \quad (12)$$

Выражение (12) может быть также получено из (11) путем подстановки в него $I=0$.

Кривая зависимости $r_m = f(I)$ изображена на рис. 1 в четвертом квадранте.

Построение этой кривой может быть выполнено также чисто графически. Проще всего это сделать для зависимости $r_m = f(i_m)$. Выбрав на кривой $U = f(i_m)$ произвольную точку b , принимают ее координаты за единицу. Тогда сопротивление r_m , соответствующее точке b , будет выражаться в некотором масштабе ординатой bb_2 . Для других точек b', b'' и т. д. соответствующие значения сопротивлений r_m получатся умножением ординат этих точек на отношения $\frac{Ob_2}{Ob'_2}$, $\frac{Ob_2}{Ob''_2}$ и т. д.

Полученную таким образом кривую $r_m = f(i_m)$ легко перенести в четвертый квадрант и представить в форме зависимости $r_m = f(I)$.

В соответствии с изменением сопротивления параллельной цепи возбуждения от r_{mk} до r_{m0} будет изменяться и ток нагрузки от нуля до максимального значения. Аналитическое выражение максимального значения тока нагрузки может быть получено из уравнения (11), решение которого относительно I с заменой r_m на r_{m0} дает следующее выражение:

$$I_{\max} = \frac{a}{R} - b \frac{r_{m0}}{r_n - kr_{m0}} \quad (13)$$

Максимальное значение тока нагрузки I_{\max} может быть определено также графически, для

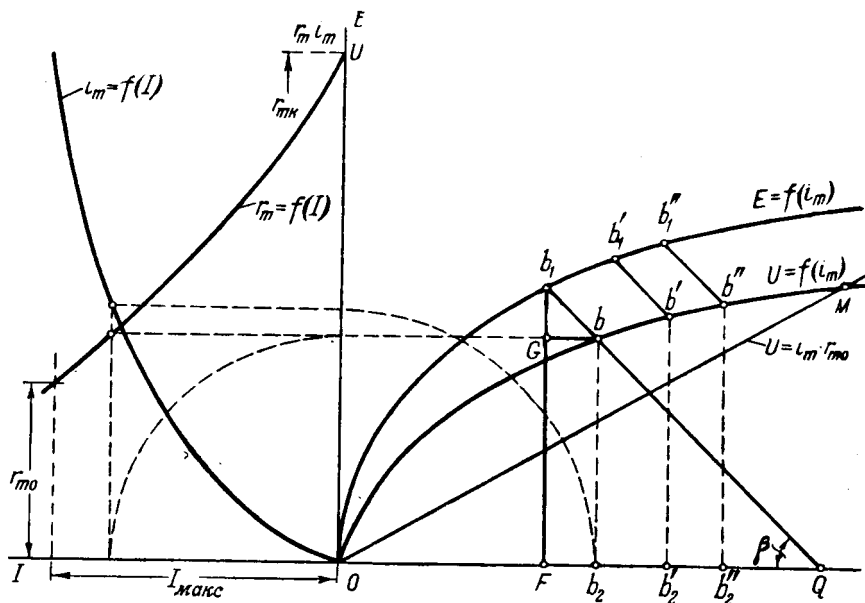


Рис. 1. Характеристики генератора параллельного возбуждения.

чего необходимо графически решить совместно (5) и (10), как это показано на рис. 1. Ордината точки пересечения M дает значение максимального напряжения, поделив которое на r_n , получим значение I_{\max} .

Генератор со смешанным возбуждением. При встречном включении обмоток возбуждения все уравнения предыдущего раздела остаются в силе. При согласном включении обмоток в этих уравнениях необходимо у членов, содержащих коэффициент k , поменять знаки на обратные.

В этом случае зависимости $i_m = f(U)$, $i_m = f(I)$ и $r_m = f(I)$ примут следующий вид:

$$i_m = \frac{U [UkR - r_n(ak - bR)]}{r_n(ar_n - UR)} \quad (14)$$

$$i_m = \frac{I [IkR - (ak - bR)]}{a - IR} \quad (15)$$

$$r_m = \frac{r_n(a - IR)}{IkR - (ak - bR)} \quad (16)$$

Условие (6), при котором i_m обращается в нуль при отрицательном значении коэффициента k , становится возможным. Это означает, что кривые зависимости $i_m = f(U)$ и $i_m = f(I)$ пересекают ось координат, как это представлено на рис. 2. Физический смысл точки пересечения состоит в том, что генератор смешанного возбуждения превращается в генератор последовательного возбуждения. Такое превращение возможно лишь при достаточно большом числе витков последовательной обмотки возбуждения, а именно при условии

$$k > \frac{b}{a} R \quad (17)$$

Выражение (17) получено из условия (6), полагая, что напряжение U при $i_m = 0$ должно быть больше нуля. Таким образом, при $i_m = 0$ и

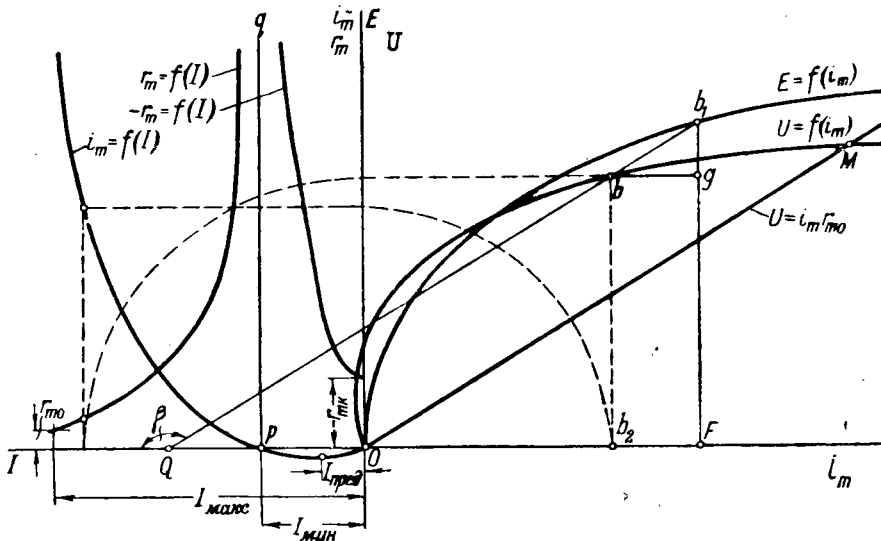


Рис. 2. Характеристики генератора смешанного возбуждения.

при соблюдении неравенства (17) напряжение U и ток I будут определяться следующими уравнениями:

$$U_{\min} = \frac{a}{R} r_n - \frac{b}{k} r_n, \quad (18)$$

$$I_{\min} = \frac{a}{R} - \frac{b}{k}. \quad (19)$$

Наибольшее значение тока I при полностью выведенном шунтовом реостате определится по уравнению (13), в котором необходимо заменить знак у коэффициента k на обратный. Тогда получим:

$$I_{\max} = \frac{a}{R} - b \frac{r_{m0}}{r_n + k \cdot r_{m0}}. \quad (20)$$

При соблюдении условия (17) функция (16) теряет свойства непрерывности. Разрыв непрерывности наступает при токе $I = I_{\min}$.

Если выполнено условие (17), то при изменении тока возбуждения в параллельной обмотке от наибольшего значения при короткозамкнутом шунтовом реостате до нулевого значения ток I и напряжение U изменяются от I_{\max} , U_{\max} до I_{\min} , U_{\min} . Для снижения U , I ниже этих минимальных значений необходимо току возбуждения i_m придать отрицательное значение, как это следует из рассмотрения выражений (15) и (19). Такой режим должен рассматриваться как искусственный. В области этого режима генератор превращается в противокомпаундный переключением шунтовой обмотки.

Функция $i_m = f(I)$ (15) обращается в нуль дважды ($I = 0$ и $I = I_{\min}$), следовательно, она должна иметь максимум. Взяв производную $\frac{di_m}{dI}$ и приравняв ее нулю, находим наибольшее значение отрицательного тока $i_{m \max}$ и соответствующее ему предельное значение тока I :

$$I_{\text{пред}} = \frac{a}{R} - \frac{V \overline{abkR}}{kR}. \quad (21)$$

При увеличении абсолютного значения отрицательного тока возбуждения сверх $i_{m \max}$ устойчивость искусственного режима нарушается, генератор развозбуждается и токи i_m и I обращаются в нуль.

Характеристика $U = f(i_m)$ при смешанном возбуждении с согласным включением обмоток может быть построена чисто графически. Выбрав произвольную точку b_1 на характеристике холостого хода (рис. 2), проводят прямую $b_1 Q$ под углом β к оси абсцисс. При этом $\operatorname{tg}(\pi - \beta) = \frac{R_a}{k}$, где R_a и k следует взять в масштабе рисунка. Далее, делят ординату $b_1 F$ в отношении $\frac{b_1 g}{GF} = \frac{R_a}{r_n}$ и через

точку G проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с прямой $b_1 Q$. Точка пересечения b должна лежать на кривой $U = f(i_m)$. Продолжение построения то же, что и в случае генератора с параллельным возбуждением.

Приближенный учет остаточного магнетизма и непропорциональности сторон реактивного треугольника току якоря. В начале анализа указывалось на следующие принятые допущения: 1) стороны реактивного треугольника пропорциональны току; 2) ток якоря равен току нагрузки; 3) остаточное намагничивание равно нулю. Второе из этих допущений практически не вносит какой-либо ошибки. Первое и третье допущения вносят существенные неточности для современных возбуждателей. Так, реакция якоря при расположении щеток на геометрической нейтральной при работе генератора в области перегиба характеристики холостого хода может достигать 20 ÷ 35% от намагничивающей силы полюсов, а в начальной части характеристики и в области большого насыщения реакция якоря практически равна нулю. Поэтому для возбуждателей, работающих в большом диапазоне напряжений с 2 ÷ 2,5-кратным „потолком“, необходимо считаться с непропорциональностью горизонтального катета реактивного треугольника. Кроме того, заметное влияние оказывают токи коммутации, реакция которых, вообще говоря, может быть как положительной, так и отрицательной. Все это делает чрезвычайно затруднительным аналитический учет реакции якоря в общем виде.

Для практических целей возможно ограничиться следующим приемом. Первоначально подставляют в уравнения значение коэффициента k , соответствующее номинальному режиму работы. Тогда характеристика $U = f(i_m)$ будет достаточно точной в области номинального режима и будет лежать ниже действительной в областях как малых, так и „потолочных“ значений возбуждения. Определив по вышеприведенным форму-

лам I и соответственно U для любого другого режима, определяют одним из известных способов величину реакции якоря для этого режима и соответствующее новое значение коэффициента k . Подставив это новое значение k в уравнения, находят более точные значения I и U . Этот прием может быть применен к любой области работы генератора, а также может повторяться, давая последовательное приближение к истинным значениям I и U .

Третье допущение — отсутствие остаточного намагничивания — также должно внести существенные ошибки, потому что в современных возбуждателях остаточное напряжение достигает $10 \div 12\%$ от напряжения при номинальном режиме работы. Очевидно, что в области начала координат влияние остаточного магнетизма будет наибольшим и совершенно изменит характер рассмотренных выше характеристик.

Для приближенного учета наличия остаточного магнетизма можно поступить следующим образом.

Вместо реального генератора с параллельным или смешанным возбуждением представим такой же генератор, но с добавлением еще независимой обмотки возбуждения, создающей намагничивающую силу, равную задерживающей (коэрцитивной) силе остаточного намагничивания. Обозначив эту намагничивающую силу в масштабе тока возбуждения параллельной обмотки i_{m3} , получим, что полный ток возбуждения

$$i_m = i_{m0} + i_{m3}, \quad (22)$$

где i_{m0} — действительный ток возбуждения в параллельной обмотке реального генератора

$$i_{m0} = i_m - i_{m3}. \quad (22a)$$

Ток i_{m3} может быть принят неизменным. При такой подстановке уравнения (5), (9), (14) и (15) характеристик возбуждителей, приведенные выше, будут справедливы и в случае наличия остаточного намагничивания.

Для определения $r_m = f(I)$ уравнения (11) и (16) должны быть преобразованы с учетом (22a), что дает следующее выражение для генератора параллельным возбуждением:

$$r_m = \frac{I r_n (IR - a)}{I [IkR - (ak + bR)] - i_{m3} (IR - a)}. \quad (23)$$

Для генераторов со смешанным возбуждением в уравнении (23) надо поменять знак членов, содержащих коэффициент k . Уравнения (13), (19) и (20) при учете остаточного намагничивания получаются слишком громоздкими. Поэтому определение значений I_{\max} и I_{\min} проще производить графически, построив кривую зависимости $r_m = f(I)$ по основным уравнениям (9) и (15).

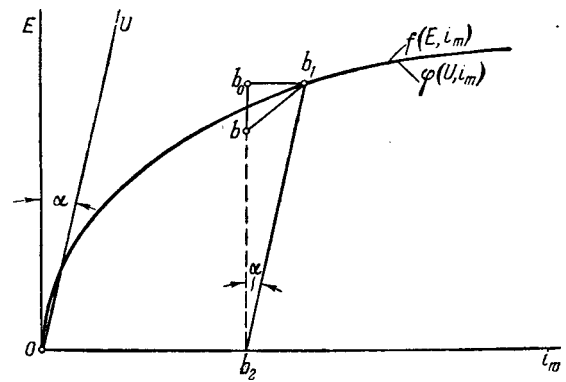


Рис. 3. Кривая намагничивания в качестве характеристики $U = f(i_m)$.

Характеристика холостого хода как универсальная кривая. В литературе [Л. 1] отмечается, что кривая намагничивания в определенной системе координат и в соответствующем масштабе может представить различные характеристики, как, например, регулировочную и внешнюю.

В исследуемом нами случае работы при постоянном внешнем сопротивлении эта универсальность характеристики холостого хода сохраняется.

На рис. 3 представлена кривая намагничивания в прямоугольной системе координат. Треугольник $b_0 b_1$ изображает реактивный треугольник $\frac{b_0 b_1}{b b_2} = \frac{R_a}{r_n}$ и $b_0 b_1 = kI$, где $r_n = \text{const}$. Построение рис. 3 относится к генератору смешанным возбуждением при согласном соединении обмоток. Соединяя точки b_1 и b_2 , получаем угол α . В общем случае $\text{tg } \alpha = \pm \frac{k}{R}$, где знак $+$ относится к параллельному и противоконпаундному возбуждению, а знак $-$ относится к конпаундному возбуждению.

Повернув ось ординат на угол $+\alpha$ (отрицательный на рис. 3), получаем косоугольную систему координат, в которой кривая намагничивания представляет характеристику $U = f(i_m)$ при условии, что ординаты умножаются на коэффициент $\frac{r_n}{\sqrt{k^2 + R^2}}$.

Так как U и I связаны линейной зависимостью (4), то кривая намагничивания представляет также $I = f(i_m)$ [а следовательно, и $i_m = f(I)$]. В этом случае ординаты умножаются на коэффициент $\frac{1}{\sqrt{k^2 + R^2}}$.

Литература

1. Г. Н. Петров. Электрические машины, ч. II. Госэнергоиздат, 1948.

[11.7. 1949]



Построение характеристик схемы генератор—двигатель с тремя обмотками возбуждения генератора

Кандидат техн. наук Л. И. ПОЛТАВА

Криворожский горный институт

Исследованию характеристик схемы генератор—двигатель с генератором, имеющим три обмотки возбуждения, а также методам их построения посвящен ряд работ. Однако, ни один из существующих методов не позволяет построить характеристики без знания заводских параметров машин. Процентный метод, который основан на использовании номинальных данных машины, также в большинстве случаев неприменим, так как табличное напряжение для таких генераторов условно и может сильно отличаться от фактического напряжения при номинальной нагрузке и зависит от регулировки схемы. Например, генераторы экскаваторов М-4161 и Б-120 имеют одинаковое номинальное напряжение—250 в, а фактическое напряжение при номинальной нагрузке превышает табличное на 25—60%. Предлагаемый ниже метод основан только на опытах холостого хода и короткого замыкания, которые легко осуществить в условиях эксплуатации. Метод был проверен при регулировке схем на ряде экскаваторов.

Опыты холостого хода и короткого замыкания. Схема для проведения опытов изображена на рис. 1.

При холостом ходе н. с.

$$F_0 = i_n \omega_n + i_s \omega_s, \quad (1)$$

разделив на ω_n , получим

$$i_0 = i_n + i_s \frac{\omega_s}{\omega_n} = i_n + k i_s, \quad (2)$$

где i_0 —эквивалентный намагничивающий ток, $k i_s = i'_s$ —ток шунтовой обмотки, приведенный к обмотке независимого возбуждения. Коэффициент приведения k определяется из двух измерений в ненасыщенной части характеристики:

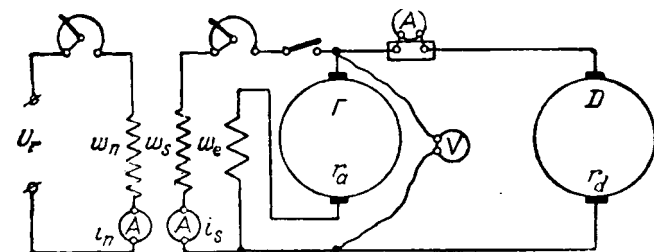


Рис. 1. Схема для опытов холостого хода и короткого замыкания.

Описывается простой метод построения характеристики схемы генератор—двигатель с тремя обмотками возбуждения генератора, основанный на опытах холостого хода и короткого замыкания, легко осуществимых в эксплуатации при регулировке схемы.

при одном независимом возбуждении (i_n , E_1) и при совместном включении двух обмоток при этом же токе независимого возбуждения (i_n , i_s ,

E_2). Из этих двух измерений

$$k = \frac{\omega_s}{\omega_n} = \frac{i_n [E_2 - E_1]}{i_s [E_1 - e_0]}, \quad (3)$$

где e_0 —э. д. с. остаточного намагничивания.

По данным измерений и применив формулу (2), на рис. 2 построена кривая $E = f(i_0)$ для генератора 165 квт, 660 а. Из характеристики можно определить сопротивление цепи шунтовой обмотки при данном положении аппарата управления, приведенное к обмотке независимого возбуждения

$$\operatorname{tg} \alpha = r'_s = \frac{U_{\max}}{i'_s(\max)}. \quad (4)$$

Опыт короткого замыкания проводится при заторможенном механизме и при установке аппарата управления на то положение, для которого должна быть построена внешняя характеристика. Непосредственно из опыта определяются U_k и I_k . Электродвижущая сила при коротком замыкании

$$E_k = U_k + I_k r_a. \quad (5)$$

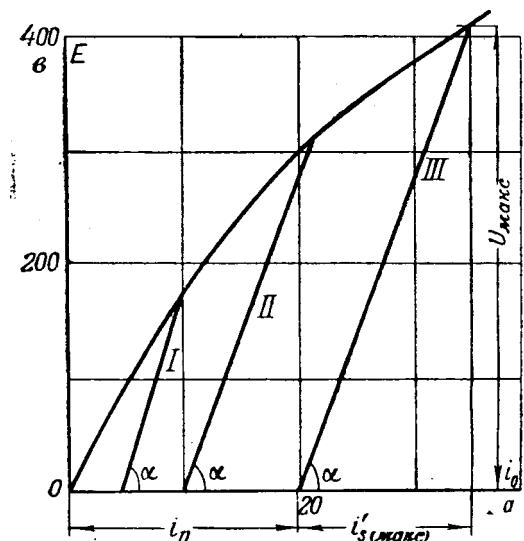


Рис. 2. Характеристика холостого хода генератора с тремя обмотками возбуждения (I, II, III—положения контроллера управления).

По расчетной величине E_k и по кривой $E=f(i_0)$ определяется намагничивающий ток i_{0k} .

Построение внешней характеристики в двигательном и тормозном режимах привода. При нагрузке генератора в двигательном режиме привода полные ампервитки

$$F = i_n \omega_n + i_s \omega_s - I \omega_c. \quad (6)$$

i_s мало по сравнению с I и можно принять

$$i_s = \frac{E - I r_a}{r_s}. \quad (7)$$

Решая (6), после преобразований, получим

$$I = \frac{i_n + \frac{E}{r_s} k - i_0}{\frac{r_a}{r_s} k + \frac{\omega_c}{\omega_n}}. \quad (8)$$

Обозначим через

$$\gamma = \frac{r_a}{r_s} k + \frac{\omega_c}{\omega_n}.$$

γ легко может быть найдена по данным опыта короткого замыкания из формулы (8):

$$\gamma = \frac{i_n + \frac{E_k}{r_s} - i_{0k}}{I_k}. \quad (9)$$

Для данного положения контроллера γ , i_n и r'_s — постоянные.

Тогда

$$I = \frac{i_n + \frac{E}{r'_s} - i_0}{\gamma}. \quad (10)$$

Задаваясь значениями i_0 по характеристике $E=f(i_0)$, находим E и вычисляем по формуле (10) $I=f(E)$ и напряжение генератора по формуле

$$U = E - I r_a. \quad (11)$$

При торможении противовключением изменяется направление тока в обмотке независимого возбуждения, напряжение генератора падает, направление тока в главной цепи изменяется, и серьезные ампервитки становятся намагничивающими. Шунтовые ампервитки знак не меняют, так как полярность генератора сохраняется до остановки двигателя.

В соответствии с изложенным

$$F = -i_n \omega_n + i_s \omega_s + I \omega_c. \quad (12)$$

Решив аналогично предыдущему, получим:

$$I = \frac{i_n - \frac{E}{r'_s} + i_0}{\gamma} \quad \text{и} \quad U = E + I r_a. \quad (13)$$

Объединяя формулы (10) и (13), получим общую формулу для $I=f(E)$:

$$I = \frac{i_n \pm \frac{E}{r'_s} \mp i_0}{\gamma}. \quad (14)$$

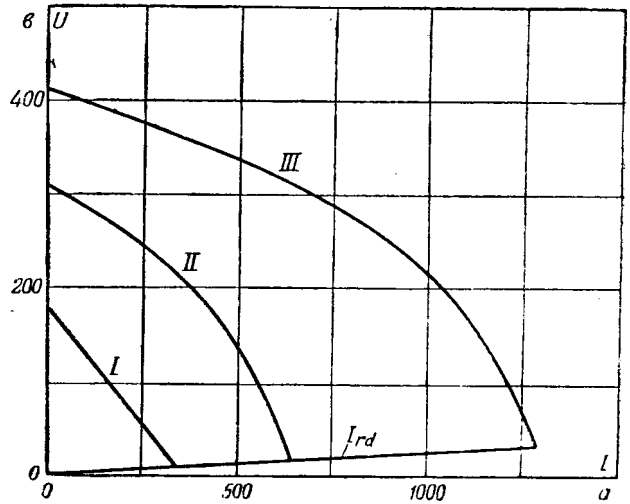


Рис. 3. Внешние характеристики генератора постоянного тока для трех положений контроллера управления.

Пример. Генератор $P_N=165$ квт, $I_N=660$ а подв-многого привода экскаватора.

Измерения при малом токе независимого возбуждения:

$$e_0 = 5 \text{ в}, \quad i_n = 3 \text{ а}, \quad E_1 = 54 \text{ в}.$$

То же, но при включении шунтовой обмотки

$$i_n = 3 \text{ а}, \quad i_s = 1,18 \text{ а}, \quad E_2 = 101 \text{ в}.$$

Коэффициент приведения

$$k = \frac{3(101 - 54)}{1,18(54 - 5)} = 2,44.$$

Намагничивающий ток, например, для последнего положения контроллера

$$i_n = 19,8 \text{ а}, \quad i_s = 6,2 \text{ а}, \quad U_{\text{макс}} = 408 \text{ в}.$$

$$i_0 = 19,8 + 2,44 \times 6,2 = 34,9 \text{ а}; \quad r'_s = \frac{408}{2,44 \times 6,2} = 27 \text{ ом}.$$

Полностью характеристика построена на рис. 2.

При опыте короткого замыкания на положении контроллера III

$$i_n = 19,8 \text{ а}, \quad U_k = 35 \text{ в}, \quad I_k = 1300 \text{ а}, \quad r_a = 0,0225 \text{ ом},$$

$$E_k = 35 + 1300 \cdot 0,0225 = 64 \text{ в}; \quad \text{из рис. 2} \quad i_{0k} = 3,7 \text{ а}.$$

По формуле (9)

$$\gamma = \frac{19,8 + \frac{64}{27} - 3,7}{1300} = 1,42 \cdot 10^{-2}$$

$i_0, \text{ а}$	3,7	5,8	10,0	15,5	21,1	26,2	34,9
$E, \text{ в}$	64	101	178	251	308	352	408
$I, \text{ а}$	1300	1250	1150	960	710	465	0
$U, \text{ в}$	35	73	152	230	292	341	408

Расчет основной характеристики (положение контроллера III) для двигательного режима выполнен в таблице. На рис 3 приведены характеристики для трех положений контроллера. Аналогично может быть построена и характеристика тормозного режима для любого положения контроллера. Например, при торможении по основной статической тормозной характеристике при начальной э. д. с. генератора $E=308$ в начальный ток

$$I = \frac{19,8 - \frac{308}{27} + 21,1}{1,42 \cdot 10^{-2}} = 2070 \text{ а}.$$



Каскад асинхронного двигателя с ртутным выпрямителем

Кандидат техн. наук, доц. Ф. И. ЧЕРНЯВСКИЙ

Новочеркасский политехнический институт

Регулирование скорости каскада (рис. 1) осуществляется путем изменения тока возбуждения машины постоянного тока. Возможны три режима работы.

1. Нормальный режим. Направление э. д. с. машины постоянного тока E_x совпадает по направлению с падением напряжения в цепи выпрямленного тока ($I_d Z_x$). Обе машины работают в двигательном режиме.

Уравнение напряжений вторичной цепи каскада в общем виде будет:

$$\dot{U}_r - \Delta \dot{U} = I_d Z_x + E_x \quad (1)$$

здесь \dot{U}_r — напряжение ротора, $\Delta \dot{U}$ — падение напряжения в дуге выпрямителя.

При увеличении E_x выпрямленный ток, а следовательно, и ток ротора асинхронной машины уменьшаются. При неизменной нагрузке на валу это влечет за собою уменьшение числа оборотов в минуту каскада. Таким образом, в этом режиме изменение скорости происходит так же, как и в каскаде с одноякорным преобразователем.

2. Направление тока возбуждения машины постоянного тока противоположно направлению в 1-м режиме. Электродвижущая сила машины постоянного тока противоположна падению напряжения в цепи выпрямленного тока. Машина постоянного тока работает в генераторном режиме, асинхронная машина — в двигательном.

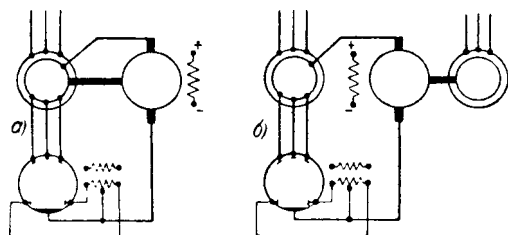


Рис. 1. Принципиальные схемы соединений каскада.

Для регулирования скорости электродвигателей применяют схемы с ионными преобразователями. К этим схемам принадлежит каскад асинхронного двигателя с машиной постоянного тока, в котором одноякорный преобразователь заменен ртутным выпрямителем. При такой замене исключаются недостатки работы каскада, использующего одноякорный преобразователь, но наличие ртутного выпрямителя вносит ряд особенностей. Некоторые из этих особенностей здесь рассмотрены.

В этом режиме с увеличением E_x выпрямленный ток и ток ротора асинхронной машины увеличиваются. Это влечет за собой возрастание скорости каскада, но лишь до некоторого предела.

Напряжение генератора не может превзойти некоторой величины. Пренебрегая \dot{U}_r , величина которого при малых скольжениях незначительна, можно найти, что напряжение генератора по абсолютной величине не может стать больше, чем $\Delta \dot{U}$. При дальнейшем увеличении возбуждения машины постоянного тока резко увеличивается ток I_d . Тормозной момент генератора постоянного тока возрастает, становится больше двигательного момента асинхронной машины, скорость каскада начинает падать.

Если продолжать увеличивать возбуждение машины постоянного тока, то агрегат остановится, затем начнет вращаться в обратную сторону. Каскад переходит в третий режим. Этот переход сопровождается значительным толчком тока.

3. Обратное вращение. Машина постоянного тока работает в двигательном режиме и вращает агрегат. Асинхронная машина работает в тормозном режиме. Напряжение и частота тока ротора резко возрастают.

При дальнейшем увеличении возбуждения машины постоянного тока скорость агрегата уменьшается, так как направление э. д. с. E_x и падения напряжения в цепи выпрямленного тока $I_d Z_x$ снова совпадают.

На рис. 2 даны кривые изменения скорости в зависимости от тока возбуждения машины постоянного тока для „электромеханического“ каскада, состоящего из асинхронной машины 4,5 квт, 220 в, 1000 об/мин, машины постоянного тока 3,5 квт 220 в, 1500 об/мин и ртутного выпрямителя ЗВН-60.

При электрическом каскаде (рис. 1, б) пределы регулирования скорости больше. Соответствуют

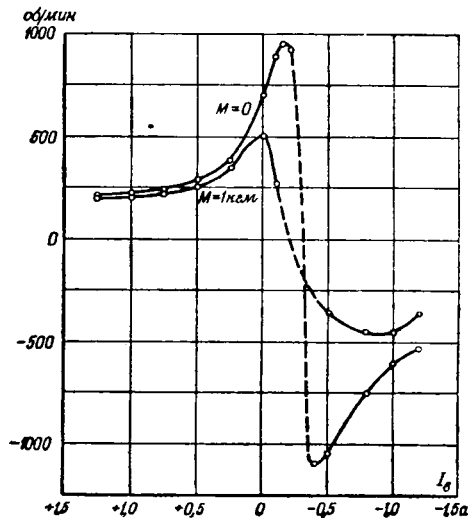


Рис. 2. Кривые изменения скорости в зависимости от тока возбуждения машины постоянного тока для „электро-механического“ каскада 4,5 квт.

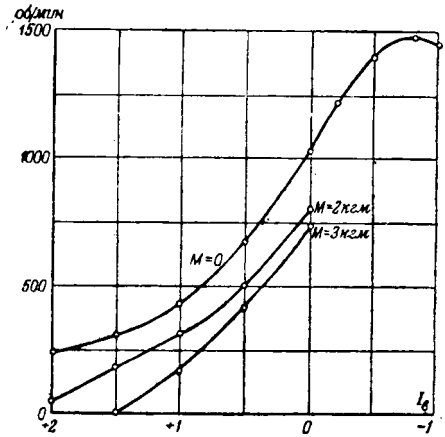


Рис. 3. Кривые изменения скорости в зависимости от тока возбуждения машины постоянного тока для „электрического“ каскада 10 квт.

шие кривые для каскада, состоящего из асинхронной машины 10 квт, 220 в, 1500 об/мин и машины постоянного тока 3 квт, 110 в, 1500 об/мин, даны на рис. 3.

Пределы регулирования скорости могут быть расширены также при наличии сеточного управления. В этом случае при соответствующей схеме включения (например, в вентильном каскаде Ф. И. Бутаева) [Л. 3] может быть получена скорость выше синхронной.

Расчет токов. Ток ротора является одновременно и анодным током выпрямителя. Примем в первом приближении, что в течение времени горения анода ток ротора изменяется по синусоиде (рис. 4,а).

Примем затем, что в течение времени горения анода ΔU и E_x изменяются по отрезкам синусоид, полный период которых равен периоду тока ротора. Средние значения этих синусоид за время горения одного анода — ΔU_{med} и $E_{x med}$ — равны действительным значениям падения напряжения в дуге и э. д. с. машины постоянного тока. Напряжение фазы ротора в течение „рабочей“ части периода

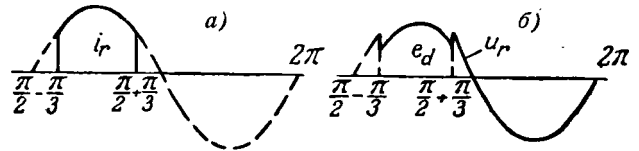


Рис. 4. Кривые тока и напряжения ротора.

первой гармонической тока ротора (рис. 5). Из этой схемы, учитывая разложение кривой напряжения ротора в ряд, получим:

$$\frac{E'_r}{s} - I_{r1} Z'_{r1} = \frac{E'_r}{s} + \frac{E'_d - E'_r}{s} \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right)$$

или, учитывая (2),

$$-I_{r1} Z'_{r1} = \frac{(\Delta U' \pm E'_x)}{s} \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) + \frac{I'_d Z'_x \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) - E'_r \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right)}{s} \quad (3)$$

Примем, что под действием напряжения одной фазы ротора выпрямленный ток протекает только

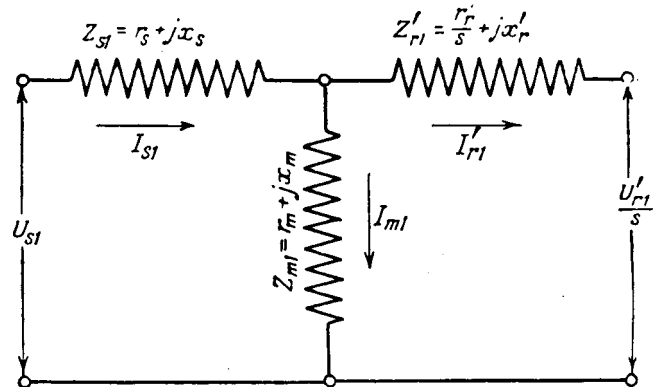


Рис. 5. Схема замещения для первой гармонической тока ротора.

где все величины приведены к цепи статора.

В „нерабочей“ части периода напряжение фазы ротора равно э. д. с. ротора $E'_r = sE'_{r0}$, где E'_{r0} — э. д. с. неподвижного ротора, s — скольжение. Таким образом напряжение фазы ротора U'_r изменяется по кривой, изображенной на рис. 4,б. Напряжение на зажимах статора U_{s1} считаем изменяющимся по синусоиде и симметричным.

Разложим кривые тока и напряжения ротора (рис. 4) в ряд. Составим схему замещения для

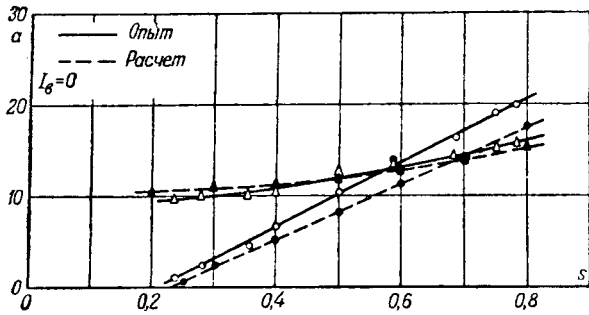


Рис. 6. Опытные и расчетные кривые токов каскада 4,5 кВт при токе возбуждения машины постоянного тока, равном нулю.

в течение одной трети периода и что кривая такой „части“ выпрямленного тока идентична кривой тока ротора. Тогда и любая гармоника „части“ выпрямленного тока будет идентична соответствующей гармонике тока ротора. Следова-

тельно, входящее в (3) выражение $i'_a \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right)$ представляет собой не что иное, как первую гармоническую тока ротора i'_{r1} .

Таким образом, вместо (3) получим:

$$-i'_{r1} Z'_{r1} = \frac{(\Delta U' \pm E'_r)}{s} \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) + i'_{r1} Z'_r - \frac{E'_r}{s} \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right). \quad (4)$$

Отсюда, после преобразований, найдем:

$$i'_{r1} = \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) \frac{U_{s1} - \frac{\alpha}{s} (\Delta U' \pm E'_r)}{\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) Z_{s1} + \frac{\alpha}{s} (sZ'_{r1} + Z'_r)}, \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha \approx \dot{\alpha} = \frac{Z_{m1} + Z_{s1}}{Z_{m1}}.$$

Аналогично можно составить схему замещения для второй гармонической, приведенной к частоте сети f_1 . Вторые гармонические тока ротора образуют систему обратной последовательности и создают поле, вращающееся относительно ротора со скоростью $-2sn_1$, а относительно статора со скоростью

$$-2sn_1 + n_1(1-s) = n_1(1-3s),$$

где n_1 — синхронное число оборотов в минуту. Частота тока, индуцированного этим полем в статоре

$$f_{s2} = 2f_2 \left(\frac{1-3s}{-2s} \right) = 2sf_1 \left(\frac{1-3s}{-2s} \right) = -f_1(1-3s).$$

Принимая во внимание те же соображения, что и при определении тока первой гармонической, получим:

$$i'_{r2} = - \frac{s \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left[U_{s1} - \frac{\alpha}{s} (\Delta U' \pm E'_r) \right] (sZ'_{r1} + Z'_r) (Z_{s2} + Z_{m2})}{\left[\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \right) sZ_{s1} + \frac{\alpha}{s} (sZ'_{r1} + Z'_r) \right] (Z'_r Z_{s2} + Z'_r Z_{m2} + sZ_{s2} Z_{m2} + sZ'_{r2} Z_{s2} + sZ'_{r2} Z_{m2})}, \quad (6)$$

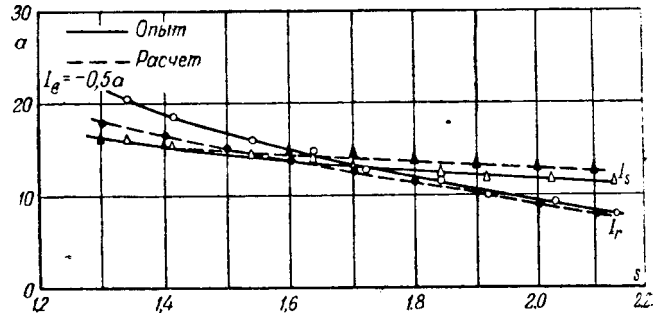


Рис. 7. Опытные и расчетные кривые токов каскада 4,5 кВт при токе возбуждения машины постоянного тока $-0,5a$.

где

$$Z_{s2} = -\frac{2r_s}{1-3s} + j2x_s; \quad Z'_{r2} = \frac{r'_r}{s} + j2x'_r, \\ Z_{m2} = 2r_m + j2x_m.$$

Аналогичным путем могут быть найдены выражения для любых гармонических тока ротора, не кратных трем.

Гармонические, кратные трем, а также и постоянные составляющие, образуют систему нулевой последовательности. В схемы замещения для этих гармонических должны быть введены соответствующие сопротивления нулевой последовательности.

Полный ток ротора

$$I'_r = \sqrt{I'^2_{r0} + I'^2_{r1} + I'^2_{r2} + \dots} \quad (7)$$

В статоре асинхронного двигателя также протекают токи разных частот: I_{s1} , I_{s2} и т. д. Эти токи можно определить из соответствующих схем замещения. Полный ток статора определится по формуле

$$I_s = \sqrt{I'^2_{s1} + I'^2_{s2} + \dots} \quad (8)$$

Расчет токов по приведенным формулам дает достаточно хорошее совпадение с результатами опыта, что видно из рис. 6 и 7, где представлены расчетные и опытные кривые токов для упомянутого выше каскада на 4,5 кВт.

Влияние высших гармонических. Момент вращения каскада равен алгебраической сумме моментов машин асинхронной и постоянного тока:

$$M_{\text{каскад}} = M_{\text{ас}} \pm M_{\text{пост}}. \quad (9)$$

Кривые момента в зависимости от скольжения при различных токах возбуждения машины постоянного тока для упомянутого выше каскада асинхронной машины 4,5 кВт приведены на рис. 8.

Момент асинхронной машины равен алгебраической сумме моментов от основной и высших

гармонических тока ротора. Токи высших гармонических, вне кратные трем, создают вращающиеся поля, которые индуцируют в статоре токи частоты

$$f_{sv} = f_1 [1 \pm (\nu \mp 1) s]. \quad (10)$$

Соответственно в кривой момента каскада имеются провалы при скольжениях

$$s = \mp \frac{1}{\nu \mp 1}. \quad (11)$$

В (10) и (11) верхний знак берется для $\nu = 3k + 1$, нижний — для $\nu = 3k - 1$, где $k = 1, 2, 3 \dots$

Основное значение для работы каскада имеют моменты от высших гармонических порядка $\nu = 3k - 1$, которые дают провалы при скоростях ниже синхронной. Так, момент от второй гармонической дает провал при скольжении $s = \frac{1}{3}$,

момент от пятой гармонической — при $s = \frac{1}{6}$

и т. д. Провалы видны на кривой результирующего момента, полученной опытным путем (рис. 8).

Постоянные составляющие тока ротора совпадают по направлению во всех трех фазах и создают неподвижное относительно ротора магнитное поле с тройным числом полюсов. От взаимодействия этого поля с полем статора при скорости ротора, равной одной трети синхронной, создается синхронный момент. Вблизи этой скорости ротор испытывает резкие колебания, сопровождающиеся колебаниями тока и электрической мощности.

Из изложенного следует, что рациональной схемой включения выпрямителя будет такая, при которой в кривой тока ротора отсутствуют постоянная составляющая и четные высшие гармонические, например трехфазная схема Ларионова с одноанодными выпрямителями. При этой схеме каскад работает устойчиво при всех скоростях, меньших $\frac{5}{6}$ синхронной, когда проявляется действие пятой гармонической тока ротора. Схема имеет еще и то преимущество, что отпадает необходимость устройства четвертого кольца у асинхронной машины.

Коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия каскада остается почти постоянным в широких пределах изменения скорости как при постоянном моменте, так и при постоянной мощности на валу. Для каскада 4,5 кВт был получен к. п. д. порядка 0,5—0,6 при изменении скольжения от 0,1 до 0,6 и при мощности на валу 1—2 кВт. При тех мощностях, для которых вообще целесообразно применение каскадных соединений, к. п. д. каскада с ртутным выпрямителем должен быть не ниже, чем в каскаде с одноякорным преобразователем. При увеличении напряжения вторичной цепи к. п. д. выпрямителя, вместе с тем и каскада, увеличивается.

Закключение. Каскад асинхронного двигателя с ртутным выпрямителем работает устойчиво в

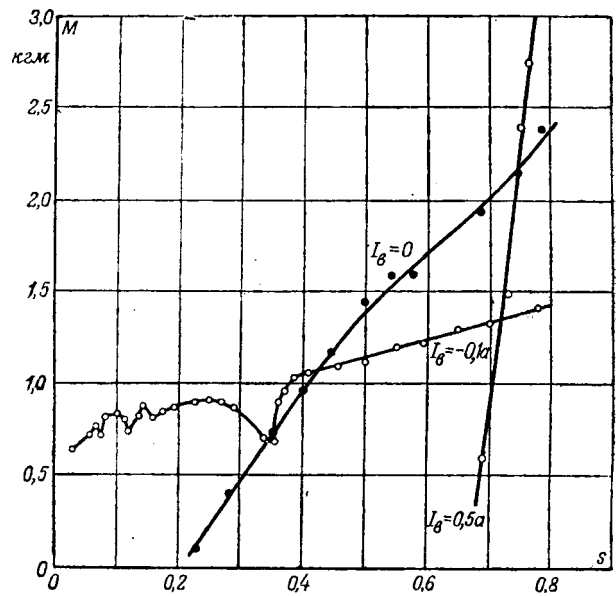


Рис. 8. Кривые момента вращения в зависимости от скольжения для „электромеханического“ каскада 4,5 кВт.

значительно более широких пределах регулирования скорости, чем каскад с одноякорным преобразователем. Отпадают все затруднения, связанные с неудовлетворительной коммутацией одноякорного преобразователя.

Некоторым недостатком каскада является наличие высших гармонических, обусловленных выпрямителем. Однако, при соответствующей схеме включения выпрямителя постоянная составляющая и все четные гармонические исчезают; остающиеся высшие гармонические сравнительно невелики и не оказывают заметного действия на работу каскада. Стоимость каскада с ртутным выпрямителем ниже, чем каскада с вращающимся преобразователем. Каскад может найти применение для привода прокатных станков, мощных вентиляторов и т. п. Заслуживает также внимания возможность реверсирования каскада путем изменения тока возбуждения машины постоянного тока и регулирования скорости в режиме обратного вращения.

Литература

1. Ф. И. Чернявский. Каскада асинхронного двигателя с ртутным выпрямителем. Известия Новочеркасского индустриального института, т. XIII (XXVII), энергетическая часть, стр. 42, 1941.
2. Ф. И. Чернявский. Каскадное соединение асинхронного двигателя с машиной постоянного тока с применением ртутного выпрямителя. Диссертация, Новочеркасский политехнический институт, 1941.
3. Ф. И. Бутаев. Вентильный каскад. ВЭП, № 4, 1940.
4. Ф. И. Бутаев, Г. С. Пантюшев и Е. Л. Эттингер. Регулируемый электропривод с управляемыми выпрямителями. Госэнергоиздат, 1941.
5. Ф. И. Бутаев и Н. Б. Яковсон. Привод прокатного стана с регулированием скорости при помощи вентильного каскада. ВЭП, № 11, 1948.

[27. 6. 1949].

Переходные режимы в простейшей схеме электромашиной автоматики

Кандидат техн. наук, доц. М. В. БЕЛЯЕВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Схемы автоматического управления электроприводами с применением электромашиных усилителей с поперечным полем отличаются большой сложностью. Для обеспечения устойчивости работы схемы и плавности протекания переходных процессов

в электроприводе возникает необходимость применения стабилизирующих трансформаторов или конденсаторов, обмоток обратной связи, твердых выпрямителей и т. п.

Существуют возможности упрощения таких схем за счет более правильного использования компенсационных обмоток электромашиных усилителей.

В статье рассматривается схема с применением электромашиного усилителя в качестве генератора, питающего одиночный электродвигатель (рис. 1). Такие схемы находят широкое распространение в промышленности в приводе перемещения электродов дуговых электропечей, в различных исполнительных механизмах малой мощности и т. п.

Компенсационная обмотка электромашиного усилителя имеет большое число ампервитков в сравнении с обмотками независимого возбуждения.

Большая форсировка возбуждения электромашиного усилителя получается в процессе пуска двигателя за счет пускового тока. При отключении обмотки независимого возбуждения

в схеме электромашиной автоматики с применением электромашиного усилителя с поперечным полем, питающим одиночный электродвигатель, необходимая стабилизация работы может быть достигнута путем правильного выбора сопротивлений шунта компенсационной обмотки. Излагаются опытные исследования и теоретические обоснования устойчивости работы такой схемы. Применение нелинейных сопротивлений оказывается целесообразным для получения быстрозатухающих переходных процессов при отключении электропривода.

под действием тормозного тока происходит размагничивание электромашиного усилителя. В зависимости от числа ампервитков компенсационной обмотки возможно возникновение как затухающих, так и незатухающих колебаний скорости двигателя в результате перемагничивания электромашиного усилителя.

Существенную роль в обеспечении как быстродействия, так и устойчивости работы схемы играет величина шунтирующей компенсационной обмотки сопротивления r_s . Применение нелинейных сопротивлений для шунтирования компенсационной обмотки обеспечивает еще более высокие качества работы схемы.

Теоретические соображения. В работе К. С. Бобова [Л. 1] показана возможность возникновения колебаний в рассматриваемой схеме и указана роль обратных связей и стабилизирующих элементов схемы для обеспечения устойчивости работы, а также проведен качественный анализ работы схемы посредством применения известных критериев устойчивости. В работе В. П. Никитина и Н. П. Куницкого [Л. 2] проведен теоретический анализ работы электромашиного усилителя, питающего одиночный двигатель.

В излагаемой статье показывается возможность получения устойчивой работы схемы при существенном ее упрощении.

Принимая в анализе переходных процессов обычные упрощения — считая параметры схемы постоянными и характеристику намагничивания линейной, можно составить следующую систему дифференциальных уравнений для рассматриваемой схемы (обозначения даны в конце статьи):

$$i_m r_m + \omega_m \frac{d\Phi_d}{dt} = U, \quad (1)$$

$$l_q r_q + \omega_q \frac{d\Phi_q}{dt} = e_q, \quad (2)$$

$$i_k r_k + \omega_k \frac{d\Phi_d}{dt} = i_s r_s, \quad (3)$$

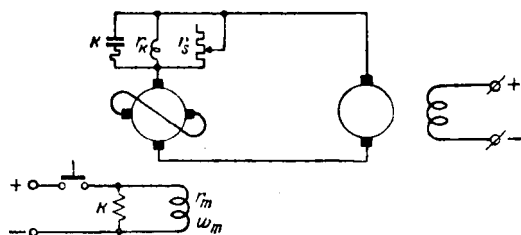


Рис. 1. Схема электромашиной автоматики.

$$L_d \frac{di_d}{dt} + \left(r_d + \frac{r_k \cdot r_s}{r_s + r_k} \right) i_d + c_e n = e_d, \quad (4)$$

$$c_m i_d = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + M_s, \quad (5)$$

$$i_d = i_k + i_s, \quad (6)$$

$$e_q = a(i_m \omega_m + i_k \omega_k), \quad (7)$$

$$e_q = k\Phi_d, \quad (8)$$

$$e_d = \beta \omega_q i_q, \quad (9)$$

$$e_d = k\Phi_q. \quad (10)$$

В результате исключения из этой системы дифференциальных уравнений скорости получается уравнение (приложение 1):

$$\begin{aligned} & (T_m + T_k) T_q T_d \theta \frac{d^4 n}{dt^4} + [(T_m + T_k) T_q + \\ & + (T_m + T_k + T_q) T_d] \theta \frac{d^3 n}{dt^3} + [(T_m + T_k + T_q + T_d) \theta + \\ & + (T_m + T_k) T_q] \frac{d^2 n}{dt^2} + \\ & + \left[T_m + T_k + T_q + \left(1 - \frac{Rr_s}{r_k r_s + r_d r_s + r_k r_d} \right) \theta \right] \frac{dn}{dt} + \\ & + n = \frac{\alpha \omega_m \beta \omega_q}{r_m r_q} \frac{U}{c_e} + \\ & + \left(\frac{Rr_s}{r_k r_d + r_k r_s + r_d r_s} - 1 \right) \frac{M_s}{c_m c_e} \frac{r_k r_s + r_d r_s + r_k r_d}{r_k + r_s}. \quad (11) \end{aligned}$$

В зависимости от величины r_s коэффициент при первой производной скорости по времени может быть положительным или отрицательным. Наличие отрицательного коэффициента отображает нарушение устойчивости работы схемы: скорость электропривода резко начинает увеличиваться, наступает аварийный режим. Работа схемы с такими величинами сопротивления r_s недопустима. Наличие положительного коэффициента еще не обеспечивает устойчивости работы схемы. Необходима дополнительная проверка устойчивости и быстродействия схемы путем исследования корней характеристического уравнения

$$\begin{aligned} & (T_m + T_k) T_q T_d \theta z^4 + [(T_m + T_k) T_q + \\ & + (T_m + T_k + T_q) T_d] \theta z^3 + [(T_m + T_k + T_q + T_d) \theta + \\ & + (T_m + T_k) T_q] z^2 + [(T_m + T_k) + T_q + \\ & + \left(1 - \frac{Rr_s}{r_k r_s + r_d r_s + r_k r_d} \right)] z + 1 = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

Корни этого уравнения должны быть отрицательными или же должны иметь отрицательную вещественную часть.

Если коэффициент при первой производной скорости по времени равен нулю, то работа схемы неустойчива. Этим условием можно воспользоваться для определения величины шунтирующего сопротивления в первом приближении

как некоторого предельного значения. Это предельное значение будет различно для пуска и торможения электродвигателя. Изменение величины r_s определяется численным значением постоянной электромагнитной инерции обмотки независимого возбуждения T_m .

Для пуска электродвигателя предельное значение сопротивления определяется из соотношения:

$$\frac{Rr_s}{r_d r_k + r_k r_s + r_d r_s} \leq \frac{T_m + T_k + T_q + \theta}{\theta}.$$

Для торможения электропривода

$$\frac{Rr_s}{r_d r_k + r_k r_s + r_d r_s} \leq \frac{T_k + T_q + \theta}{\theta}.$$

Опытные данные показывают (ниже, рис. 2 и 5), что характер переходных процессов для пуска и торможения электродвигателя различен при одном и том же сопротивлении шунта компенсационной обмотки.

Для определения характера переходных процессов в схеме необходимо решить вопрос о том, будут ли корни рассматриваемого уравнения вещественными или комплексными. Существует способ определения корней алгебраического уравнения четвертой степени [Л. 3].

Применение указанного способа для определения характера переходных процессов в схеме показывает (приложение 2), что переходные процессы как пуска, так и торможения электродвигателя будут всегда затухающими, если сопротивление шунта компенсационной обмотки не превосходит определенной величины

$$r_s \leq 100 r_k.$$

Увеличение сопротивления шунта влечет за собой возникновение незатухающих колебаний как при пуске, так и при торможении электродвигателя.

Для форсированного пуска необходимо применять возможно более высокое сопротивление шунта, так как при этом действие компенсационной обмотки будет более сильным вследствие увеличения намагничивающих ампервитков электромашиного усилителя.

Для торможения электродвигателя шунтирующее сопротивление должно быть меньше не только по причине возможности возникновения незатухающих колебаний, но и опасности появления ползучей скорости электродвигателя. Полная остановка электродвигателя получается лишь при малых сопротивлениях шунта. При таких сопротивлениях шунта пуск электродвигателя происходит замедленно. Целесообразно производить в схеме включение малого сопротивления при отключении обмотки независимого возбуждения, как показано на рис. 1.

Опыты. Исследование переходных процессов производилось в схеме, составленной из электромашиного усилителя типа ЭМУ5-3000 4,5 квт завода МЭП и двигателя 4,4 квт 1700 об/мин.

Для определения характера переходных процессов в схеме при различных сопротивлениях

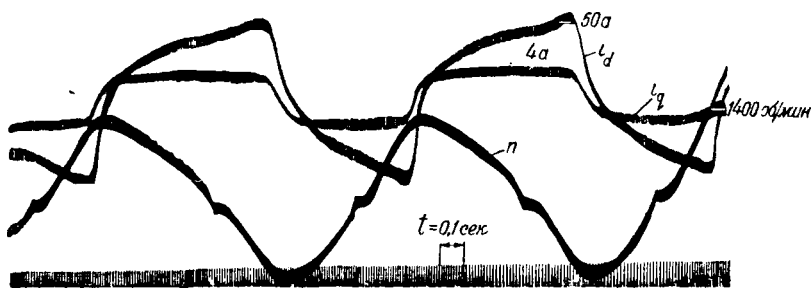


Рис. 2. Осциллограмма незатухающего колебательного процесса при отключении обмотки независимого возбуждения. Сопротивление шунта компенсационной обмотки $r_s = 35$ ом.

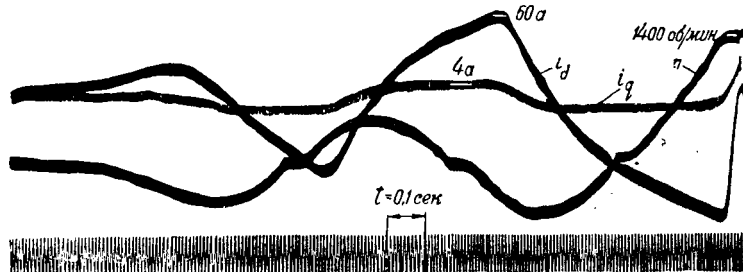


Рис. 3. Осциллограмма затухающего колебательного процесса при отключении обмотки независимого возбуждения. Сопротивление шунта компенсационной обмотки 30 ом.

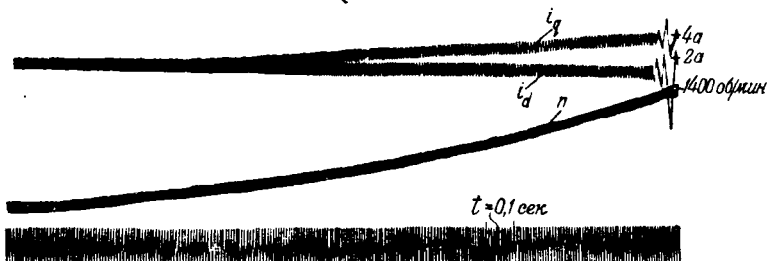


Рис. 4. Осциллограмма процесса торможения электропривода при шунтировании компенсационной обмотки нелинейным сопротивлением.

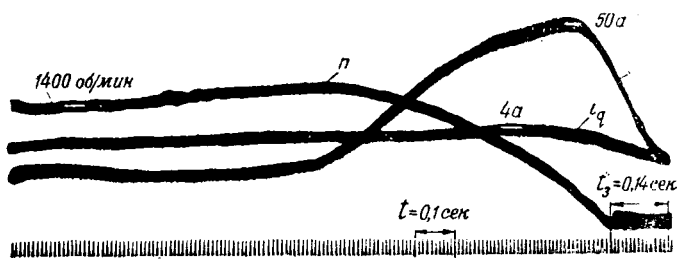


Рис. 5. Осциллограмма пускового процесса при сопротивлении шунта компенсационной обмотки в 35 ом.

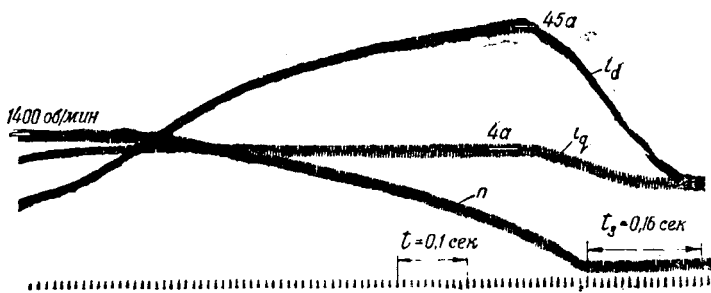


Рис. 6. Осциллограмма пускового процесса при сопротивлении шунта компенсационной обмотки в 30 ом.

шунта компенсационной обмотки снимались многочисленные осциллограммы в пусковом и тормозном режимах электропривода. Осциллограммы снимались при различном, но постоянном по величине возбуждении электромашиного усилителя. Токи возбуждения изменялись в пределах от 25 до 150% от номинального тока возбуждения электромашиного усилителя.

На рис. 2 показан незатухающий колебательный процесс при отключении тока возбуждения 10 ма при номинальном токе возбуждения 12 ма. Сопротивление шунта компенсационной обмотки составляло 35 ом. Колебания не являются синусоидальными вследствие насыщения и наличия явления гистерезиса.

На рис. 3 показан затухающий колебательный процесс при отключении того же самого тока возбуждения в 10 ма, но при сопротивлении шунта в 30 ом.

Уменьшение сопротивления шунта при отключении обмотки независимого возбуждения до 8—10 ом вызывает сильные тормозные токи и увеличивает нагрузку электромашиного усилителя. Необходимо, чтобы сопротивление шунта менялось в сторону уменьшения в процессе торможения. Для осуществления плавного процесса торможения целесообразно включать параллельно компенсационной обмотке нелинейные сопротивления.

На рис. 4 показан процесс торможения электропривода при отключении тока возбуждения 10 ма и шунтировании компенсационной обмотки бареттером (железородородной лампой) 30 в, 0,5 а, имеющей нелинейную вольтам-

перную характеристику. На рис. 5 показан пусковой процесс при возбуждении в 10 ма и сопротивлении шунта в 35 ом. Если при этом же сопротивлении шунта при отключении обмотки возбуждения возникал незатухающий колебательный процесс, то при включении обмотки возбуждения колебания едва заметны. На рис. 6 показан пусковой процесс при том же возбуждении, но при сопротивлении шунта в 30 ом. Пуск протекает несколько медленнее, чем в предыдущем случае.

Определение постоянных электромагнитной инерции обмоток независимого возбуждения, компенсационной обмотки и главной цепи схемы производилось посредством осциллографирования процесса нарастания тока при включении на постоянное напряжение. Токи были приняты номинальными для каждой из этих обмоток.

Постоянные электромагнитной инерции: обмотки независимого возбуждения $T_m = 0,01$ сек; компенсационная обмотка $T_k = 0,005$ сек; обмотки поперечного контура якоря электромашиного усилителя $T_q = 0,06$ сек; главной цепи схемы $T_d = 0,015$ сек

Приложение 1. Для совместного решения системы дифференциальных уравнений можно применить метод Д. П. Морозова [Л. 4].

Заменяем в уравнениях (1) — (3) токи и потокоцепления обмотки на э. д. с. продольной и поперечной осей электромашинного усилителя посредством подстановок из уравнений (6) — (10)

$$e_q + \left(\frac{\alpha \omega_m^2}{kr_m} + \frac{\alpha \omega_k}{k(r_k + r_s)} \right) \frac{de_q}{dt} = \frac{\alpha \omega_m}{r_m} U + \frac{\alpha \omega_k r_s}{r_k + r_s} i_d,$$

$$e_d + \frac{\beta \omega_q^2}{kr_q} \cdot \frac{de_q}{dt} = \frac{\beta \omega_q}{r_q} e_q.$$

Уравнение (4) составлено с учетом индуктивности компенсационной обмотки в общей величине индуктивности главной цепи. Это возможно потому, что индуктивность компенсационной обмотки мала и многочисленные осциллограммы показывают, что закономерность изменений тока компенсационной обмотки не отличается от закономерности изменения тока главной цепи.

Решая совместно полученные уравнения и уравнения (4) и (5) и подставляя величины выражений постоянных электромагнитной инерции

$$T_m = \frac{\alpha \omega_m^2}{kr_m}, \quad T_q = \frac{\beta \omega_q^2}{kr_q}, \quad T_k = \frac{\alpha \omega_k^2}{k(r_k + r_s)},$$

$$T_d = \frac{L_d(r_k + r_s)}{r_d r_k + r_k r_s + r_d r_s}$$

и электромеханической инерции

$$\theta = \frac{GD^2}{375 c_m c_e} \cdot \frac{r_d r_s + r_k r_s + r_d r_k}{r_k + r_s},$$

получаем уравнение:

$$(T_m + T_k) T_q T_d \theta \frac{d^4 n}{dt^4} + [(T_m + T_k) T_q + (T_m + T_k + T_q) T_d] \times$$

$$\times \theta \frac{d^3 n}{dt^3} + [(T_m + T_k + T_q + T_d) \theta + (T_m + T_k) T_q] \frac{d^2 n}{dt^2} +$$

$$+ [T_m + T_k + T_q + \left(1 - \frac{\alpha \omega_k \beta \omega_q}{r_q} \cdot \frac{r_s}{r_k + r_s} \right) \times$$

$$\times \frac{r_k + r_s}{r_d r_s + r_k r_s + r_k r_d}] \cdot \theta \frac{dn}{dt} + n = \frac{\alpha \omega_m \beta \omega_q}{r_m r_q} \cdot \frac{u}{c_e} +$$

$$+ \left(\frac{\alpha \omega_k \beta \omega_q}{r_q} \cdot \frac{r_s}{r_k + r_s} \cdot \frac{r_k + r_s}{r_d r_s + r_k r_s + r_k r_d} - 1 \right) \frac{M_s}{c_m c_e} \times$$

$$\times \frac{r_d r_s + r_k r_s + r_d r_s}{r_k + r_s}.$$

Это уравнение показывает, что статическая нагрузка, увеличивая нагрузочный ток, вызывает повышение скорости электродвигателя.

Внешняя характеристика электромашинного усилителя при самовозбуждении от компенсационной обмотки, зашунтированной сопротивлением r_s , выражается посредством уравнения

$$U_d = \frac{\theta \omega_k \beta \omega_q}{r_d} \cdot \frac{r_s}{r_k + r_s} i_d.$$

При одном и том же нагрузочном токе i_d ток компенсационной обмотки i_k различен в зависимости от величины сопротивления шунта r_s , и поэтому U_d может быть различным, так как действие реакции якоря, учитываемое результирующим числом ампервитков компенсационной обмотки $i_k \omega_k$, является очень сложным. Для определения величины U_d можно воспользоваться характеристикой намагничивания электромашинного усилителя при независимом возбуждении компенсационной обмотки и его внешней характеристикой.

Разность ординат этих характеристик определяет действие реакции якоря. Имея одну внешнюю характери-

стику, снятую при определенной величине r_s , можно построить другую характеристику для иного r_s . Таким образом, можно определить зависящую от r_s величину

$$R = \frac{\alpha \omega_k \beta \omega_q}{r_q}.$$

Проделанные расчеты и построения показывают, что для $r_s = 30 - 40$ ом величина $R = (1,8 - 2,2)$ ом.

Вводя величину R , получаем рассматриваемое уравнение в виде уравнения (12).

Приложение 2. Задаемся $r_s = 100$, $r_k = 35$ ом. Такому r_s соответствует величина $R = 2$ ом, найденная, как указано выше, посредством простого графо-аналитического расчета на основе сравнения характеристики намагничивания и внешней характеристики электромашинного усилителя.

Подставляем значения параметров схемы в уравнение (12)

$$0,015 \cdot 0,06 \cdot 0,015 \cdot 0,3 z^4 + (0,015 \cdot 0,06 + 0,075 \cdot 0,015) 0,3 z^3 +$$

$$+ (0,09 \cdot 0,3 + 0,015 \cdot 0,015) z^2 +$$

$$+ [0,75 + \left(1 - \frac{2,0 \cdot 35}{0,35 \cdot 35 + 1,28 \cdot 35 + 1,28 \cdot 0,35} \right) 0,3] z + 1 = 0;$$

$$4,05 \cdot 10^{-6} z^4 + 607,5 \cdot 10^{-6} z^3 + 27,23 \cdot 10^{-3} z^2 + 0,009 z + 1 = 0$$

Проверка этого уравнения по неравенствам Гурвитца показывает, что работа схемы является устойчивой.

Для определения характера переходного процесса в схеме необходимо преобразовать это уравнение к виду [Л. 3]:

$$v^4 + xv^3 + yv + 1 = 0; \quad (13)$$

$$x = \frac{b_2}{\sqrt{b_4}}; \quad y = \frac{b_3}{\sqrt{b_4}}; \quad b_2 = -\frac{3}{8} a_1^2 + a_2; \quad b_3 = \frac{1}{8} a_1^3 -$$

$$- \frac{1}{2} a_1 a_2 + a_3;$$

$$b_4 = -\frac{3}{255} a_1^4 + \frac{1}{16} a_1^2 a_2 - \frac{1}{4} a_1 a_3 + a_4;$$

$$z^4 + a_1 z^3 + a_2 z^2 + a_3 z + a_4 = 0,$$

$$z^4 + 150 z^3 + 6,72 \cdot 10^3 z^2 + 2,2 \cdot 10^3 z + 0,25 \cdot 10^6 = 0.$$

Вычисления по этим формулам дают: $b_2 = -1717,5$;

$$b_3 = 82850; \quad b_4 = 4770000; \quad x = -0,79; \quad y = 1770.$$

Вопрос о том, будут ли корни уравнения (12) вещественными или комплексными, зависит от того, будет ли положительным или отрицательным численное значение многочлена:

$$A = 4(x^3 + 12)^3 - (72x - 27y^2 - 2x^3)^2, \quad (14)$$

$$A = 4[(-0,79)^2 + 12]^3 - [72 \cdot (-0,79) - 27 \cdot 1770^2 -$$

$$- 2(-0,79)^3]^2 < 0.$$

При таком значении многочлена уравнение (12) имеет два действительных и два комплексных корня. Процесс будет колебательным, быстро затухающим, так как $y \gg x$.

Это подтверждает осциллограмма рис. 5. При уменьшении активного сопротивления шунта r_s процесс становится аперiodическим, так как коэффициент a_3 увеличивается, и значение многочлена (14) становится положительным, что соответствует наличию четырех действительных корней.

Подставляя значения тех же самых параметров схемы в уравнение (12) за исключением величины T_m , определим характер переходных процессов при отключении схемы:

$$1,35 \cdot 10^{-6} z^4 + 427,5 \cdot 10^{-3} z^3 + 24,23 \cdot 10^{-3} z^2 - 0,001 z + 1 = 0.$$

Неравенства Гурвитца показывают, что работа схемы становится неустойчивой.

Таким образом при одном и том же сопротивлении шунта $r_s = 35$ ом переходные процессы пуска электро-

двигателя являются устойчивыми, а торможения — неустойчивыми.

Опыты и численные расчеты показывают, что поток возбуждения по продольной оси электромашинного усилителя создается в большей своей части за счет разности м. д. с. компенсационной обмотки и обмотки якоря. При номинальном токе возбуждения ампервитки обмотки независимого возбуждения составляют $i_m \omega_m = 0,012 \times 3200 = 38,4$. По компенсационной обмотке протекает почти полный нагрузочный ток электродвигателя, так как сопротивление шунта компенсационной обмотки почти в 100 раз больше сопротивления самой компенсационной обмотки. При номинальном нагрузочном токе ампервитки компенсационной обмотки $i_k \omega_k \sim 19,6 \cdot 8 \approx 160$, т. е. почти в четыре раза больше, чем ампервитки независимой обмотки возбуждения. За счет компенсационной обмотки создается большая форсировка возбуждения пусковыми токами двигателя. Возможности возникновения колебаний при включении схемы могут быть предупреждены выбором величины шунта компенсационной обмотки.

i_m, i_k, i_q, i_d — токи обмоток независимого возбуждения, компенсационной, поперечного контура, электромашинного усилителя и главной цепи схемы;

r_m, r_a, r_k, r_d — активные сопротивления обмоток независимого возбуждения, компенсационной, поперечного контура электромашинного усилителя и главной цепи схемы;

ω_m, ω_q — число витков обмотки независимого возбуждения и поперечного контура электромашинного усилителя;

i_s, r_s — ток и сопротивление шунта компенсационной обмотки;

Φ_q, Φ_d — потоки поперечной и продольной осей электромашинного усилителя;

L_d — общая индуктивность главной цепи схемы;

e_q, e_d — э. д. с. продольной и поперечной осей электромашинного усилителя;

α, β — тангенсы угла наклона характеристик намагничивания по продольной и поперечной осям электромашинного усилителя;

c_m, c_e — коэффициенты пропорциональности между скоростью и противо-э. д. с. и вращающим моментом двигателя;

n — скорость электродвигателя;

GD^2 — маховой момент электродвигателя;

M_s — статический момент на валу электродвигателя;

ω_k — число витков компенсационной обмотки с учетом реакции якоря;

U, u_d — напряжение, подводимое к обмотке независимого возбуждения и напряжение на продольных щетках электромашинного усилителя;

k — коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и э. д. с. электромашинного усилителя.

Литература

1. К. С. Бобов. Переходные процессы электропривода в системе Леонарда с амплидином. *Электричество*, № 4, 1947.
2. В. П. Никитин и Н. П. Куницкий. Электропривод с амплидином, питающим двигатель механизма. *Известия Академии наук СССР, ОТН*, № 7—8, 1944.
3. В. П. Никитин, В. К. Туркин и Н. П. Куницкий. Об устойчивости работы амплидинного электропривода. *Известия Академии наук СССР, ОТН*, № 11, 1946.
4. Д. П. Морозов. Возбуждение электрических машин в схемах электромашинной автоматики. *Электричество*, № 9, 1948.

[19. 12. 1949].



Нарастание обратного напряжения при коммутации в ионных вентилях

Кандидат техн. наук, доц. М. М. АКОДИС

Уральский политехнический институт им. Кирова

Для анализа явлений, происходящих в цепях многофазных выпрямительных устройств при гашении дуги во время коммутации тока ионным вентиляем, например ртутным или тиратроном, рассмотрим простейшую схему, изображенную на рис. 1. В этой схеме L_a — индуктивность короткого замыкания каждой фазы, активным сопротивлением которой для анализа рассматриваемых явлений можно пренебречь, L_k — катодная индуктивность. Выпрямленный ток будем считать неизменным вследствие большой величины катодной индуктивности.

Пока напряжение данной фазы выше напряжения других фаз, ток проходит через связанный с нею вентиль (анод — в многоанодном вентиле).

Проводится анализ процесса коммутации тока в ионном вентиле многофазного выпрямителя, показывающий, что обратное напряжение на нем не может мгновенно достигнуть величины «скачка» из-за наличия в схеме емкостей. Заряд этих емкостей, определяющий скорость нарастания обратного напряжения на вентиле, происходит с частотой собственных колебаний схемы, состоящей из индуктивностей рассеяния генераторов и трансформаторов и емкости на землю и между отдельными элементами схемы. После анализа явления предложены методы расчета скорости восстановления напряжения для схем, в которых влиянием питающей сети можно пренебречь, либо учитывать его отдельно, и показано, в каких случаях подобный метод расчета допустим.

В момент, когда напряжение очередной фазы становится выше напряжения катода, зажигается дуга в связанном с нею вентиле. Обе фазы трансформатора оказываются замкнутыми накоротко через вентили, — начинается коммутация. Под влиянием междуфазовой синусоидальной э. д. с. в цепи ABC (рис. 1,а) начинается нарастание тока междуфазового короткого замыкания, направленного против рабочего тока в гасимом вентиле. Ток в гасимом вентиле уменьшается, а в зажигаемом — нарастает со скоростью нарастания тока короткого замыкания.

Скорость изменения тока при коммутации

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{2L_a} \sin(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где U_0 — амплитудное значение междуфазового напряжения. Исчисление t начинается с момента начала коммутации.

В момент, когда нарастающий ток междуфазового короткого замыкания станет равным выпрямленному, ток в гасимом вентиле достигнет нулевого значения и короткое замыкание обрывается, так как вентиль не пропускает тока в обратном направлении. В этот момент в кривой тока в обоих вентилях наблюдается перелом — производная кривой тока резко изменяется. В зажигаемом вентиле ток, нарастающий в этот момент со скоростью

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{2L_a} \sin(\alpha + \gamma), \quad (2)$$

где γ — угол коммутации;

α — угол регулирования, внезапно перестает увеличиваться, оставаясь равным выпрямленному току ($\frac{di}{dt} = 0$). В гасимом

вентиле ток, уменьшавшийся с той же скоростью, достигнув нулевого значения, остается и в дальнейшем равным ему.

Пока через вентили протекал ток короткого замыкания, напряжение катода по отношению к нейтрали равнялось полусумме фазовых напряжений.

Напряжение заканчивающей работу фазы равно u_1 . Вектор э. д. с. самоиндукции $L_a \frac{di}{dt}$, суммируясь с u_1 , дает напряжение, равное по отношению к нейтрали u_n (рис. 1, б). Во вступающей в работу фазе, где ток нарастает, э. д. с. направлена в противоположную сторону и, суммируясь с напряжением фазы u_2 , создает напряжение, также равное по отношению к нейтрали u_n .

В момент t_1 , когда в кривой тока происходит перелом, иначе говоря, когда падение напряжения в анодной индуктивности становится равным нулю, напряжение на выводах трансформатора каждой фазы должно изменяться с u' до мгновенных значений u'_1 и u'_2 соответственно, т. е. на величину $\frac{U_k}{2} \sin(\alpha + \gamma)$. Однако, в реальной цепи имеется ряд емкостей (рис. 2): распределенная по обмотке емкость трансформатора C_1 , емкость шинного моста или кабеля между трансформатором и выпрямителем C_2 , выпрямителя C_3 , катодного реактора и кабеля или шин между выпрямителем и реактором C_4 , емкость между фазами C_5 . Поэтому напряжение в ней, а следовательно, и на вентиле не может мгновенно достигнуть указанных значений. Напряжение будет нарастать постепенно, по мере заряда конденсаторов током, продолжающим протекать через индуктивность. Поэтому ток (через индуктивность) в заканчивающей работу фазе после достижения нулевого значения не прекращается, а продолжает нарастать в обратном направлении. Точно также ток в индуктивности, вступающей в работу фазы, после достижения значения выпрямленного тока продолжает нарастать (рис. 1, в).

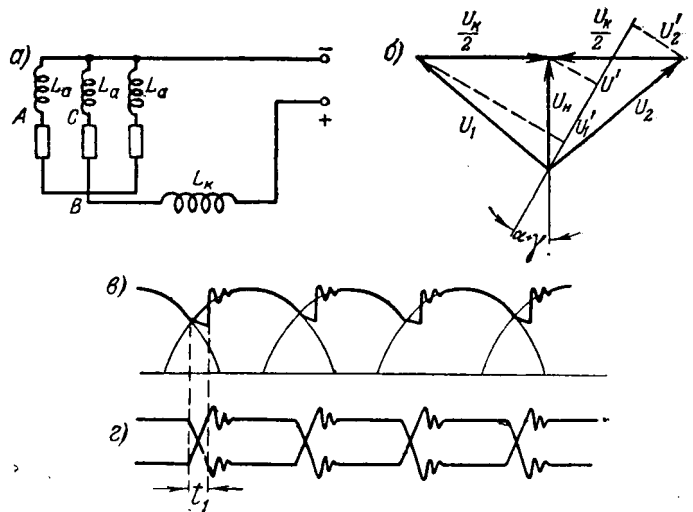


Рис. 1. Ток и напряжение в ионном вентиле во время коммутации.

Скорость нарастания напряжения на емкостях с обеих сторон гасимого вентиля зависит от скорости изменения тока во второй фазе в момент достижения им установившегося значения. Иными словами, эта скорость зависит от анодной индуктивности и от величины заряжаемых емкостей¹.

Заряд емкостей через индуктивность может создать колебательный процесс, при котором напряжение на емкостях и вентилях может достигнуть (при малом затухании) почти двойной амплитуды изменения напряжения. Частоты колебаний определяются анодными индуктивностями и соотношением емкостей.

Если емкости C_3, C_5 сравнительно малы (рис. 2) и ими можно пренебречь, а нейтраль трансформатора заземлена, то восстановление напряжения в каждой фазе происходит независимо с частотой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C}}, \quad \text{где } C \text{ — эквивалентная емкость каж-}$$

дой фазы, которая в общем случае во второй фазе больше, чем в первой на величину C_4 . Полное изменение напряжения на вентиле получается суммированием обеих кривых. Если емкость C_4 (рис. 2.) относительно мала, условия восстано-

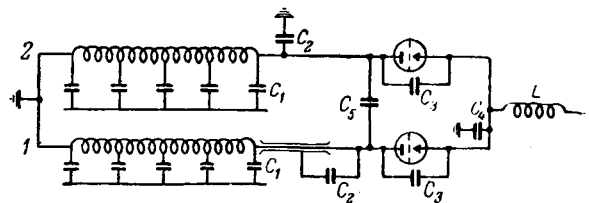


Рис. 2. Распределение емкости в схеме выпрямления.

вления напряжения в обеих фазах примерно одинаковы. Следовательно, восстанавливающееся

¹ Восстановление напряжения во второй фазе начинается в момент достижения максимального значения тока. Как указывал автор [Л. 1], для восстановления напряжения достаточно перелома в кривой тока и не требуется, как это принято считать, прекращения его.

напряжение на вентиле равно удвоенному фазовому. При большой емкости C_4 частоты полу-чаются разными, и полное напряжение меньше удвоенного фазового, так как амплитуды кривых восстановления напряжения обеих фаз не совпадают во времени.

При отсутствии катодного реактора процесс протекает несколько иначе.

Как известно, скорость восстановления напряжения в каждой фазе при одночастотной схеме определяется по формуле

$$\frac{du}{dt} \approx 4,5a \frac{E_k}{2} f_0 \cdot 10^{-6} \sin(\alpha + \gamma), \quad (3)$$

где E_k — амплитудное значение междуфазового напряжения;

f_0 — частота восстанавливающегося напряжения;

a — коэффициент, определяемый отношением индуктивности рассеяния трансформатора и индуктивности первичной цепи;

α — угол коммутации;

γ — угол регулирования.

В мощных низковольтных установках на напряжение 500 — 800 в вследствие малой индуктивности трансформаторов частота колебаний восстанавливающегося напряжения получается очень большой, достигая $1 - 2 \cdot 10^5$ гц и более при суммарной емкости 0,2 — 0,3 мкф на фазу.

И в маломощных также возможны частоты такого же порядка за счет очень малых емкостей. Получающаяся при этом скорость восстановления напряжения может достигать 200 в/мксек и более при $\alpha + \gamma = 30^\circ$. С увеличением $\alpha + \gamma$ или уменьшением емкости и индуктивности скорость восстановления напряжений возрастает.

С возрастанием рабочего напряжения индуктивность увеличивается, снижая частоту собственных колебаний, однако скорость восстановления напряжения, как известно, возрастает и может достигать 2000 в/мксек и более при высших напряжениях и больших мощностях.

Если гасимый вентиль не оборвет тока в момент нулевого значения и некоторое время будет пропускать значительный ток в обратном направлении (рис. 1,2), характер процесса может измениться.

В этом случае вентиль шунтирует емкость омическим сопротивлением (обратный ток). Схема примет вид, изображенный на рис. 3,а, где r_0 —

среднее сопротивление дуги вентиля в этот период.

Если

$$r_0 \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2L_a}{C}}, \quad (4)$$

нарастание напряжения на вентиле будет происходить по апериодической кривой, — колебания в кривой восстанавливающегося напряжения исчезнут. Очевидно, справедливо и обратное: если в кривой восстанавливающегося напряжения отсутствуют колебания, значит остаточная проводимость вентиля непосредственно после гашения дуги велика.

Для ртутных выпрямителей получающиеся из неравенства (4) величины r_0 , а следовательно, и обратного тока значительно больше замеряемых значений. Для трансформатора мощностью 1500 ква при 825 в. $L_a \approx 15 \cdot 10^5$ гц при $C_1 = C_2 \approx 2 \cdot 10^{-2}$ мкф, получим $C = 10^{-8}$ ф, $r_0 = 86$ ом. Когда амплитуда „скачка“ напряжения равна половине междуфазового, амплитудное значение обратного тока в этом случае должно быть больше 7 — 8 а. При глубоком сеточном регулировании ток должен быть еще больше (для того, чтобы колебания были демпфированы).

Проводившиеся измерения обратных токов дают в десятки и сотни раз меньшие величины. Следовательно, восстановление напряжения в действующих установках при наличии катодного реактора должно всегда иметь колебательный характер. Это подтвердилось при экспериментировании с маломощными вакуумными вентилями.

С уменьшением мощности трансформатора снижаются амплитуда тока через вентиль и скорость его изменения как перед достижением нулевого значения, так и после, что облегчает деионизацию как до, так и после прохождения тока через нулевое значение.

Как видно из изложенного, процесс коммутации тока в ионных вентилях подобен отключению короткого замыкания выключателем. После снижения тока до нулевого значения со скоростью изменения тока междуфазового короткого замыкания на напряжение нарастает со скоростью, определяемой собственной частотой сети.

Очевидно на работу вентиля в многофазном выпрямительном устройстве влияют не только внутреннее устройство вентиля, но и параметры схемы, в которой он работает, и которые в ряде случаев могут играть существенную роль в определении характеристики вентиля.

Изложенное позволяет сделать следующее заключение.

1. Увеличение анодной индуктивности снижает скорость нарастания скачка обратного напряжения после нулевого значения тока и, следовательно, увеличивает время, предоставляемое для деионизации дугового пространства.

2. Увеличение емкости, шунтирующей трансформатор или вентиль, также снижает скорость нарастания скачка напряжения.

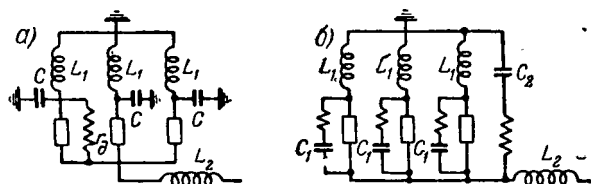


Рис. 3.

а — схема выпрямления с учетом остаточной проводимости дуги гасимого вентиля; б — схема выпрямления с шунтированием вентилей емкостью и демпфирующими сопротивлениями.

Включение сопротивления последовательно с емкостью C (рис. 3,б) позволяет обеспечить демпфирование колебаний восстанавливающегося напряжения. Однако, включение сопротивления в цепь емкости, шунтирующей вентиль, увеличивает скорость восстановления напряжения на вентиле, особенно в первый момент (рис. 4).

Современные представления о работе ртутного выпрямителя позволяют утверждать, что значительное снижение скорости восстановления напряжения, существенно снижающее величину обратного тока и увеличивающее время, предоставляемое для деионизации вентиля, может резко снизить вероятность обратных зажиганий в мощных выпрямителях. Возможно, что для некоторых конструкций ртутных выпрямителей существует оптимальная скорость восстановления напряжения. Конечно, для любого типа ионного вентиля зависимость вероятности обратного зажигания от скорости восстановления напряжения на нем после гашения дуги при любой форме кривой восстанавливающегося напряжения в большой степени определяется конструктивными параметрами, состоянием поверхностей и рядом других факторов.

Расчет скорости восстановления напряжения. Методика расчета. В общем случае могут иметь место все виды емкостей, изображенные на рис. 2. В трансформаторных обмотках должна преобладать емкость на землю. Соединительные шины между трансформатором и вентилем могут иметь емкость между фазами более высокую, чем на землю, или одной с ней величины и могут почти не иметь междупазовой емкости, если применить одножильные кабели. Емкость вентиля как на землю, так и между анодом и катодом вообще невелика, однако во время восстановления напряжения она может иметь повышенное значение. Если начальный рост прочности дугового промежутка после гашения дуги осуществляется только за счет деионизации тонкого прианодного слоя при сохранении высокой проводимости остальной части плазмы, емкость слоя между анодом и плазмой может значительно превысить статическую емкость вентиля.

В рассмотренных случаях, когда емкостью, шунтирующей вентиль C_3 и междупазовой C_5 , пренебрегали, схема получилась одночастотной, и расчет ее был весьма прост. В случае, если емкостями C_3 и C_5 (рис. 2) нельзя пренебречь, цепи различных фаз оказываются связанными, расчет значительно усложняется.

Полная трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом изображена на рис. 5,а, мостовая — на ис. 5,б.

Как и при определении скорости восстановления напряжения в выключателях, здесь целесообразно применять значительно упрощающий расчет — метод наложения тречного тока, разработанный в 36 г. в высоковольтной лаборатории Донэнерго [Л. 2].

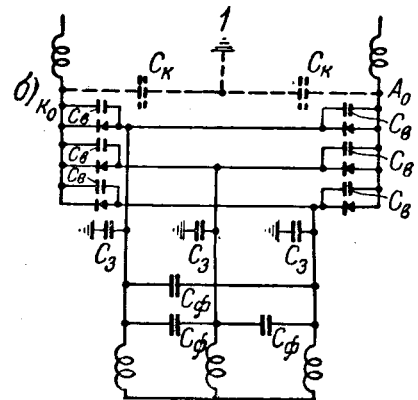
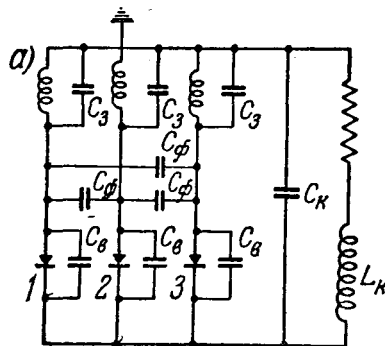


Рис. 5. а — схема выпрямления с нулевым выводом; б — полная мостовая схема.

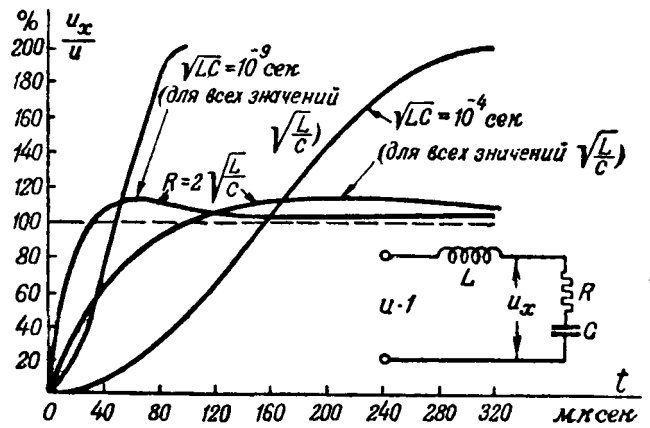


Рис. 4. Влияние демпфирующего сопротивления на скорость восстановления напряжения.

Метод основан на применении теоремы Тевенена к переходному процессу восстановления напряжения. При отсутствии гашения для прекращения тока в цепи достаточно приложить к вентилю в момент нулевого значения тока напряжение, равное восстанавливаемому, противоположного знака. По теореме Тевенена ток переходного режима выражается уравнением:

$$i = \frac{e_c(t)}{Z(p)}, \tag{5}$$

где $e_c(t)$ — восстанавливаемое напряжение; $Z(p)$ — устанавливаемое полное сопротивление цепи.

Напряжение промышленной частоты можно считать неизменным в течение времени восстановления и равным $E_m = E_n \sin(\alpha + \gamma)$. При этом условии возникающий при коммутации ток междупазового короткого замыкания при достаточно большом катодном реакторе можно выразить уравнением:

$$i \approx \frac{E_m}{2pL_a}, \tag{6}$$

справедливым при малых значениях i .

Из уравнений (5) и (6) получим:

$$e_c = \frac{E_m}{2L_a} \cdot \frac{Z(p)}{p}. \tag{7}$$

Рассмотрим основные схемы (рис. 5). Обозначим: C_3 — полная емкость на землю одной фазы

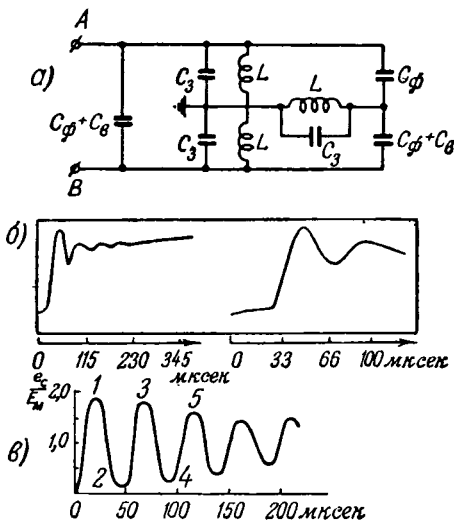


Рис. 6.

а — эквивалентная расчетная схема трехфазной схемы выпрямления с заземленной нейтралью при $C_{\kappa} = 0$; б — катодные осциллограммы; в — расчетная кривая ($C_3 = 10\ 000$, $C_{\phi} = 3\ 000$, $C_{\delta} = -3\ 000$ пф; $L = 2 \cdot 10^{-2}$ гн. По расчету $t_{01} = 23$ мксек, по осциллограмме 22,2 мксек).

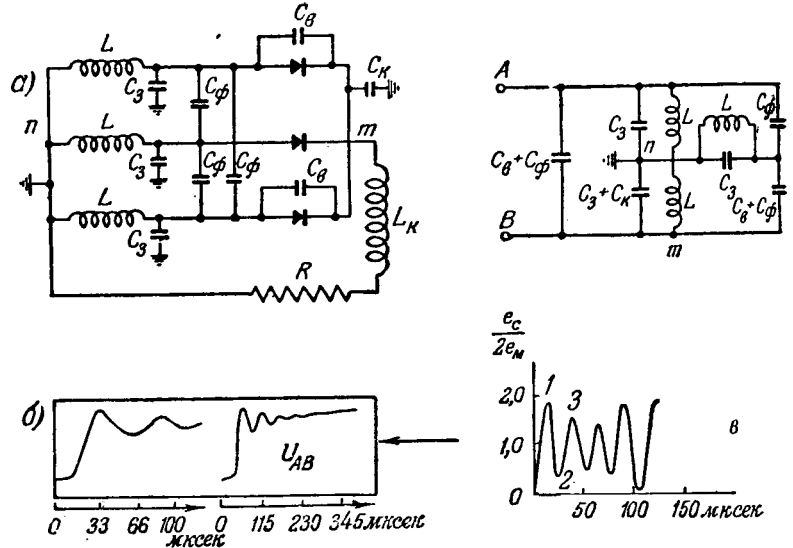


Рис. 7.

а — эквивалентные расчетные схемы полной трехфазной схемы с нулевым выводом; б — катодные осциллограммы; в — расчетная кривая (по расчету $t_0 = 15,5$, по осциллограмме 18 мксек).

трансформаторной стороны вентиля; C_a — суммарная междуфазовая емкость; C_b — емкость между анодом и катодом вентиля; C_{κ} — емкость на землю катодного реактора и соединительной проводки между ним и вентиляем.

Схема с нулевым выводом (рис. 5, а). C_{κ} мало. Эквивалентная схема аналогична приведенной на рис. 6, а. Вычислив $Z(p)$ и подставив его в уравнение (7), получим после всех преобразований:

$$e_c = E_m (1 - 0,75 \cos \omega_1 t - 0,25 \cos \omega_2 t), \quad (8)$$

где

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + 3C_b + 3C_{\phi})}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + C_b + 3C_{\phi})}}.$$

Осциллограммы восстанавливающегося напряжения и расчетная кривая для этого случая приведены на рис. 6, б и в.

Полная схема с нулевым выводом. При учете всех емкостей расчет несколько усложняется ввиду нарушения симметрии. Эквивалентная расчетная схема для полной трехфазной схемы с нулевым выводом изображена на рис. 7, а. После преобразования уравнений, составленных для этой схемы, получим окончательно:

$$e_c = \frac{E_m}{2} \cdot \frac{p^4 L^2 q + p^2 L r + 2}{p^6 L^3 s d + p^4 L^2 (d + a s) + p^2 L (a + s) + 1}, \quad (9)$$

откуда получим:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + 3C_{\phi} + C_{\kappa})}},$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{3C_b + 3C_{\phi} + 2C_3 + C_{\kappa} - \sqrt{(3C_b + 3C_{\phi})^2 + C_{\kappa}^2 + 2C_{\kappa} C_b + 2C_{\kappa} C_{\phi}}}{2L(C_3^2 + C_3 C_{\kappa} + 3C_3 C_b + C_{\kappa} C_b + 3C_3 C_{\phi} + C_{\kappa} C_{\phi})}},$$

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{3C_b + 3C_{\phi} + 2C_3 + C_{\kappa} + \sqrt{(3C_b + 3C_{\phi})^2 + C_{\kappa}^2 + 2C_{\kappa} C_b + 2C_{\kappa} C_{\phi}}}{2L(C_3^2 + C_3 C_{\kappa} + 3C_3 C_b + C_{\kappa} C_b + 3C_3 C_{\phi} + C_{\kappa} C_{\phi})}}.$$

Пользуясь теоремой разложения, можно после всех преобразований² получить:

$$e_c = E_m (1 - 0,25 \cos \omega_1 t - B \cos \omega_2 t - D \cos \omega_3 t), \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{2\sqrt{b}(dr - aq) + a(aq - 2dr) + b_q + 8d^2}{(a - \sqrt{b})[2\sqrt{b}(2d - as) + s(3b + 4d - a^2)]}, \\ D &= \frac{2\sqrt{b}(aq - dr) + a(aq + 2dr) + bq + 8d^2}{(a + \sqrt{b})[2\sqrt{b}(as - 2d) + s(3b + 4d - a^2)]}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$a = 3C_b + 3C_{\phi} + 2C_3 + C_{\kappa},$$

$$b = (3C_{\phi} + 3C_b)^2 + C_{\kappa}^2 + 2C_{\kappa} C_b + 2C_{\kappa} C_{\phi},$$

$$d = C_3^2 + C_3 C_{\kappa} + 3C_3 C_b + C_{\kappa} C_b + 3C_3 C_{\phi} + C_{\kappa} C_{\phi},$$

$$q = 2C_3^2 + C_3 C_{\kappa} + 6C_3 C_{\phi} + 3C_3 C_b + 2C_{\phi} C_{\kappa} + C_{\kappa} C_b,$$

$$r = 6C_{\phi} + 3C_b + 4C_3 + C_{\kappa},$$

$$s = C_3 + 3C_{\phi} + C_b.$$

Осциллограммы и расчетная кривая для полной схемы приведены на рис. 7, б и в.

Мостовая схема. При $C_{\kappa} \approx C_b \approx 0$ расчетная схема не отличается от таковой для схемы с нулевым выводом (рис. 6), только в этом случае нейтраль трансформатора не заземляется; может заземляться точка А или В. Эта схема — одночастотная

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + 3C_{\phi})}}.$$

При учете всех емкостей и отсутствии заземления (рис. 5, б) получим эквивалентную схему (рис. 8, а), которая после преобразований приводит к уравнению:

² Выполнены Т. Ф. Самоделкиной.

$$e_c = E_m \frac{1,5p^2L(C_1 + C_2) + 1}{3p^4L^2C_1(2C_2 + C_1) + 2p^2L(C_2 + 2C_1) + 1},$$

где

$$C_1 = C_\phi + C_\phi + \frac{C_3(C_3 + C_\kappa)}{3C_3 + 2C_\kappa},$$

$$C_2 = C_\phi + 2C_\phi + \frac{(C_3 + C_\kappa)^2}{3C_3 + 2C_\kappa}.$$

Решая его, получим:

$$e_c = E_m(1 - 0,75 \cos \omega_1 t - 0,25 \cos \omega_2 t), \quad (12)$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{3L(C_\phi + C_\phi + \frac{C_3(C_3 + C_\kappa)}{3C_3 + 2C_\kappa})}}$,

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + C_\kappa + 3C_\phi + 5C_\phi)}}.$$

На рис. 8 б, в приведены расчетная кривая и осциллограммы для этой схемы при указанных на рисунке параметрах.

При заземлении в мостовой схеме одного полюса на выпрямленной стороне эквивалентная схема аналогична изображенной на рис. 8, а, но дополнительно заземлена точка 2 или 3. Если $C_3 = 0$, схема решается по предыдущему:

$$e_c = E_m(1 - 0,75 \cos \omega_1 t - 0,25 \cos \omega_2 t), \quad (13)$$

где $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{3L(C_\phi + C_\phi)}}$,

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L(2C_\kappa + 3C_\phi + 5C_\phi)}}.$$

При $C_3 \neq 0$, решение несколько усложняется. После всех преобразований получим уравнение:

$$e_c = \frac{E_m}{2} \frac{3p^2L(C_2 + C_3) + 2}{3p^4L^2(C_1C_2 + C_1C_3 + C_2C_3) + 2p^2L(C_1 + C_2 + C_3) + 1}, \quad (14)$$

откуда находим:

$$e_c = \frac{E_m}{2} \left[1 + \frac{3}{4} \frac{(C_2 + C_3)C + C_1C_2 + C_1C_3 - C_2^2 - C_3^2}{C_2 - (C_1 + C_2 + C_3)C} \times \cos \omega_1 t + \frac{3}{4} \frac{-(C_2 + C_3)C + C_1C_2 + C_1C_3 - C_2^2 - C_3^2}{C^2 + (C_1 + C_2 + C_3)C} \cos \omega_2 t \right], \quad (15)$$

где $C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 - C_1C_2 - C_2C_3 - C_1C_3}$,

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2 + C_3 - C}{3L(C_1C_2 + C_2C_3 + C_1C_3)}},$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2 + C_3 + C}{3L(C_1C_2 + C_2C_3 + C_1C_3)}}.$$

Для вентиляй незаземленной группы:

$$C_1 = C_\phi + C_\phi,$$

$$C_2 = C_3 + C_\phi + C_\phi,$$

$$C_3 = C_\kappa + C_3 + C_\phi + 2C_\phi.$$

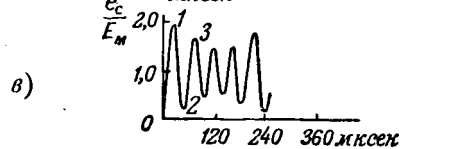
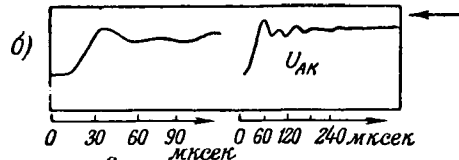
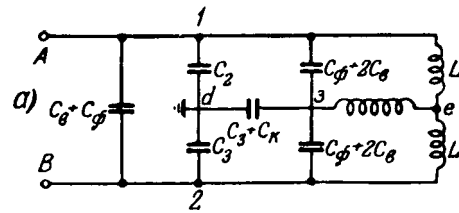


Рис. 8.

а—эквивалентная расчетная схема мостовой схемы без заземления; б—катодные осциллограммы; в—расчетная кривая ($C_\phi = 3000$, $C_\phi = 3000$, $C_3 = 10000$, $C_\kappa = 10000$ пф. По расчету: $t_0 = 24 \mu\text{с}$; $t_{13} = 50$; $t_{25} = 47,5$; $t_{03} = 50$ мксек; $f_1 = 20700$ гц; $f_2 = 17000$ гц. По осциллограмме: $t_0 = 27$, $t_{13} = 43$, $t_{25} = 42$, $t_{03} = 51$ мксек, $f = 22800$ гц).

Для вентиляй заземленной группы:

$$C_1 = C_3 + C_\phi + C_\phi,$$

$$C_2 = C_\phi + C_\phi,$$

$$C_3 = C_\kappa + C_3 + C_\phi + 2C_\phi.$$

Очевидно, при $C_3 = 0$, $C_1 = C_2$ и для обеих групп вентиляй C_1 , C_2 и C_3 одинаковы.

Осциллограммы и расчетные кривые для этой схемы приведены на рис. 9, 10.

При сравнении приведенных выше осциллограмм и расчетных кривых³ следует учитывать, что расчетные кривые строились без учета затухания, которое может существенно влиять на форму результирующей кривой в многочастотной схеме.

В вышеприведенных расчетах предполагалось, что при коммутации все падение напряжения сосредоточено в индуктивности выпрямительного трансформатора. Иначе говоря, предполагалось, что мощность питающей сети велика по сравнению с мощностью выпрямителя. В случае, если индуктивное сопротивление питающей сети и выпрямительного трансформатора соизмеримы, падение напряжения в период коммутации распределяется между трансформатором и питающей сетью, что крайне усложняет расчетную схему.

Если собственная частота питающей сети значительно ниже наименьшей частоты выпрямительной схемы, — что обычно имеет место при понижающих выпрямительных трансформаторах, — можно считать, что собственные частоты восстанавливающегося напряжения определяются од-

³ В построении кривых и экспериментах принимали участие Х. П. Хирвонен, В. М. Рудный, Т. Ф. Самоделкина, М. Б. Бриль.

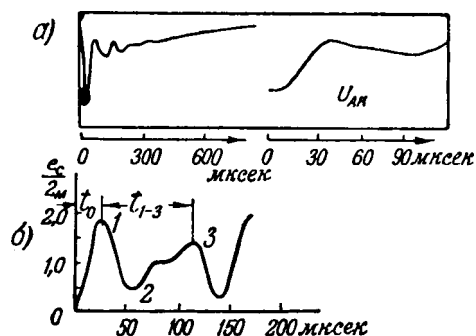


Рис. 9. Мостовая схема с заземлением в точке k_0 (см. рис. 5,в).

а—катодные осциллограммы; б—расчетная кривая ($C_B = 3\ 000$, $C_\Phi = 3\ 000$, $C_3 = 10\ 000$, $C_K = 3\ 000$ пф. По расчету $t_0 = 28,7$, $t_{1-3} = 86$ мксек; по осциллограмме $t_0 = 30,5$, $t_{1-3} = 97$ мксек).

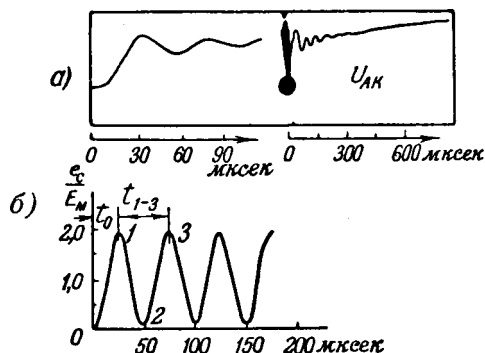


Рис. 10. Мостовая схема с заземлением в точке A_0 (см. рис. 5,в).

а—катодные осциллограммы; б—расчетная кривая (параметры те же, что и для рис. 9. По расчету $t_0 = 25$, $t_{1-3} = 50$ мксек; $f_1 = 14\ 800$, $f_2 = 20\ 400$ гц. По осциллограмме $t_0 = 24,5$, $t_{1-3} = 45$ мксек; $f_1 = 22\ 000$ гц).

ной выпрямительной схемой, но амплитуда уменьшается на величину падения напряжения в питающей сети во время коммутации.

Интересно отметить интерпретацию явления постепенного нарастания напряжения на вентиле, с которым столкнулись Эдвард и Смит [Л. 3] при изучении причин, приводящих к тому, что в схемах с большой индуктивностью срок службы низковольтного тиратрона в десятки раз меньше, чем в схемах без индуктивности. После почти десятилетних исследований они пришли к выводу, что обнаруженный ими по катодным осциллограммам постепенный, а не мгновенный подъем напряжения после гашения дуги в вентилях вызван емкостями рассеяния и потерями в сердечниках различных реактивных схем⁴.

К изложенному ранее можно лишь добавить, что при частотах порядка 50 кгц и выше, которые имели место в этих схемах, сердечники трансформатора практически никакого участия в процессе не принимают, следовательно, никаких потерь вызывать не могут. Более правильно, хотя

и сугубо схематично, интерпретирует этот процесс Рид [Л. 4]. Не давая анализа протекания процесса, Рид лишь указывает, что трансформаторные обмотки, помимо индуктивности рассеяния, имеют и междувитковую емкость. Это обуславливает колебания, определяющие постепенное нарастание напряжения.

Как следует из приведенного выше анализа процесса гашения дуги в вентиле, такое упрощенное представление неполноценно и совершенно недостаточно для того, чтобы охарактеризовать процесс восстановления напряжения. Такой упрощенный подход привел Рида к ошибочным выводам при рассмотрении процесса в начальный период коммутации.

Литература

1. М. М. Акодис. Электричество, № 4, 1941.
2. И. М. Вальтер. О скорости восстановления напряжения на контактах выключателей. Электричество стр. 22, № 22, 1937.
3. D. W. Edwards and S. K. Smith. El. Eng., № 10, 1946.
4. J. Read. Journal of the JEE, № 31, 1945.

⁴ Без анализа явлений. Высказаны лишь указанные выше предположения.



О нормировании восстанавливающегося напряжения

Кандидат техн. наук. Н. Н. ЛИННИЧЕНКО

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Вопрос о нормировании восстанавливающегося напряжения возник одновременно с тем, как выяснилось его значение в процессе отключения.

Вначале предлагали ограничиться установлением одного какого-либо показателя (например, частоты собственных колебаний 5 000 гц или скорости восстановления напряжения — 4 000 в/мксек), пригодного для всех сетей всех напряжений и мощностей. В последних швейцарских нормах дана уже таблица, в которой частоты являются не только функцией напряжения сети, но, грубо, и отключаемой мощности (так, например, при отключении 100% мощности рекомендуется значительно меньшая частота, чем при отключении мощности от 0 до 50%). Если вначале ограничивались только примитивными расчетами, то с течением времени стали предпринимать обширные обследования электрических сетей с целью выяснения происходящих в них процессов восстановления напряжения. Как на примеры таких обследований, можно указать на проведенное в СССР расчетное обследование сети Мосэнерго, на расчетно-экспериментальное обследование британских сетей, проведенное Британской исследовательской ассоциацией [Л. 1], расчетное обследование шести американских систем [Л. 2], обширное расчетно-экспериментальное обследование шведских сетей [Л. 3], обследование голландских сетей, швейцарских сетей [Л. 4] и, наконец, на французские работы [Л. 5] по этому вопросу.

Значительное повышение интереса к процессу восстановления напряжения объясняется поисками более совершенных отключающих аппаратов (новых гасительных камер, новых принципов гашения). Для экспериментальной проверки работы этих новых аппаратов необходимо знание условий восстановления напряжений, с которыми эти аппараты могут встретиться в реальных сетях. Игнорирование вопроса восстановления напряжения может привести к тому, что новые выключатели, дающие прекрасные результаты в лаборатории, не отключат в сети. Примером этого может служить опыт с выключателем ВМГ-22 (Электрические станции, № 8, 1940, Н. Н. Линниченко). С другой стороны, может быть и так, что

Устанавливаются принципы, согласно которым должно производиться нормирование восстановления напряжения и предлагаются основанные на этих принципах нормативы, относящиеся к станционным выключателям.

незнание реальных условий восстановления напряжения заставит конструктора идти на заведомо жесткие условия и вместо легких конструк-

ций выпускать громоздкие аппараты. Все сказанное приобретает особое значение, когда речь идет о внедряемых в настоящее время воздушных выключателях, которые, как известно, особенно чувствительны к условиям восстановления напряжения. На рис. 1 видно, как резко снижается отключаемая мощность с увеличением частоты восстанавливающегося напряжения.

Несмотря на обширность указанных выше обследований, результаты многих из них (например, английских и американских) оказались мало полезными в отношении построения норм, вследствие нецелесообразной методики, положенной в их основу. В них изучались высокие напряжения, какие могут возникать в сетях разных напряжений. Между тем для построения норм интерес представляют восстанавливающиеся напряжения, возникающие в различных условиях отключения коротких замыканий выключателем заданной мощности и напряжения. Чтобы получить ответ на последний вопрос, надо прежде всего установить, в каких схемах возможна работа каждого заданного выключателя и,

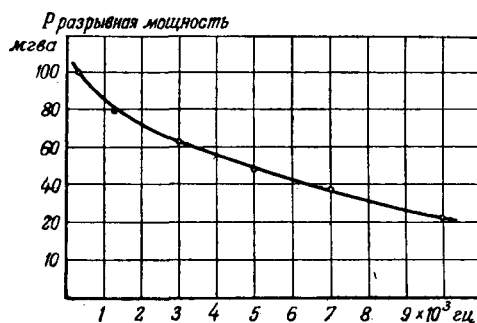


Рис. 1.

затем, уже на базе этих схем нормировать его восстанавливающееся напряжение. Некоторые сдвиги в указанном направлении уже имеются в английской работе 1944 г. [Л. 6] и в шведских и швейцарских

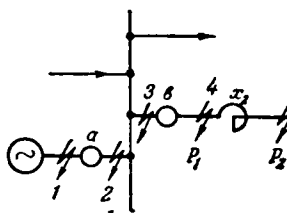


Рис. 2.

работах 1948 г. Однако, значительно ранее и полное, в работе 1940 г., указанный принцип был использован автором настоящей статьи. Эта работа автора не получила освещения в печати в годы войны. В настоящее время интерес к рассматриваемому вопросу сильно возрос и автор счел своевременным опубликовать некоторые результаты указанной работы.

В настоящей статье речь будет идти только о выключателях на генераторные напряжения, т. е. в наших условиях на номинальные напряжения 3; 6; 10,5 и 15,75 кв. В зависимости от разрывной мощности выключатели могут быть разбиты на две группы: 1) выключатели с наибольшей мощностью до 200 мгва — эти выключатели устанавливаются без реакторов, поскольку термическая и динамическая устойчивость сетевой аппаратуры рассчитана на условия, получающиеся при коротких замыканиях мощностью 200 мгва; 2) выключатели с мощностью, превосходящей 200 мгва, — после этих выключателей ставятся реакторы.

Первые выключатели назовем сетевыми, вторые, — станционными. Статья касается только станционных выключателей. На рис. 2 показаны два основных положения станционного выключателя в схеме станции: *a* и *b* (питание через трансформаторы приводит к более легким условиям восстановления напряжения, чем от генераторов, и поэтому здесь не рассматривается) и стрелками — возможные короткие замыкания, которые должны отключать рассматриваемые выключатели. Находясь в положении *a*, выключатель должен отключать короткие замыкания в точках 1, 2 и 3. При коротком замыкании в точке 1 выключатель *a* отключает наибольшую мощность короткого замыкания, равную той мощности, на которую он рассчитан. Однако, отключение этой мощности происходит при легких условиях восстановления напряжения, поскольку в этом случае параллельно к выключателю подключена огромная емкость шин станции с отходящими от них питательными линиями. При коротких замыканиях в точках 2 и 3, отключаемая мощность равна мощности короткого замыкания только одного генератора. Однако, в случае короткого замыкания в точке 2 отключение происходит в чрезвычайно жестких условиях, поскольку восстанавливаемое напряжение определяется в этом случае только собственной емкостью генератора и короткого отрезка шин, соединяющих генератор с выключателем. Но особенно жесткие условия восстановления напряжения получаются при положении выключателя в точке *b* и отключении короткого замыкания в точке 5, хотя отключаемая мощность при этом будет наименьшая вследствие токоограничивающего действия реактора. Таким образом, мы можем принять, что только два случая — 1) отключение короткого замыкания в точке

5 при положении *b* и 2) отключение короткого замыкания в точке 2 при положении *a* — являются определяющими и подлежат нормированию. Случай отключения полной мощности (отключение короткого замыкания в точке 1 выключателем в положении *a*) не подлежит нормированию, так как оно происходит в чрезвычайно благоприятных условиях восстановления напряжения.

Рассмотрим напряжение, получающееся при отключении выключателем *b* короткого замыкания в точке 5. Оно, очевидно, будет состоять из двух колебаний: 1) быстрого — обусловленного индуктивностью реактора и незначительной емкостью, существующей между реактором и контактами выключателя, 2) значительно более медленного, обусловленного индуктивностью электростанции и ее опромной емкостью. Вследствие этого мы вправе ограничиться изучением одних только быстрых колебаний, так как практически рост восстанавливаемого напряжения будет определяться только ими.

При заданной разрывной мощности выключателя P_1 , т. е. при заданной максимально допустимой мощности короткого замыкания в точке 4— P_1 (пусть x_1 будет реактивное сопротивление станции, соответствующее этой мощности), частота и амплитуда быстрых колебаний будут зависеть от реактивного сопротивления реактора x_2 и соответствующей ему мощности короткого замыкания P_2 . Очевидно, что при увеличении x_2 амплитуда изучаемых колебаний $2A_6$ и время τ , в течение которого достигается эта амплитуда, будут увеличиваться. Нас будет интересовать закон этого увеличения при изменении x_2 от 0 (когда $P_2 = P_1$) до ∞ (когда $P_2 = 0$). Принимая амплитуду восстанавливаемого напряжения, равной единице, мы можем для суммы амплитуд быстрого и медленного колебания написать:

$$A_n + A_6 = 1.$$

С другой стороны, так как быстрый и медленный колебательные контуры, вследствие большой емкости станции, можно считать независимыми, то $\frac{A_n}{A_6} = \frac{x_1}{x_2}$, откуда $2A_6 = \frac{2x_2}{x_1 + x_2}$. (1)

Далее, вспоминая известную формулу частоты, можем написать, что

$$\tau = k \sqrt{x_2 c}, \quad (2)$$

где k — некоторая постоянная.

Определяя из (2) x_2 и подставляя в (1), получим

$$2A_6 = 2 \frac{\tau^2}{x_1/k_1 + \tau^2}, \quad (3)$$

где в x_1/k_1 заключены конкретные параметры изучаемой цепи. Чтобы их исключить, примем условно

$$2A_6 = 1 \text{ при } \tau = 1,$$

поскольку нас будет интересовать только характер функциональных зависимостей, а не абсолютные величины.

Тогда

$$2A_6 = \frac{2\tau^2}{1 + \tau^2} \quad (4)$$

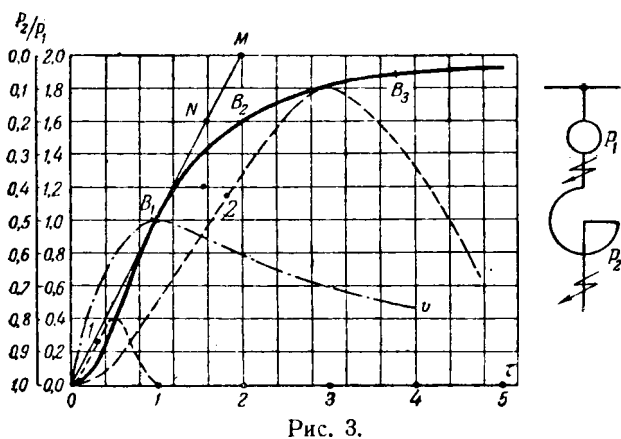


Рис. 3.

и скорость восстановления напряжения

$$v = \frac{2A_0}{\tau} = \frac{2\epsilon}{1 + \epsilon^2} \quad (5)$$

На рис. 3 даны кривые, соответствующие этим формулам. Особый интерес представляет сплошная кривая, которая является геометрическим местом вершин всех теоретически мыслимых волн восстановления напряжения (спектра) на контактах выключателя. Ординаты точек этой кривой дают амплитуды напряжения, а угловые коэффициенты секущих — скорости восстановления напряжения. Из кривых видно, что с уменьшением P_2/P_1 с 1 до 0,5 скорость восстановления напряжения (пунктирная кривая) растет с увеличением амплитуды; в точке, соответствующей $P_2/P_1=0,5$, скорость восстановления напряжения достигает максимума v_{\max} , и при дальнейшем уменьшении P_2/P_1 амплитуда продолжает увеличиваться, а скорость падает, так, например, при $P_2/P_1=0,02$ амплитуда достигает 98% максимально возможной, а скорость становится в 3,6 раза меньше максимальной. Это очень интересное обстоятельство, показывающее, что в этом простейшем случае одночастотного контура с реактором возможны разные режимы: режим с большой скоростью восстановления напряжения и малой амплитудой и режим с малой скоростью и большой амплитудой. Определение того, какой из этих режимов будет более тяжелым для выключателя, зависит от типа выключателя и величины отключаемой им мощности. На рис. 4 показан случай (кривая восстанавливающегося напряжения 1), когда повторное зажигание дуги в выключателе вызвала волна напряжения с меньшей скоростью и большей амплитудой, и случай (кривая 2), когда то же произошло при меньшей амплитуде, но большей скорости. Поэтому правильнее всего будет, если мы не ограничимся указанием частоты или скорости восстановления напряжения, как это всегда делается, а выясним, каким конкретно волнам восстанавливающегося напряжения подвержен выключатель заданной мощности при всех возможных режимах его работы. При этом наша задача сведется к тому, чтобы на слектре волн восстанавливающегося напряжения (сплошная кривая рис. 3), выделить полосу (например, $B_1 - B_2$), соответствующую

каждому заданному выключателю.

В приведенной табл. 1 произведено такое выделение: в рубрике «режим с максимальной скоростью восстановления напряжения» даны левые точки полос (B_1), в рубрике «режим с максимальной амплитудой» — правые (B_2). Выделение производилось с помощью шкалы P_2/P_1 (шкала P_2/P_1 , слева рис. 3). P_1 это заданные мощности выключателей — 300, 500, 1 000, 1 500 мвга, P_2 — мощности, получающиеся в результате реактирования. Верхний предел P_2 определяется устойчивостью существующей аппаратуры и равен 200 мвга, нижний — определяется реактором с наибольшим индуктивным сопротивлением.

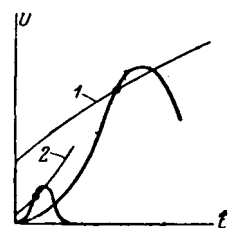


Рис. 4.

По соображениям удобства регулирования на электростанциях все реакторы выбираются с одинаковой процентной реактивностью, и очевидно, что наибольшую индуктивность будет иметь реактор на самый малый ток. Самый малый ток бетонных реакторов (исключительно применяемых на электростанциях) равен 150 а. Принимая реактивное сопротивление 6%, как наибольшее, применяемое на электростанциях, получим мощность короткого замыкания, ограниченную реактором РБ6-150-6, равной 22,5 мвга. Мы приняли 25 мвга в качестве нижнего предела мощности короткого замыкания как в сетях 6, так и 10 кв, имея в виду, что здесь важен только порядок этой мощности, а не точное ее значение.

Таблица 1

Разрывная мощность выключателя, мвга	Режим с максимальной скоростью восстановления напряжения				Режим с максимальной амплитудой	
	без учета шинно-соединительных выключателей		с учетом шинно-соединительных выключателей		Максимальная амплитуда, 2 А макс	v при 2 А макс, в/мксек
	максимальная скорость, в/мксек	2 А при v макс	максимальная скорость, в/мксек	2 А при v макс		
1	2	3	4	5	6	7
300	3 200 (150)	0,33	3 200 (150)	0,33	0,61	1 750 (25)
500	4 100 (200)	0,40	4 200 (250)	0,33	0,63	1 800 (25)
1 000	4 750 (200)	0,53	5 800 (400)	0,40	0,65	1 800 (25)
1 500	4 950 (200)	0,58	6 650 (450)	0,47	0,65	1 870 (25)

Примечания: 1. Цифры в скобках — мощности, при отключении которых подсчитаны данные скорости.
2. При подсчетах столбцов 2 и 3 исходной была мощность $P_2 = 200$ мвга; 4 и 5 — реактор РБ 10-30С0-8; 6 и 7 — $P_2 = 25$ мвга.
3. Амплитуды выражены в долях номинальной амплитуды восстанавливающегося напряжения

$$2 \cdot 0,5 \frac{U_N}{\sqrt{2}} = 2,45 U_N$$

Соответственно найденным пределам изменения реактированной мощности получим пределы изменения реактирования:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{200}{P_1} \dots P_1$$

Пользуясь последними цифрами, определяем предельные значения скоростей и амплитуд по рис. 3 или по формулам (см. приложение):

$$v = 375 \sqrt{P_1} \cdot \sqrt{\frac{P_2}{P_1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)}, \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right). \quad (7)$$

Последняя формула дает амплитуду в долях номинальной амплитуды восстанавливающегося напряжения, которая принята равной

$$A_n = 1,5 \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot 2 = 2,45 U_n, \quad (8)$$

где U_n — номинальное напряжение сети.

В результате применения указанных данных и получены цифры столбцов 2, 3, 6 и 7 табл. 1.

Исключение представляет только выключатель с $P_1=300$ мгва, у которого верхний предел P_2 взят 150, а не 200 мгва, потому что максимум скорости восстановления напряжения получается для него при $P_2=150$ мгва. У остальных выключателей максимум скорости восстановления напряжения может получиться только при мощностях короткого замыкания, больших, чем 200 мгва. Поэтому при работе выключателей на питательную линию на них никогда не может получиться максимум, но каждый из этих выключателей может работать в качестве шинно-соединительного.

При этом мощности короткого замыкания могут получаться больше 200 мгва. Выясним предел могущих здесь получиться мощностей. Для этого, очевидно, надо выбрать реактор с наименьшим индуктивным сопротивлением, т. е. с наибольшим номинальным током и наименьшей реактивностью. Таким реактором можно считать РБ10-3000-8. Номинальная пропускная мощность этого реактора равна 52 мгва. Реактивирование, обуславливаемое этим реактором в случае, например, выключателя с $P_1=1500$ мгва, определяется следующим образом. Реактивность сети, отнесенная к номинальной мощности реактора. $x_1 = 100 \cdot \frac{52}{1500} = 3,47\%$; отсюда искомое реактивирование $\frac{P_2}{P_1} = \frac{3,47}{3,47+8} = 0,3$. Этому реактивированию соответствует $P_2=450$ мгва.

Данные столбцов 4 и 5 табл. 1. получены, исходя из реактивирований, подсчитанных указанным образом.

Сравнивая столбцы 4 и 2, видим, что учет шинно-соединительных выключателей имеет значение для выключателей 1000 и 1500 мгва и выражается в довольно значительном повышении скорости восстановления напряжения.

По поводу этого обстоятельства надо иметь в виду следующее. Если в качестве предельного реактора мы зададимся реактором РБ-1500-10, то в случае выключателя 1000 мгва получатся одинаковые скорости восстановления напряжения как с учетом, так и без учета шинно-соединительного выключателя, в случае же выключателя 1500 мгва — почти одинаковые скорости восстановления (5100 и 4950).

Таким образом, большие скорости восстановления напряжения обусловлены реакторами на токи выше 1500 а при реактивности меньше 10%. Но реакторы на такие параметры изготавливаются по специальному заказу и число их измеряется немногими единицами. Вполне естественно отказаться от учета этих реакторов. Более целесообразно в таких редких случаях идти на снижение скорости восстановления напряжения путем специальных дополнительных средств (емкостей или шунтирующих сопротивлений), связанных или не связанных с выключателями.

Перейдем к рассмотрению второго определяющего случая — отключения короткого замыкания в точке 2 выключателем, находящимся в положении а. Параметры восстанавливающегося напряжения, получающегося в этом случае, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность генератора, мгва	Мощность короткого замыкания на зажимах генератора через $t=0,1$ сек, мгва	Частота восстанавливающегося напряжения гц	Амплитуда восстанавливающегося напряжения		Скорость восстановления восстанавливающегося напряжения, в/мксек
			кв	*	
25	175	$7,7 \cdot 10^3$	25,8	1	400
50	350	$10 \cdot 10^3$	25,8	1	500
100	700	$10 \cdot 10^3$	38,6	1	700

* Доли номинальной амплитуды $2,45 U_n$.

При составлении табл. 2 предполагалось, что короткое замыкание происходит непосредственно на зажимах генераторов, что соответствует действительности, поскольку на современных электростанциях стремятся выключатели размещать возможно ближе к генераторам и соединять их шинами. Подсчеты показывают, что емкостью этих шин можно пренебречь по сравнению с емкостью обмотки генератора. Частоты восстанавливающегося напряжения подсчитывались по формулам, предложенным Парком и Скитсом, внесением поправок на разницу в окружных скоростях роторов между нашими и американскими генераторами. Амплитуды восстанавливающегося напряжения подсчитывались по следующей формуле:

$$A = k_g k_q m \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cdot \sin \varphi,$$

где k_g — коэффициент, зависящий от способа зануления генератора; при высоком сопротивлении зануления наших генераторов $k_g=1,5$;

$k_q = \frac{x_q''}{x_d''}$ — отношение сверхпереходных поперечного и продольных реактивных сопротивлений;

$m = \frac{I_{0,1}}{I_0}$ — отношение тока короткого замыкания через 0,1 сек к начальному току короткого замыкания.

Пользуясь данными наших руководящих указаний [Л. 7], легко подсчитать, что для турбогенераторов $k_q \cdot m \approx 1$; φ — угловое смещение между нулями тока и напряжения, зависящее от апериодической составляющей; при коротком замыкании через 0,1 сек апериодическая составляющая оказывает на процесс уже незначительное влияние, так что можно положить $\sin \varphi = 1$.

В результате амплитуда восстанавливающегося напряжения $2A = 1,15 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2} = 2,45 U_n$.

Мощность короткого замыкания подсчитывалась для 0,1 сек после начала короткого замыкания. По сравнению с табл. 1 в табл. 2 мы имеем существенно новые условия восстановления напряжения: значительно большие амплитуды при значительно больших мощностях, но малые скорости восстановления напряжения. При решении вопроса о нормировании этих условий следует учесть, что количество работающих в таких условиях выключателей составляет лишь долю процента от общего числа станционных выключателей. Поэтому, если бы встретились какие-либо затруднения с удовлетворением этих условий, от них легко можно отказаться, предложив установку добавочных емкостей, облегчающих условия восстановления напряжения. Это еще в большей степени относится к выключателям с гидрогенераторами, число которых еще меньше. Особенно неблагоприятные условия восстановления напряжения в отношении величины амплитуды получения у выключателей с гидрогенераторами без демпферных обмоток, однако наблюдается тенденция отказа от таких гидрогенераторов. Поэтому было бы неправильно их учитывать при составлении норм.

Заключение. 1. В результате анализа условий, в которых работают станционные выключатели, выяснилось, что эти выключатели обязательно должны удовлетворять условиям табл. 1 (кроме столбцов 4 и 5); что касается условий столбцов 4 и 5 табл. 1 и табл. 2, то они не являются обязательными, поскольку они встречаются с немногими случаями, для которых следует разработать специальные рекомендации по установке добавочных емкостей.

2. По сравнению с прежними (иностранными) работами по нормированию восстановления напряжения настоящая работа имеет следующие преимущества: а) в ней даны схемы определяющие восстанавливающееся напряжение для выключателя каждого размера, б) даны полные характеристики (амплитуда восстанавливающегося напряжения, частота восстанавливающегося напряжения, мощность короткого замыкания, при которых происходит восстановление напряжения) возможных форм восстанавливающегося напряжения для выключателя каждого размера.

Следует отметить, что кроме полноты характеристики восстанавливающегося напряжения весьма важно указание схем и размеров выключателей. Указание схемы при наличии статистических данных позволяет принять то или иное решение в отношении самого выключателя или рекомендаций по его монтажу (таким образом, статистические данные бесплодны без знания схем). Указание размера выключателя важно потому, что одна и та же мощность может отключаться с разными восстанавливающимися напряжениями в зависимости от размера выключателя. Работы иностранных авторов по восстановлению напряжения, представленные на Международной

конференции (1948 г.), отличаются некоторым продвижением вперед по сравнению с их прежними работами; однако ни одна из них еще не учитывает необходимости указания конкретных схем и размеров выключателей, о которых идет речь, почему и ценность выполненных ими работ в отношении нормирования — относительна.

Приложение. *Колебательный контур, получающийся при отключении реактированного трехфазного короткого замыкания.* На рис. 5 показан этот контур для случая гашения дуги на первой фазе, при котором получаются наиболее жесткие условия восстановления напряжения. Мы уже указывали, что большая емкость C_0 , связанная с шинами станции, практически исключает влияние на восстановление напряжения колебаний на индуктивности станции. Благодаря этому амплитуда восстанавливающегося напряжения уменьшается до $(1 - \frac{P_2}{P_1})$

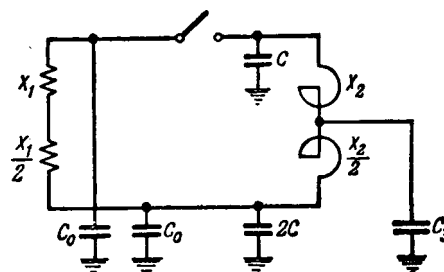


Рис. 5.

доли своей номинальной величины (8) [последнее выражение получается из (1) и соотношения $\frac{x_1}{x_1 + x_2} = \frac{P_2}{P_1}$].

Но амплитуда восстанавливающегося напряжения уменьшается еще больше, благодаря емкости C_3 — емкости линии за местом короткого замыкания на землю (нами рассматривается худший случай, когда короткое замыкание не сопровождается заземлением). В конкретных станционных схемах эта емкость значительно превосходит емкость C , имеющуюся между выключателем и реактором; благодаря этому колебания контура $\frac{x_2}{2}$, C_3 получают значительно более медленными, чем x_2 , C , и их влиянием на восстанавливающееся напряжение тоже можно пренебречь. В результате для амплитуды получается формула (7), а для скорости:

$$v = \frac{A_n A_0}{\tau} = \frac{2,45 U_n \frac{2}{3} (1 - \frac{P_2}{P_1})}{\pi \sqrt{\frac{x_2}{314} \cdot C}}$$

или, подставляя сюда $V_{x_2} = U_n \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 P_2}}$,

$$\text{получим: } v = \frac{9,2}{\sqrt{C}} \cdot \sqrt{P_1} \sqrt{\frac{P_2}{P_1} (1 - \frac{P_2}{P_1})} \cdot 10^{-3} [\text{в/мксек}].$$

Как показали измерения, произведенные автором на электростанции, можно положить $C = 600 \cdot 10^{-12} \text{F}$. При этом и получится формула (6).

Литература

1. L. Gosland. JEE № 519, 1940.
2. H. P. St. Clair, J. A. Adams. El. Eng. № 9, 1942.
3. P. E. Hammarlund and O. Johnnes. CIGRE, доклад 107, 1948.
4. H. Purpikofe, Jnillard. CIGRE, доклад 138, 1948.
5. Н. Н. Линниченко. О нормировании скорости восстановления напряжения. Электричество, стр. 76, № 1, 1948.
6. I. A. Harle, R. W. Wild: JEE, 1944.
7. Н. Г. Гейнин, Б. И. Розенберг и С. А. Ульянов. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания. Госэнергоиздат, 1944.

Графоаналитический метод определения электродинамических усилий в высоковольтных аппаратах

Инж. Г. Б. ХОЛЯВСКИЙ

Завод „Электроаппарат“

При расчетах электродинамических усилий в высоковольтных аппаратах обычно приходится определять усилия в одновитковых контурах, форма которых еще усложняется в зависимости от подвода тока, положения подвижных токоведущих частей и т. п. Известные методы определения электродинамических усилий [Л. 1—3] в основном применимы для участков правильной формы, для контуров же неправильной формы удобнее всего строить графически распределение усилий вдоль рассматриваемых участков вследствие воздействия на них остальных участков контура.

Суммарное усилие на контур 1 от контура 2:

$$F_{1/2} = 1,02 \cdot 10^{-8} i_1 i_2 k_{1/2} \text{ кг}, \quad (1)$$

где i_1, i_2 — токи соответственно в контуре 1 и 2; $k_{1/2}$ — безразмерный коэффициент (коэффициент контура), не изменяющийся при подобном изменении всех размеров контуров и расстояний между ними.

При

$$i_1 = i_2 = i, \quad F_{1/2} = 1,02 \cdot 10^{-8} i^2 k_{1/2}. \quad (1')$$

При токе $i = 9990 \text{ а} \approx 10 \text{ ка}$ $k_{1/2} = F_{1/2}$, т. е. коэффициент контура численно равен усилию в килограммах при токе 10 ка.

При токе i (килоамперы)

$$F = k \left(\frac{i [\text{ка}]}{10} \right)^2 \text{ кг}. \quad (1'')$$

Обычно при расчете контур разбивают на отдельные прямолинейные участки, причем усилие на 1 см длины в какой-либо точке контура M_x от воздействия некоторого прямолинейного участка:

$$f = 1,02 \cdot 10^{-8} i^2 q_x [\text{кг/см}], \quad (2)$$

где

$$q_x = \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{h_x}; \quad (2')$$

Для определения электродинамических усилий в высоковольтных аппаратах и элементах распределительных устройств с учетом их конфигурации требуется определение безразмерных коэффициентов (коэффициентов контура), зависящих только от взаимного расположения отдельных участков. Приводимые в статье методы графической интерпретации дают возможность значительно упростить определение коэффициентов контура для важнейших практических случаев расположения участков.

здесь α_1 и α_2 — углы между воздействующим отрезком и лучами к его концам, а h_x [см] — длина перпендикуляра из точки M_x на отрезок.

Определение q_x легко производится или вы-

числением (причем удобно применить транспортир, проградуированный непосредственно на косинусы углов) или же чисто графически, как показано на рис. 1, где отрезок EF при произвольно выбранной единице масштаба m [см] и при отношении размеров действительной конструкции к размерам чертежа n равен

$$EF = \frac{m^2}{n} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{h_x} = \frac{m^2}{n} q_x,$$

как нетрудно вывести из построений рис. 1.

Общий коэффициент контура некоторого участка длиной l от воздействия другого участка

$$k = \int_0^l q_x dx,$$

причем величина k уже не зависит, как это легко показать, ни от m , ни от n . Получение кривой распределения усилия вдоль отрезка позволяет графически определить и суммарное усилие и точку его приложения.

Однако чаще всего при расчетах непосредственно вычисляют суммарные силы на отдельные участки контура, пользуясь приводимыми в литературе [Л. 1—3] аналитическими выражениями для случаев простейших расположений участков. Эти формулы различны для каждого варианта расположения и обычно состоят из нескольких отдельно вычисляемых членов. Для вычисления применяют графики аналитических выражений в зависимости от соотношения геометрических размеров участков, но при сложении или вычитании отдельных членов формул точность ре-

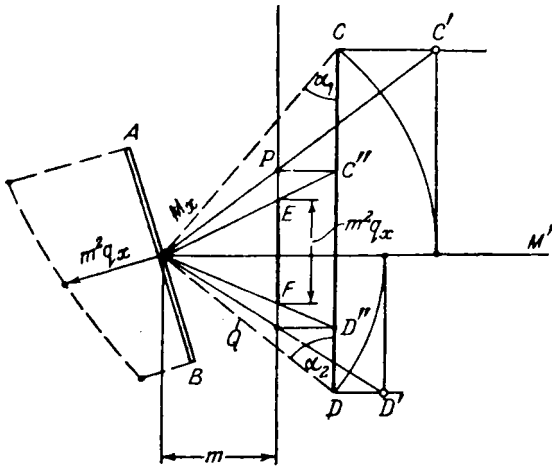


Рис. 1.

зультата несколько снижается вследствие суммирования ошибок.

В наиболее простом случае параллельных отрезков определение коэффициентов контура для различных расположений (рис. 2) можно свести к определению суммы или разности коэффициентов между равными и противостоящими друг другу участками.

Обозначим равные и взаимнопротивостоящие отрезки одинаковыми цифрами без штриха и соответственно со штрихом, и в индексе над чертой будем помещать номер подвергающегося усилению, а под чертой — воздействующего отрезка. Используя справедливое для параллельных отрезков правило о равенстве коэффициентов контура при перестановке местами подвергающегося усилению и воздействующего отрезков и обозначая для сокращения коэффициенты контуров непосредственно их индексами, получим коэффициенты контура для расположения рис. 2, а:

$$12/1'2' = 1/1' + 2/2' + 1/2' + 2/1' = 1/1' + 2/2' + 2(1/2'),$$

откуда

$$1/2' = 0,5(12/1'2' - 1/1' - 2/2'). \quad (3)$$

Аналогично для расположения рис. 2, б

$$12/2'3' = 0,5(123/1'2'3' - 1/1' - 3/3' + 2/2') \quad (3')$$

и для рис. 2, в:

$$1/3' = 0,5(123/1'2'3' - 12/1'2' - 23/2'3' + 2/2'). \quad (3'')$$

Коэффициент контура для двух равных и противостоящих параллельных отрезков определяется интегрированием выражения для нагрузки на единицу длины подвергающегося усилению отрезка вдоль всей его длины l :

$$\begin{aligned} k &= \int_0^l \frac{dk}{dx} dx = \int_0^l \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{h} dx = \\ &= \frac{1}{h} \left[\int_0^l \frac{x dx}{\sqrt{x^2 + h^2}} + \int_0^l \frac{(l-x) dx}{\sqrt{(l-x)^2 + h^2}} \right] = \\ &= \frac{\sqrt{l^2 + h^2} - h}{h}. \end{aligned} \quad (4)$$

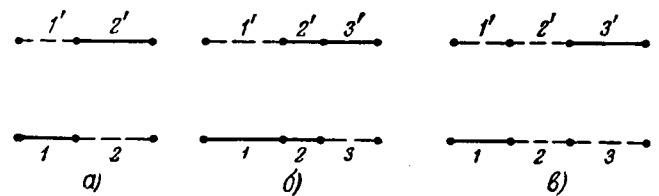


Рис. 2.

Это выражение часто пишут в виде:

$$\begin{aligned} k &= \frac{l}{h} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} - \frac{h}{l} \right) = \\ &= \frac{l}{h} \cdot f\left(\frac{h}{l}\right) \end{aligned} \quad (4')$$

и дают график $f\left(\frac{h}{l}\right)$. Несмотря на простоту выражений (4) и (4'), процесс вычисления $\frac{h}{l}$ и $f\left(\frac{h}{l}\right)$

довольно кропотлив и связан с суммированием неточностей при определении отдельных слагаемых. Поэтому целесообразно найти более простой путь определения коэффициентов контура. Рассмотрим случай двух параллельных отрезков неравной длины, конец первого из которых находится против начала второго (рис. 3, а). Коэффициент контура для воздействия на отрезок AB отрезка CD , который можно разбить на части $ED = AB = l_1$ и $CE = l_2$,

$$k_{AB/CD} = k_{AB/ED} + k_{AB/CE}.$$

На основании (3) и (4):

$$k_{AB/CD} = \frac{\sqrt{l_1 + h^2} + \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + h^2} - \sqrt{l_2^2 + h^2} - h}{h}. \quad (5)$$

Последнее выражение имеет определенный геометрический смысл. Члены числителя являются диагоналями (d_1 и d_2) или боковыми сторонами (s_1 и s_2) трапеции, другими двумя сторонами которой являются рассматриваемые отрезки AB и CD . Как видно из рис. 3, а:

$$k_{AB/CD} = \frac{AD + BC - AC - BD}{h} = \frac{(d_1 + d_2) - (s_1 + s_2)}{h}, \quad (6)$$

т. е. коэффициент контура параллельных отрезков равен отношению разности между суммой диагоналей и суммой боковых сторон построенного на этих отрезках четырехугольника к расстоянию между отрезками.

В общем случае, если конец и начало параллельных отрезков не находятся друг против друга (рис. 3, б):

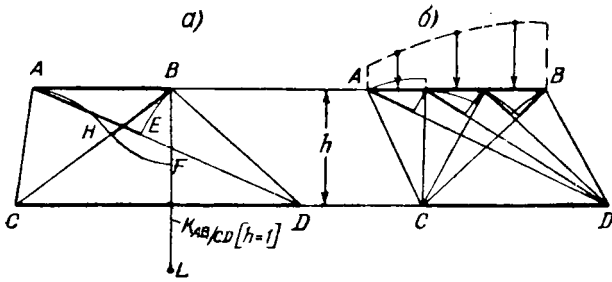


Рис. 4.

$$\begin{aligned}
 AB|CD &= AB/CF - AB/DF = \\
 &= \frac{(AF + BC - AC - BF) - (AF + BD - AD - BF)}{h} = \\
 &= \frac{(AD + BC) - (AC + BD)}{h} = \frac{(d_1 + d_2) - (s_1 + s_2)}{h},
 \end{aligned}$$

т. е. правило (6) остается справедливым.

Очевидно, что это простое и легко запоминаемое правило дает значительно более быстрый путь определения коэффициента контура любых параллельных отрезков, чем использование формул (3), (3'), (3'') совместно с уравнением (4). Числитель формулы (6) легко может быть определен и графически, как это показано на рис. 4,а для общего коэффициента контура

($k_{AB|CD} = \frac{AE + BH}{h} = \frac{BL}{h}$) и на рис. 4,б для нахождения распределения усилий по длине отрезка.

В случае непараллельных отрезков соотношения усложняются, однако и здесь можно найти определенные закономерности в их составлении. Для лежащих в одной плоскости перпендикулярных отрезков — в наиболее общем случае — двух конечных отрезков с длинами l_1 и l_2 (рис. 5), начала которых отстоят на некоторых расстояниях (a и, соответственно, b) от точки O пересечения направлений отрезков, формула для коэффициента контура имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 k_{1/2} &= \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + (a + l_1)^2}}{b + \sqrt{b^2 + a^2}} - \\
 &- \ln \frac{l_2 + b + \sqrt{(l_2 + b)^2 + (l_1 + a)^2}}{l_2 + b + \sqrt{(l_2 + b)^2 + a^2}}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Иначе

$$k_{1/2} = \ln \frac{d_1 + d_{12}}{s_1 + s_{12}} - \ln \frac{s_2 + s_{22}}{d_2 + d_{22}}, \quad (8)$$

где d_1 и d_2 и s_1 и s_2 — диагонали и боковые стороны четырехугольника, построенного на рассматриваемых отрезках;

d_{12} , d_{22} , s_{12} и s_{22} — проекции соответствующих диагоналей и боковых сторон на направленные воздействующего отрезка 2.

Уравнение (8) можно переписать следующим образом:

$$k_{1/2} = [\ln(d_1 + d_{12}) + \ln(d_2 + d_{22})] -$$

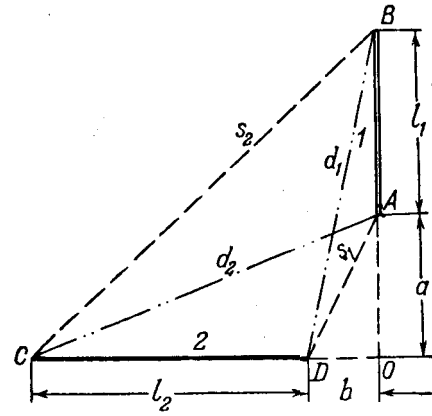


Рис. 5.

$$\begin{aligned}
 &- [\ln(s_1 + s_{12}) + \ln(s_2 + s_{22})] = \\
 &= \ln \frac{(d_1 + d_{12})(d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12})(s_2 + s_{22})}. \quad (8')
 \end{aligned}$$

Условимся называть сумму диагоналей или сторон с их проекциями „дополненными диагоналями“ или соответственно „дополненными сторонами“ четырехугольника. Тогда можно формулировать следующее правило:

Коэффициент контура любых перпендикулярных отрезков, лежащих в одной плоскости, равен разности натуральных логарифмов дополненных диагоналей и дополненных боковых сторон построенного на этих отрезках четырехугольника или, еще проще, равен натуральному логарифму отношения произведения дополненных диагоналей к произведению дополненных боковых сторон.

Из (8') нетрудно определить значение коэффициента контура перпендикулярных отрезков полуграфическим путем непосредственно из чертежа, как это видно из построений на рис. 6. Здесь BF и LF равны дополненным диагоналям, а KE и BE — дополненным сторонам.

Провода LM параллельно FE , делим BE в отношении $\frac{LF}{BF}$.

Имеем

$$\frac{ME}{KE} = \frac{BE}{KE} \cdot \frac{LF}{BF} = \frac{(d_1 + d_{12})(d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12})(s_2 + s_{22})}$$

и

$$k_{1/2} = \ln \frac{ME}{KE}.$$

При удалении точки A в бесконечность

$$k_{1/2} = \ln \frac{CE}{KE}.$$

Для получения распределения силы вдоль отрезка надо разбить его на несколько частей и определить значения коэффициента контура для отдельных участков.

В случае взаимодействия перпендикулярных отрезков, не лежащих в одной плоскости, для двух отрезков AO' и CO'' (рис. 7,а), начала которых лежат на линии OO' , представляющей кратчайшее расстояние между

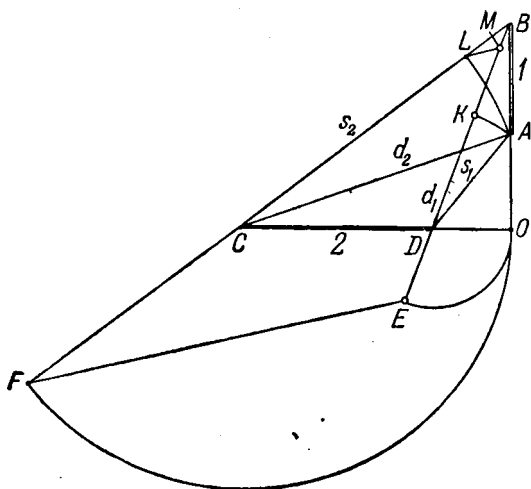


Рис. 6.

направлениями этих отрезков, коэффициент контура

$$k_{AO/CO'} = \ln \frac{(\sqrt{(h+L_1)^2} (L_2 + \sqrt{h^2 + L_2^2}))}{(L_2 + \sqrt{L_1^2 + h^2 + L_2^2}) h} =$$

$$= \ln \frac{AO' (CO + CO')}{(AC + CO) OO'} = \ln \frac{d_1 (d_2 + d_{22})}{(s_2 + s_{22}) s_1} \quad (8'')$$

Выражение (8'') вполне аналогично формуле (8') с той разницей, что здесь мы имеем дело с пространственным четырехполюсником $OACO'$, построенным на отрезках AO' и CO' . При этом началами отрезков надо считать точки, расположенные на линии OO' (кратчайшем расстоянии между направлениями отрезков, диагоналями — линии, соединяющие начала и концы отрезков, а сторонами — линии, соединяющие два начала или два конца. К диагоналям и к сторонам добавляются их проекции на воздействующий отрезок 2 (в данном частном случае для $AO' = d_1$ и $OO' = s_1$ эти проекции равны нулю).

Общий случай взаимодействия двух конечных перпендикулярных отрезков AB и CD , не лежащих в одной плоскости (рис. 7, б), можно свести к предыдущему случаю, если учесть, что

$$AB/CD = AB/CO' - AB/DO' = BO/CO' -$$

$$- AO/CO' - BO/DO' + AO/DO'.$$

Подставляя выражения для отдельных коэффициентов и производя сокращения, получаем:

$$AB/CD = \ln \frac{(BD + DO')(AC + CO')}{(AD + DO')(BC + CO')} =$$

$$= \ln \frac{(d_1 + d_{12})(d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12})(s_2 + s_{22})}.$$

Следовательно, для всех возможных расположений перпендикулярных отрезков, лежащих как в одной, так и в разных плоскостях, коэффициент контура равен натуральному логарифму отно-

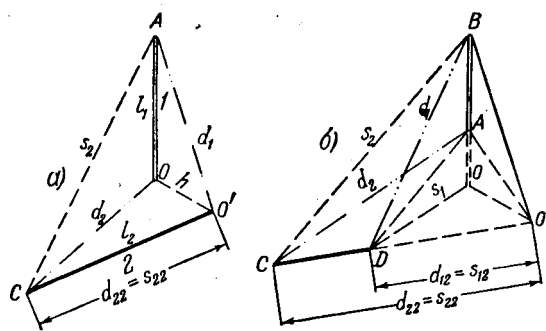


Рис. 7.

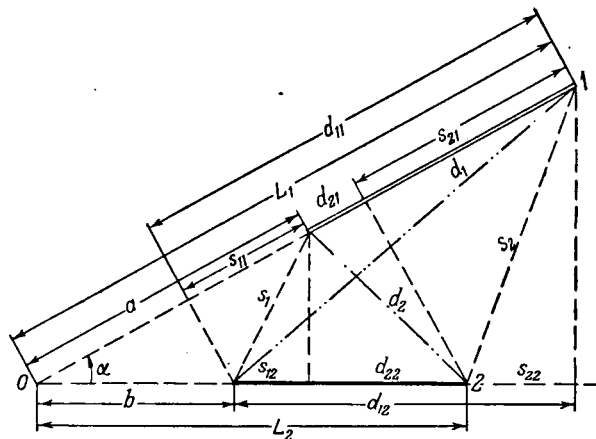


Рис. 8.

шения произведений дополненных диагоналей и дополненных сторон.

В случае выхода рассматриваемых перпендикулярных отрезков за пределы одного пространственного квадранта указанную формулу надо применять отдельно для каждого пространственного квадранта.

Для отрезков, лежащих в одной плоскости под углом α друг к другу, формулы для коэффициента контура становятся громоздкими и в них входят тригонометрические функции угла α . Тем не менее геометрическая интерпретация и в этом случае дает определенные правила составления формул для любых расположений наклонных отрезков.

Для общего случая расположения двух неравных отрезков 1 и 2 под углом α друг к другу (рис. 8) формула для коэффициента контура имеет следующий вид:

$$k_{1/2} = \frac{1}{\sin \alpha} \left[f_1 \left(\frac{L_1}{a} \right) + f_1 \left(\frac{a}{L_2} \right) - f_1 \left(\frac{L_1}{L_2} \right) - f_1 \left(\frac{a}{b} \right) \right], \quad (9)$$

где

$$f_1(x) = \ln [1 - x \cos \alpha + \sqrt{1 - 2x \cos \alpha + x^2}] +$$

$$+ \cos \alpha \ln \frac{x - \cos \alpha + \sqrt{1 - 2x \cos \alpha + x^2}}{1 - \cos \alpha}.$$

Формула (9) выведена инженером завода „Урал-электрсаппарат“ Е. Н. Алексеевой под руководством А. А. Мерейнеса и И. Д. Урусова.

Проводя соответствующие подстановки и преобразования, получаем:

$$k_{1/2} = \frac{1}{\sin \alpha} \ln \frac{(d_1 \pm d_{12})(d_2 \pm d_{22})}{(s_1 \pm s_{12})(s_2 \pm s_{22})} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{(d_1 \pm d_{11})(d_2 \pm d_{21})}{(s_1 \pm s_{11})(s_2 \pm s_{21})}. \quad (10)$$

В первом и втором членах выражения (10) под знаком логарифма опять стоит отношение произведений дополненных диагоналей построенного на отрезках четырехугольника к произведению дополненных сторон, причем в первом члене диагонали и стороны дополняются проекциями на воздействующий отрезок 2, а во втором — на подвергающийся усилию отрезок 1 (что обозначается добавлением к индексу второй цифры 2 или, соответственно, 1). Кроме того, дополняющие проекции берутся с положительным знаком, если угол, образованный диагональю или стороной и ее проекцией обращен к точке пересечения отрезков открытой стороной или же с отрицательным, если этот угол обращен к точкам пересечения отрезков вершиной.

Для случая равных и противостоящих отрезков, расположенных к оси симметрии под углом α , например, для вводов высоковольтных выключателей формула (10) упрощается:

$$k_{1/2} = \frac{1 + \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha} \ln \frac{(d + d')(d - d')}{(s_1 + s'_1)(s_2 + s'_2)}, \quad (11)$$

здесь s'_1 , s'_2 , d' и d'' — проекции сторон и диагоналей, причем d' — проекция, образующая с диагональю угол, обращенный к точке пересечения отрезков открытой стороной, а d'' — вершиной.

Так как формулы для расположенных под углом отрезков значительно сложнее предыдущих формул, то для получения приближенного значения коэффициента контура при не особенно большом угле между отрезками можно использовать весьма простые формулы (6) для параллельных отрезков. Для этого следует разбить подвергающийся усилию отрезок на небольшое число участков, провести через середину каждого из них отрезки, параллельные воздействию проводнику, и определить для каждого из отрезков частичное усилие, как для параллельных участков.

Задача сведется к простому определению частичных усилий для параллельных участков и их суммированию, причем одновременно получается и характер распределения усилия вдоль отрезка.

Выводы. Вышеприведенная геометрическая интерпретация формул для важнейших случаев взаимодействия между участками проводников дает возможность значительно более простого и наглядного определения электродинамических усилий между проводниками, чем обычные методы, и благодаря легко запоминаемым и однотипным правилам составления формул избавляет от ошибок, которые не исключены при пользовании обычно применяемыми многочленными формулами или соответствующими графиками для разнообразных вариантов расположений участков.

Литература

1. В. Б. Романовский. Вестник экспериментальной и теоретической электротехники, № 5 — 6, 1931.
2. А. А. Смуров. Электротехника высокого напряжения и передача энергии, т. III, ОНТИ, 1936.
3. А. Я. Булюв. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.

[13. 2. 1950]



Измерение мощности и угла потерь при высокочастотном диэлектрическом нагреве

Кандидат техн. наук, доц. Э. Г. УДЕРМАН

Центральная научно-исследовательская лаборатория электрификации промышленности и строительных работ МСПТИ

Измерение мощности и угла потерь необходимо не только при исследованиях по высокочастотному диэлектрическому нагреву неметаллических материалов, но и для контроля процесса нагрева в производственных условиях. Поэтому важно, чтобы метод измерений этих величин был прост и доступен персоналу средней квалификации.

Ниже мы остановимся только на главнейших из методов, применявшихся высокочастотной лабораторией ЦНИЛЭПС.

Первым (хронологически) нашел себе применение способ трех приборов: вольтметров (или амперметров), включаемых по схеме рис. 1. Как видно из этой схемы, определение полного сопротивления $z_n = \frac{U_n}{I_n}$ по показаниям двух приборов весьма просто. Основная трудность заключается в определении содержащихся в этой величине z_n ее составляющих r_n и C_n .

В контур, индуктивно связанный с колебательным контуром лампового генератора, включена "нагрузка", представленная на схеме в виде параллельно соединенных активного сопротивления r_n и емкости C_n . Последовательно с нагрузкой включен "укорачивающий" настроечный конденсатор C . На рис. 1, внизу, изображена векторная диаграмма для этой схемы.

Из треугольника ABC получаем:

$$P_{r.n} = 0,5 (U_0^2 - U_c^2 - U_n^2) \omega C; \quad (1)$$

$$P_{a.n} = \sqrt{(U_n I_n)^2 - P_{r.n}^2}; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \sqrt{\frac{4U_n^2 U_c^2}{U_0^2 - U_n^2 - U_c^2}} - 1. \quad (3)$$

Описываются способы, примененные ЦНИЛЭПС для измерения электрических параметров диэлектриков при их высокочастотном нагреве в производственных условиях, в том числе метод трех вольтметров (или амперметров) и др. Рекомендуется простой и достаточно точный для целей практики резонансно-вариационный метод.

По измеренным I_n , U_n , U_c и U_0 вычисляются $P_{r.n}$, $P_{a.n}$, $\operatorname{tg} \delta$, а затем и величины

$$I_{a.n} = \frac{P_{a.n}}{U_n};$$

$$I_{r.n} = \frac{P_{r.n}}{U_n}; \quad r_n = \frac{P_{a.n}}{I_{a.n}^2} \quad \text{и} \quad C_n = \frac{I_{r.n}^2}{\omega P_{r.n}}.$$

Ввиду того что измерения по способу трех вольтметров, привлекательному по своей простоте, как правило, давали значительную погрешность, этот способ был пресанализирован в отно-

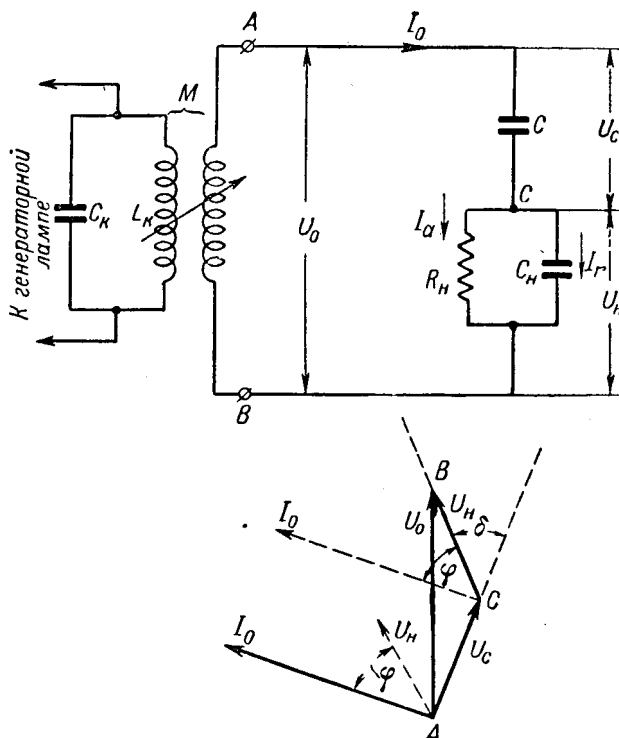


Рис. 1. Схема измерений по методу трех вольтметров и векторная диаграмма.

шении точности, которую он может обеспечить при измерении наиболее характерного для диэлектрика параметра $\operatorname{tg} \delta$.

На практике при замерах U_0 , U_n и U_c можно встретиться с различными комбинациями показаний приборов: $U_{0.изм}$, $U_{н.изм}$ и $U_{с.изм}$, а именно каждая из них может оказаться замеренной или с положительной, или с отрицательной относительной ошибкой ΔU .

Рассмотрим два предельных случая:

$$a) U_{0.изм} = U_0(1 - \Delta U); \quad U_{н.изм} = U_n(1 + \Delta U);$$

$$U_{с.изм} = U_c(1 + \Delta U);$$

$$b) U_{0.изм} = U_0(1 + \Delta U); \quad U_{н.изм} = U_n(1 - \Delta U);$$

$$U_{с.изм} = U_c(1 - \Delta U).$$

Здесь истинные значения обозначены через U_0 , U_n и U_c , а относительная ошибка при замере U через ΔU ($\Delta U > 0$).

Случай „а“ соответствует отрицательной ошибке для $\operatorname{tg} \delta_{изм}$ (последний больше истинного $\operatorname{tg} \delta$). В случае „б“ $\operatorname{tg} \delta_{изм} < \operatorname{tg} \delta$.

Введя относительную ошибку для $\operatorname{tg} \delta$

$$\Delta_\delta = \frac{\operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \delta_{изм}}{\operatorname{tg} \delta}$$

и

$$x = U_c/U_n,$$

$$m = \frac{U_0}{U_n},$$

из (3) получаем:

$$\Delta_\delta = 1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \sqrt{\frac{4x^2(1 \pm \Delta U)^2}{[m^2(1 \mp \Delta U)^2 - (1 \pm \Delta U)^2(1+x^2)]^2} - 1}. \quad (4)$$

Из треугольника OAB (рис. 1) видно, что при определенных значениях U_n , U_c и δ вектор U_0 и, следовательно, m имеет совершенно определенное значение, устанавливаемое из (3):

$$m^2 = \frac{2x}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} + 1x^2, \quad (5)$$

тогда (4) будет иметь вид:

$$\Delta_\delta = 1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \sqrt{\frac{x^2(1 \pm \Delta U)^2}{\left[\frac{(1 \mp \Delta U)^2 x}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \mp 2\Delta U(1+x^2)\right]^2} - 1}. \quad (6)$$

Верхний знак относится к случаю „а“, нижний знак — к случаю „б“.

Из (6) нетрудно установить, что $\Delta_\delta = f(\operatorname{tg} \delta, x)$ независимо от величины $\operatorname{tg} \delta$ имеет минимум при $x=1$.

Приняв в (6) $x=1$, $\Delta U=0,02$ (т. е. точность прибора 2%), получаем зависимости $\Delta_\delta = f(\operatorname{tg} \delta,$

$x=1$), изображенные на рис. 2 (кривые 1 и 2). Заштрихованная область между этими кривыми и является той областью, в которой могут находиться значения ошибок Δ_δ при измерении $\operatorname{tg} \delta$ по способу трех вольтметров при точности прибора $\Delta U\% = 2\%$ и $x=1$. При $x \geq 1$ ошибки Δ_δ будут больше.

Из рис. 2 видно:

1. Минимальные ошибки Δ_δ соответствуют $\operatorname{tg} \delta$ в интервале между $\operatorname{tg} \delta = 1$ и $\operatorname{tg} \delta = 2$. При отклонении $\operatorname{tg} \delta$ влево и вправо от этого интервала Δ_δ быстро возрастает.

2. Даже при весьма большой для высокочастотных измерений точности ΔU (принятой умышленно $\Delta U\% = 2\%$) максимальные значения ошибки Δ_δ могут достигать $+25 \div 40\%$ для самого благоприятного интервала $\operatorname{tg} \delta = 1 \div 2$.

3. В интервале $0 < \operatorname{tg} \delta < 0,5$ вероятны ошибки, выражающиеся не только вещественными, но также и мнимыми числами. Эти выводы полностью применимы и к методу трех амперметров.

В практике ЦНИЛЭПС с различным успехом производилось измерение параметров диэлектрических материалов в процессе высокочастотного нагрева: 1) методом градуированного вариометра; 2) катодным осциллографом; 3) методом расстройки нагрузочного контура (со снижением тока до значения $\frac{1}{\sqrt{2}}$ тока при резонансе); 4) резонансно-вариационным методом и др. Все эти методы сами по себе известны. Трудности возникают при их применении непосредственно в рабочей схеме высокочастотного нагрева материала.

Ввиду ограниченности места остановимся только на *резонансно-вариационном методе* определения r и C нагрузки, давшим лучшие результаты (в том виде, как он применялся в ЦНИЛЭПС).

Идея, положенная в основу этого метода, заключается в следующем;

В контур обычного волномера, например типа ДВ-2, вводится, как это показано на рис. 3а, измеряемое сопротивление z_n , т. е. пакет древесины (или иного материала) и известное безиндукционное сопротивление $R_{эм}$, изготовленное из тонкой нихромовой проволоки или силита. При слабой связи волномера с работающим генератором измеряются резонансные значения тока в контуре волномера: I'_a — при закороченном сопротивлении $R_{эм}$ и I''_a при введенном $R_{эм}$.

Электродвижущие силы, наведенные в катушке волномера, в обоих случаях будут:

$$\left. \begin{aligned} E' &= \omega M I'_k = I'_a (r_n + r_0); \\ E'' &= \omega M I''_k = I''_a (r_n + r_0 + R_{эм}), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где r_n — эквивалентное последовательное активное сопротивление нагрузки;
 r_0 — собственное сопротивление измерительного контура.

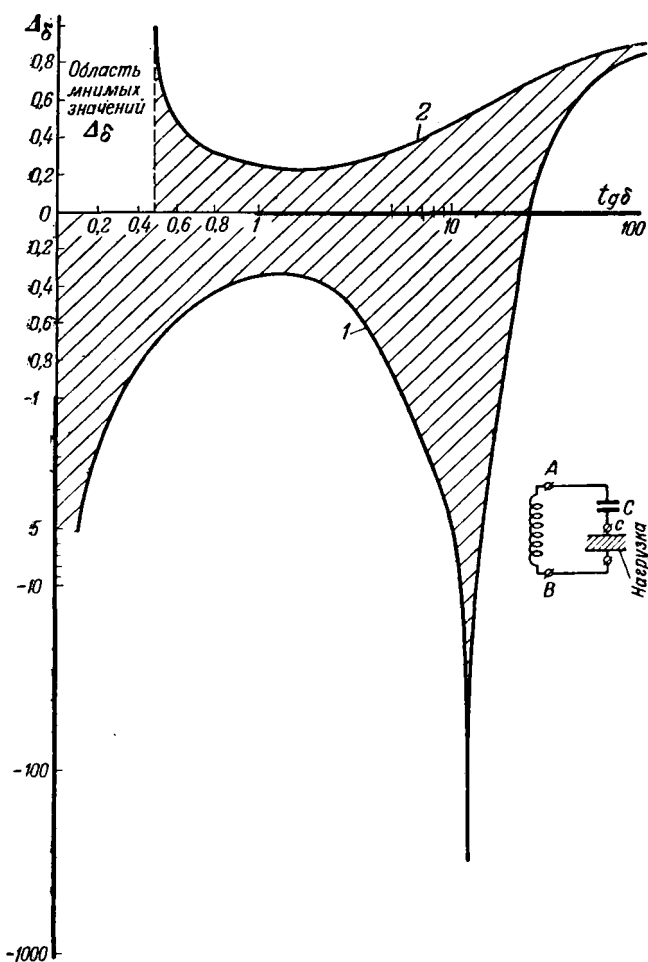


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки $\Delta\delta$ в измерении по методу трех вольтметров (амперметров) угла потерь в функции $\text{tg}\delta$.

Кривая 1:

$$x=1, \Delta U=0,02,$$

$$\Delta\delta = 1 - \frac{1}{\text{tg}\delta} \sqrt{\frac{(1 + \Delta U)^2 x^2}{\left[\frac{(1 - \Delta U)^2 x}{\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta}} - 2\Delta U(1 + x^2) \right]^2 - 1}}$$

Кривая 2:

$$x=1, \Delta U=0,02,$$

$$\Delta\delta = 1 - \frac{1}{\text{tg}\delta} \sqrt{\frac{(1 - \Delta U)^2 x^2}{\left[\frac{(1 + \Delta U)^2 x}{\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta}} + 2\Delta U(1 + x^2) \right]^2 - 1}}$$

При слабой связи между обоими контурами с очень большой точностью $I'_k \approx I''_k$ и $E' \approx E''$. Тогда

$$r_k = R_{эм} \cdot \frac{I''_b}{I'_b - I''_b} - r_0. \quad (8)$$

Собственное активное сопротивление контура волномера определяется предварительно (раз навсегда) тем же методом для каждой частоты. Рабочая частота генератора измеряется таким же волномером.

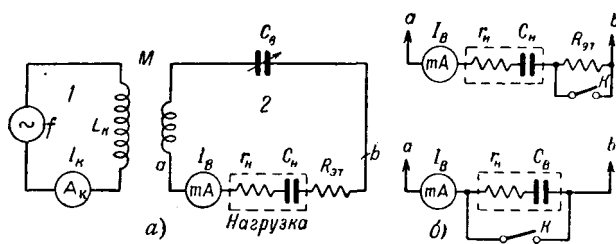


Рис. 3. Схема измерения r_n и C_n в контуре резонансного волномера.

1 — генератор; 2 — контур волномера.

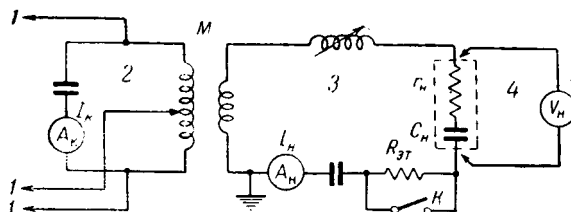


Рис. 4. Схема измерения r_n непосредственно в нагрузочном контуре высокочастотного генератора.

1 — к генераторной лампе; 2 — колебательный контур генератора; 3 — нагрузочный контур; 4 — нагрузка.

Емкость нагрузки измеряется по схеме рис. 3,б. Дважды производится настройка волномера в резонанс с частотой генератора: первый раз при замкнутой нагрузке Z_n , и второй раз при введенном Z_n .

Тогда

$$C_n = \frac{C'_b \cdot C''_b}{C''_b - C'_b}, \quad (9)$$

где C'_b и C''_b — емкости конденсатора волномера, соответствующие двум положениям шкалы при указанных настройках.

Данный способ пригоден при $C_n > C_b$, что практически всегда имеет место для древесины.

Контроль измерений r_n и C_n осуществляется по формуле

$$z_n = \sqrt{r_n^2 + \left(\frac{1}{\omega C_n}\right)^2} = \frac{U_n}{I_n},$$

где U_n и I_n — напряжение на нагрузке и ток нагрузки в рабочих условиях.

Проведенные опыты по измерению искусственной нагрузки из сопротивлений и емкостей согласно рис. 3,а и рис. 3,б, показали, что точность метода достигает $\pm 3\%$.

Однако, для целей практических измерений r_n непосредственно в производственных условиях данный метод еще более упрощается. Дело, в том, что переключение нагрузки из рабочего нагрузочного контура в измерительный контур волномера на время замера (1–2 мин) не является желательным. Поэтому для целей практики рекомендуется схема, изображенная на рис. 4.

Эталонное сопротивление $R_{эм}$ введено непосредственно в нагрузочный контур генератора и нормально закорочено. Длинная фарфоровая ручка рубильника или кнопочное управление шунтировкой $R_{эм}$ позволяют производить измерение токов $I'_н$ и $I''_н$, не прерывая процесса нагрева.

Измерение токов $I'_н$, $I''_н$, $I'_к$ и $I''_к$ производится в условиях резонанса.

Аналогично предыдущему легко получить формулу

$$r_n = R_{эм} \cdot \frac{I''_н \cdot \left(\frac{I'_к}{I''_к} \right)}{I'_н - I''_н \left(\frac{I'_к}{I''_к} \right)} - r_0. \quad (10)$$

Так как значения токов $I'_к$ и $I''_к$ в колебательном контуре при изменении даже вдвое величины активного сопротивления нагрузочного контура мало отличаются друг от друга, то фазовый сдвиг между значениями токов $I'_к$ и $I''_к$ ничтожен и не влияет на точность измерений по формуле (10).

Зная r_n и $z_n = \frac{U_n}{I_n}$, легко получить C_n .

Величина эталонного сопротивления $R_{эм}$ должна быть того же порядка, что и r_n , при этом достигается наибольшая точность.

Преимущества последнего метода измерений r_n по сравнению со всеми предыдущими:

1. В схему не вводятся специальные измерительные приборы. Два амперметра A_k и A_n , — для двух отсчетов, которые используются в формуле (10), — всегда имеются в нормальной схеме.

2. Формула (10) дает относительно высокую точность измерения порядка $3 \div 5\%$.

3. По данному методу осуществляется непосредственное измерение относительной величины $r_n/R_{эм}$.

4. Метод отличается исключительной простотой и большой скоростью производства замера.

Описанный метод был экспериментально проведен при сушке березовых брусков $30 \times 32 \times 200$ мм³ на генераторе 0,8 квт, а также при сушке дубовых брусков $120 \times 175 \times 1500$ мм³ на генераторе 10 квт.

Характер изменения r_n , C_n и z_n при этом полностью соответствовал физическим представлениям о поведении древесины, теряющей влагу в процессе сушки.

При проведении исследования автор воспользовался указаниями кандидата техн. наук А. В. Нетушила. Экспериментальную работу под руководством автора провел инж. А. А. Александров.

Литература

1. А. В. Нетушил. Вестник инженеров и техников, № 4, 1947.
2. А. В. Нетушил, Б. А. Гольдблатт. Электричество, № 4, 1948.
3. К. П. Семеновский. Строительная промышленность, № 1, 1948.

[31. 5. 1948]



Опыт эксплуатации электроустановок на московских предприятиях¹

Инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ

Мосэнерго

Совет Министров Союза ССР постановлением от 25 мая 1949 г. и Министерство электростанций СССР приказом от 1 июня 1949 г. обязали Госинспекцию по промышленности и энергоснабжению при МЭС СССР и все энергосбыты усилить надзор за соблюдением потребителями установленных Правил монтажа и технической эксплуатации электроустановок.

В то время как на электростанциях и в электросетях МЭС СССР соблюдение Правил технической эксплуатации и Правил безопасности является основным законом эксплуатации, а безаварийность — важнейшим показателем работы, — на многих потребительских электроустановках зачастую нарушаются эти правила, в результате чего имеют место аварии.

Исходя из поставленной задачи Энергосбыт Мосэнерго приступил к изучению и проверке технического состояния электроустановок предприятий с тем, чтобы наметить конкретные меры для улучшения электрохозяйства. Сейчас уже можно сделать первые выводы.

Самым лучшим показателем технического состояния электрохозяйства является отсутствие аварийности. По количеству отключений кабельных и воздушных линий, трансформаторов, двигателей и другого оборудования, эксплуатируемого потребителем, нужно судить о постановке эксплуатации на том или ином предприятии. Поэтому изучение и проверку технического состояния электроустановок пришлось начинать с изучения и выявления аварий, отключений и погашений в установках потребителей.

Аварийность. Согласно инструкции МЭС СССР от 17 июня 1944 г. различаются: а) аварии по вине потребителей, развившиеся в системные аварии, б) абонентские отключения и в) погашения. Непредвиденные отключения потребителей от сетей энергосистемы по вине самих потребителей принято называть абонентскими отключениями или погашениями.

Абонентскими отключениями считаются: а) автоматические отключения фидеров и трансформа-

На основании накопленного материала по расследованию аварий у абонентов Мосэнерго, приводятся данные по распределению имевших место аварий в зависимости от вызвавших их причин. Разбираются условия эксплуатации, приведшие к авариям. Дается перечень мероприятий как по устранению причин аварий, так и по улучшению надзора за состоянием электрооборудования.

торов, питающих только одного потребителя при условии, что эти отключения произошли по вине данного потребителя; б) перерывы в электропитании потребителей из-за повреждения оборудо-

вания или неправильных действий персонала, а также из-за неправильной работы релейной защиты по вине потребителя на потребительских подстанциях, находящихся в транзите или присоединенных отпайках.

Погашениями считаются: а) перегорание предохранителей или отключение выключателей на стороне высокого напряжения трансформаторов, установленных в распределительных сетях высокого напряжения, если причинами указанных отключений явилось короткое замыкание в сети низкого напряжения; б) перегорание предохранителей на стороне низкого напряжения сетевых трансформаторов.

В 1949 г. в системе Мосэнерго не было аварий по вине потребителей, развившихся в системные аварии, но были отключения и погашения. Для того, чтобы устранить причины неполадок в хозяйстве потребителей, нужно вскрыть причины отключений установок потребителей.

С точки зрения предприятия абонентские отключения и погашения, хотя и не развившиеся в системные аварии, все равно являются авариями. Вместе с внезапным перерывом в подаче электроэнергии останавливается производство, что вызывает невыполнение плана или брак продукции. В дальнейшем все случаи абонентских отключений или погашений будем условно называть авариями.

В настоящее время Энергосбыт Мосэнерго расследует и анализирует те абонентские отключения и погашения, которые сопровождаются отключением фидеров на подстанциях и станциях энергосистемы или отключением кабелей и трансформаторов и погашением в распределительной сети Московской кабельной сети. Внутривзаводские аварии с обесточением отдельных подстанций, трансформаторов, цехов, участков, агрегатов не доводятся до сведения Энергосбыта. Нет и указаний директивных организаций, которыми бы потребители обязывались сообщать о таких авариях Энергосбыту. На самих предприятиях эти аварии, как правило, не учитываются и не

¹ Изложение доклада, прочитанного в ноябре 1949 г. на заседании ВНИТОЭ.

систематизируются. Во всяком случае, если аварии в высоковольтном хозяйстве завода кое-где еще учитываются, то аварии в низковольтном хозяйстве — сгорания предохранителей, выход из строя электродвигателей — учитываются в лучшем случае общим количеством. Поэтому сейчас очень трудно составить полную картину того, как аварии и дефекты в работе электрохозяйства предприятия влияют на его работу.

Энергоотделы министерств, как правило, недостаточно интересуются внутризаводскими авариями в электрохозяйстве, своевременно не систематизируют и не используют надлежащим образом этих материалов. В первую очередь следует остановиться на аварийности в высоковольтном хозяйстве предприятий, поскольку большая часть этих аварий расследовалась.

Как известно, предприятия имеют в своей эксплуатации высоковольтные кабельные и воздушные линии, связывающие их с энергосистемой. Поэтому в приводимых ниже данных помещены не только аварии во внутризаводских высоковольтных сетях, но и в питающих предприятия линиях. Следует отметить, что в них не включены аварии, имевшие место в сетях Мособлэлектро, Моссельэнерго и в коммунальных сетях городов, поскольку это не входит в нашу задачу в данном случае.

В 1949 г. имели место автоматические отключения в высоковольтных сетях предприятий по следующим причинам (в процентах от общего числа отключений)

1. Поломка и падение опор линий 6—10 кв	6,8
2. Повреждение изоляторов	4,5
3. Повреждения и обрывы прозодов	19,9
4. Повреждения высоковольтных кабелей и муфт	18
5. Повреждение трансформаторов	1,4
6. Повреждение высоковольтных двигателей	3,6
7. Повреждения масляных выключателей и разъединителей	0,5
8. Неселективная работа защиты	2,2
9. Неправильные действия оперативного персонала	4,6
10. Недообработанный ремонт	6,5
11. Повреждения животными и птицами	0,3
12. Перегрузка оборудования	10,8
13. Необеспеченность грозозащитой	14,7
14. Невыяснено	6,4

Основной причиной поломок и повреждений опор является не только несвоевременная смена опор, имеющих загнивание древесины, но и установка опор из непропитанного леса. Персонал своевременно не замеряет степень загнивания древесины и не заменяет ее. Большим недостатком в этом отношении является отсутствие местных установок по пропитке древесины антисептиками, где отдельные предприятия, независимо от их принадлежности к различным министерствам, могли бы пропитывать древесину для опор. Повреждения изоляторов происходили из-за употребления на некоторых линиях неполноценных изоляторов типа УШЛ и вследствие применения в ряде случаев изоляторов, не испытанных повышенным напряжением перед их монтажом. Значительное количество автоматических отключений

произошло по причине обрыва проводов. Основная причина этого — отсутствие наблюдения за контактами в местах соединения проводов, наличие большого количества соединений проводов при помощи скрутки, а не в зажимах, наличие вставок проводов малых сечений, невыдерживающих токов короткого замыкания, схлестывание проводов, вследствие плохого монтажа и разрегулировки проводов, замыкание посторонними предметами. Значительное количество отключений произошло в связи с грозowymi поражениями, чему способствовала интенсивная грозовая деятельность 1949 г. В то же время следует отметить недостаточную обеспеченность потребительских установок разрядниками, особенно разрядниками 6—10 кв на малые токи, и повреждения разрядников типа РТО. В этом требуется срочная помощь со стороны электропромышленности.

Значительное количество отключений произошло по причине повреждений высоковольтных кабелей. Эти отключения могли бы быть резко уменьшены при проведении практических испытаний, требуемых ПТЭ, и своевременном устранении дефектов, выявляемых этими испытаниями. Расследование отключений показало, что слабым местом являются старые муфты типа Фирсова, в которых близко расположены фазы, а также дефекты монтажа этих муфт (плохая разделка кабелей, плохая заливка муфт мастикой). Большое число повреждений произошло с кабелями типа ГТШ на торфоразработках из-за качества резиновой изоляции. Наряду с этим следует отметить ослабление внимания к охране трасс кабелей, в результате чего при производстве строительных работ и раскопок вблизи трасс был поврежден ряд кабелей.

Неналаженность эксплуатации релейной защиты была причиной ряда внутризаводских аварий. На одном из заводов защита не проверялась в течение двух лет, в результате работала неправильно. На другом заводе также защита работала неселективно и имели место случаи отключения вместо печного трансформатора — блок-трансформатора 10/6 кв. На двигателе была установлена завышенная по току защита, в результате отключился не двигатель 250 квт, а трансформатор 1 800 квт и фабрика простояла 45 мин. На Химкомбинате не велось должного наблюдения за аккумуляторной батареей. Напряжение постоянного тока снизилось, и при аварии защита не работала. На этом же комбинате был еще один случай отказа работы защиты. При ошибочном отключении трансформатора 560 квт произошло отключение соседних подстанций комбината.

Эксплуатация релейной защиты является уязвимым местом для многих предприятий. Даже многие крупные предприятия до сих пор не имеют квалифицированного персонала релейщиков и специальных приборов для проверки и наладки защиты и обращаются за помощью к случайным организациям и лицам. Нередко аварии возникают вследствие неудовлетворительного качества отдельных видов электрооборудования.

Имели место случаи аварий, вызванные плохим качеством масляных выключателей типа

ВМГ-133: разрывы тяг и ребристых изоляторов, перекрытие опорных изоляторов в помещении с повышенной влажностью.

Ряд нареканий вызывает привод типа РБА. Крышки привода и кожуха плотно не закрываются. Отключающий механизм, механизм зацепления выполнены небрежно и часто отказывают при включениях ВМГ. Приходится снимать крышки и делать самодельные приспособления.

Нельзя не остановиться на авариях, возникающих по прямой вине эксплуатационного персонала. К ним относятся случаи: отключения разъединителей под нагрузкой, включение оборудования после окончания ремонта на не снятые заземляющие закоротки, пуск двигателей «накоротко» с неналоженными щетками и др. Все это говорит о недостаточной еще производственной дисциплине на ряде предприятий, о невнимании к Правилам технической эксплуатации, о несоблюдении Правил безопасности в части нарядной системы и производства переключений.

Переходя к авариям в низковольтном хозяйстве предприятий, приходится прежде всего отметить высокий процент выхода из строя электродвигателей на некоторых предприятиях. На комбинате «Трехгорная мануфактура» за 10 месяцев 1949 г. вышло из строя и подверглось капитальному ремонту 19% общего количества электродвигателей, на заводе «Динамо» — 18%, на заводе «Серп и молот» до 30%.

Заводская статистика не учитывает остановок двигателей, не повлекших за собой снятие и замену двигателя, а таких остановок насчитывается значительное количество, в связи с перегревом подшипников, смещением двигателя, сгоранием предохранителей и т. д.

Основными причинами выхода из строя двигателей являются:

а) Повреждения обмоток из-за работы на двух фазах вследствие отсутствия какой-либо защиты от перегрузки (магнитные пускатели не обеспечены тепловой защитой и работают без нее). Предприятия вынуждены идти на применение суррогатных способов защиты от перегрузок. На 1 ГПЗ включают 3 самодельных реле параллельно плавким вставкам. Пока цела вставка, обмотки реле не обтекаются током. При перегорании вставки на соответствующей катушке реле появляется напряжение, реле срабатывает и разрывает цепь пускателя. Электропромышленность должна в самом срочном порядке наладить выпуск защиты двигателей от перегрузок.

б) Повышенная влажность и запыленность помещений или высокая температура окружающей среды, где неверно были установлены двигатели нормального исполнения. Существенную роль при этом играет неудовлетворительное качество пропиточных и покровных лаков. Имеются жалобы потребителей на низкое качество изоляционных лаков № 1154, 316 и 319. В металлургических цехах влажная металлическая пыль проникает в лобовые части обмоток и при неудовлетворительной изоляции это приводит к выходу из строя двигателей.

в) Неудовлетворительное качество эмалевой изоляции обмоточных проводов марки ПЭ и ПЭЛ, применяемых на некоторых двигателях. В результате на некоторых предприятиях ведется полная перемотка всех двигателей, имеющих провода с эмалевой изоляцией. Часто эта перемотка сводится к дополнительной обмотке проводов пряжей, что приводит к изменению параметров двигателей и к снижению их мощности.

Значительное количество двигателей выходит из строя в связи с повреждением подшипников. Наблюдаются случаи, когда шариковые подшипники при гарантированном числе часов работы в 5 000 час выходят из строя намного раньше.

Значительную аварийность дают подшипники с кольцевой смазкой при попадании в них стружек, песка, грязи. На тех предприятиях, где имеется значительный выход из строя двигателей, как правило, неудовлетворительно поставлена профилактика двигателей. Не соблюдаются сроки плано-предупредительных ремонтов, осмотров. Не замеряется сопротивление изоляции обмоток, своевременно не производятся повторные пропитки обмоток.

Немалую роль в нарушении работы двигателей играют пусковые устройства. Простейшие пусковые устройства — рубильники — изготавливаются в значительных количествах предприятиями местной и кооперативной промышленности, причем, как правило, низкого качества. Заводы указывают на слабость контактных частей рубильников. Приходится на месте усиливать их, иначе неизбежен быстрый выход из строя. Рубильники выпускаются без кожухов. Завод «Серп и молот» отмечает низкое качество контактов, не выдерживающих положенного числа включений в час.

На заводе «Динамо» наблюдается ежегодно выход из строя из-за витковых замыканий до 18—24% катушек магнитных пускателей, имеющих эмалевую изоляцию.

Некоторые заводы указывают на плохое качество пусковых реостатов, в которых часто перегорают сопротивления, не выдерживающие рабочих плотностей тока.

Основным видом защиты двигателей и других токоприемников, а также отдельных цехов до сих пор остается плавкий предохранитель. За последнее время их конструкция значительно улучшилась, но на предприятиях все еще применяются предохранители кустарного изготовления. Вместо калиброванных вставок применяют медную проволоку, этим выводят из строя предохранитель и его контакты. Правильному определению номинального тока, влиянию старения предохранителей и их своевременной замене, не ожидая перегорания, не придают значения.

К сожалению, на предприятиях нет учета погашений из-за сгорания предохранителей и анализа причин их перегорания. К таким погашениям привыкли и относятся, как к обычным явлениям, забывая, что за ними стоят простои оборудования и даже целых цехов. Необходимо выпускать в достаточном ассортименте и количестве предохранители и плавкие вставки, а на предприятиях наладить их грамотную эксплуата-

цию. Одновременно надо запретить выпуск всяких суррогатов и наладить контроль за качеством выпускаемых плавких вставок местной промышленностью и промкооперацией.

Профилактические испытания оборудования являются залогом безаварийной работы. Периодические испытания кабелей повышенным напряжением выпрямленного тока, испытания изоляции высоковольтного оборудования, проверка изоляции проводов, замеры сопротивления заземления, проверка древесины опор на загнивание, испытания релейной защиты и другие профилактические испытания широко распространены в электрохозяйстве и регламентированы Правилами технической эксплуатации. На электростанциях и в сетях энергосистем эти профилактические испытания проводятся в самых широких масштабах. Они позволили выявить многие аварийные очаги, предотвратили многие аварии. За последние годы передовые предприятия стали занемогать опыт энергосистем в этом отношении. Они подвергают профилактическим испытаниям все свое высоковольтное и низковольтное оборудование.

На одном машиностроительном заводе систематически производятся испытания высоковольтных кабелей выпрямленным током повышенного напряжения. Здесь было выявлено большое количество дефектов в соединительных кабельных муфтах, трещины и пустоты в концевых муфтах. Эти дефекты в любой момент могли стать источником аварий. На другом заводе при испытаниях кабелей было обнаружено 3 случая недоброкачественной разделки муфт, в 4 случаях была выявлена недостаточность толщины свинцовой оболочки кабелей, 2 случая плохой разделки муфт низковольтных кабелей, один случай дефектной разделки концевой воронки. На этом же заводе при испытаниях высоковольтного оборудования было обнаружено 4 случая, когда ток утечки был выше нормы из-за плохой изоляции трансформаторов тока, и 3 случая вследствие недоброкачественности опорных изоляторов, на которых крепятся выключатели типа ВМГ-133.

Большой опыт по профилактике кабелей накопил Метрострой. Он не только испытывает кабели в твердо установленные сроки, но и изыскивает новые методы профилактических испытаний и нахождения мест повреждения.

В то же время далеко еще не все предприятия проводят профилактические испытания. Энергетики некоторых предприятий проявляют явную косность в этом отношении. Они доказывают «опасность» таких испытаний, неприемлемость их для своего предприятия, не имеющего резервных кабелей, резервной аппаратуры.

Такие «теории» существовали, например, на Ореховском хлопчатобумажном комбинате. Несмотря на предписание Энергосбыта Мосэнерго, персонал комбината не проводил испытания кабелей, считая, что при испытаниях кабели могут выйти из строя, а без испытания они проработают благополучно еще много лет. Однако, в том же году на комбинате вышло из строя 7 высоковольтных кабелей. При своевременных испытаниях аварийные очаги были бы выявлены и

устранены. Теперь на комбинате производятся испытания кабелей повышенным напряжением.

На ряде предприятий средней мощности упорно не производятся испытания электрооборудования. Можно отметить, что те предприятия, которые создали у себя лаборатории, выделили для работы в них специальный персонал, оснастили их необходимыми измерительными приборами и проводят профилактические испытания, добились резкого сокращения отключений и погашений. На одном машиностроительном заводе создана такая лаборатория из восьми человек, которую возглавляет 1 инженер и 1 техник. Лаборатория производит испытания кабелей, трансформаторов, релейной защиты, выходящих из ремонта двигателей, защитного оборудования, заземления, измерительных приборов. Аналогичные лаборатории существуют и на других предприятиях.

Наряду с этим на таких предприятиях, как «Красный богатырь», «Трехгорная мануфактура», «1-ая ситценабивная фабрика» и на других, нет не только лаборатории, но и простейших измерительных приборов.

Дело профилактики иногда поручается пусконаладочным организациям (Энерголегпром, Энергочермет и др.), которые не в состоянии вести повседневные испытания, так как не могут отвлекаться на выполнение внеплановых работ по текущей профилактике.

Часто предприятия пытаются выйти из положения своими силами или привлекают частных лиц, которые не в силах доброкачественно выполнить работы.

Для того, чтобы обеспечить проведение всех профилактических испытаний электрооборудования, требуемых Правилами технической эксплуатации, необходимо поставить все дело на твердую организационную основу. На крупных предприятиях надо создавать нормальные лаборатории, оснащенные оборудованием и укомплектованные персоналом. Создание лабораторий на предприятиях средней и небольшой мощности было бы нерентабельно и нецелесообразно. Эти предприятия должны обслуживаться лабораторией крупного предприятия того же самого министерства, к которому относятся средние и мелкие предприятия. Такие базовые лаборатории вполне смогут обеспечить и свое предприятие и территориально тяготеющие к нему более мелкие предприятия своего же министерства. Энергоотделы министерств должны поддержать инициативу Энергосбыта Мосэнерго, предложившего создать такие базовые лаборатории.

Организация ремонтов. С профилактикой электрооборудования неразрывно связан вопрос об организации ремонтов на предприятиях. Передовые предприятия машиностроения уделяют серьезное внимание планомерно-предупредительным, текущим и капитальным ремонтам электрооборудования. Графики ремонта систематически и заблаговременно составляются. Они утверждаются директором или главным инженером предприятия. Ведется повседневный контроль за их исполнением. Премияльное поощрение персонала поставлено в зависимость от выполнения ремонтных

работ. Однако, даже на этих передовых предприятиях планы ремонтов охватывают часто не все электрооборудование. Целые группы низковольтного оборудования остаются неохваченными плановым ремонтом. На многих же предприятиях других отраслей промышленности, вследствие отсутствия указаний от энергоотделов министерств, отсутствует твердая номенклатура оборудования, подлежащего включению в график ремонта. Выполнение графика планового ремонта ведется часто неудовлетворительно, а отчетность далека от действительности. Как и в отношении профилактики, можно отметить, что те предприятия хорошо ведут ремонтные работы, которые создали у себя ремонтные базы и организовали дело ремонта.

На одном из машиностроительных заводов создано бюро планового ремонта. Работа ведется строго по плану, утвержденному главным инженером завода на год. На основе годового плана ежемесячно создается план-график ремонта. Приемка выполненных работ ведется инспекторами, подчиненными бюро планово-предупредительного ремонта отдела главного энергетика. Ремонтируемые агрегаты в разобранном виде предъявляются к сдаче инспекторам. Инспекторы отмечают также качество работ. Бюро планово-предупредительного ремонта дает оценку работ и справку в бюро зарплаты цеха для начисления процента премии. Качество работ влияет также на премирование цеховых электриков. Электроцех расположен в самостоятельном корпусе и оснащен механическим и электротехническим оборудованием. Он имеет токарные станки, фрезерный, строгальный, гидропресс и др.; в обмоточной мастерской имеются: станки для оплетки проводов, для механической намотки катушек, пропиточное отделение с баком и калориферной сушкой, стенд для испытания двигателей и снятия характеристик, установка для испытания изоляции повышенным напряжением.

На многих других предприятиях наблюдается нная картина. На заводе «Калибр» электроремонтная мастерская не укомплектована персоналом. При ремонтах двигателя не обращается внимание на то, что из-за изменения сечения проводов изменяются паспортные данные, двигатели после ремонта не испытываются, сопротивление обмоток и сопротивление изоляции не замеряются. Некоторые цехи не имеют постоянного, прикрепленного к цеху, электромонтера и обслуживаются только в аварийных случаях.

На фабрике им. Петра Алексеева нет электроремонтной мастерской, на 1-й ситценабивной фабрике есть небольшая мастерская, необорудованная, однако, в должной мере. Примерно то же и на Трехгорной мануфактуре.

Энергоотделы министерств должны, на основе учета специфики технологии, вплотную заняться вопросом создания продуманной системы планово-предупредительного ремонта (ППР); должны быть созданы на предприятиях ремонтные мастерские. Эти мастерские, конечно, могут быть различными по мощности и по оснащенности, в

зависимости от размеров предприятий и возлагаемых на них работ.

Работа с персоналом. Ранее уже было указано на большое количество аварий во внутриводском электрооборудовании по вине персонала. В то же время ясно, что одним из важнейших условий работы без аварий и погашений является подготовленность, дисциплинированность и техническая культурность персонала. Следует заметить, что с электротехническим персоналом ведется сейчас на предприятиях недостаточная работа. Обычно, в лучшем случае, занятия сводятся к прохождению курсов по изучению Правил безопасности и курсов по изучению Правил технической эксплуатации.

Необходимо разработать типовые программы и поручить преподавание специализированным учебным организациям; кроме того, следует периодически созывать семинары энергетиков и начальников электроцехов при энергоотделах министерств, как это делает, например, МЭП СССР и др.

Штаты электрохозяйств. Вопросы правильной организации, правильной расстановки кадров электрохозяйств имеют очень большое значение. В настоящее время наблюдается чрезвычайная пестрота. Даже на однородных предприятиях заметна большая разница в штатах и в самой структуре обслуживания цехов.

Если на крупных предприятиях машиностроения главный энергетик подчинен главному инженеру, то на большинстве средних предприятий руководитель электрохозяйства подчинен главному механику, что ограничивает его права и отрицательно отражается на деле. Как правило, главные механики хорошо знают технологическое оборудование, но не всегда хорошо разбираются в эксплуатации электроустановок. Электроотделы (электроцехи) весьма ограничены в своих правах и возможностях и на большинстве предприятий не влияют даже на условия эксплуатации электрооборудования. Особенно это относится к предприятиям легкой промышленности. Зачастую электроотделы (электроцехи) не имеют отдельных фондов зарплаты, не имеют производственной базы для ремонта электрооборудования. Чтобы выполнить механические ремонтные работы, начальники электроотделов месяцами добиваются в ремонтных цехах их выполнения. Электроматериалами начальники электроцехов самостоятельно распорядиться не могут. Начисление зарплаты и премий производится не электроотделами, а главным механиком.

Назрела необходимость упорядочить вопросы структуры электроцехов и энергоотделов. Надо дать им больше прав и поднять авторитет главных энергетиков предприятий. Упорядочение организации планово-предупредительных ремонтов электрооборудования и профилактических работ, поднятие на более высокий уровень культуры в эксплуатации оборудования обеспечит еще более надежную и безаварийную работу электрохозяйства промпредприятий.

Расчет распределения переменного тока по пластинам сложного токопровода

Инж. И. М. САМСОНОВ

Завод „Электроаппарат“

При большом значении номинального тока всякий токопровод (сборные шины распределительных устройств, ножи разъединителей, выключателей и т. п.) обычно изготавливают в виде нескольких одинаковых полос прямоугольного сечения, соединяемых параллельно. При этом активные сопротивления и индуктивности всех полос можно считать одинаковыми; взаимоиנדукция пластин, будучи различна для разных пластин. Вследствие этого как полный поток индукции, так и полное сопротивление отдельных пластин будут различны, и распределение переменного тока между отдельными пластинами получается неравномерным.

Известна [Л. 2] попытка расчета неравномерности распределения тока применительно к случаю длинных полос без учета активных сопротивлений. Однако, автор показал только, что если предположить равномерное распределение тока по пластинам, то падения напряжения на единицу длины в разных пластинах получатся разными. Степень же неравномерности распределения тока осталась не определенной, так как прямой пропорциональности между неравномерностью напряжений и неравномерностью токов в данном случае не существует.

Такая постановка вопроса во многих практических случаях не достаточна. Так, в ножах аппаратов длина пластин обычно не велика по сравнению с расстоянием между ними, а влияние активных сопротивлений пластин и разъемных контактов довольно значительно.

Ниже приводятся примеры расчета по новому методу, пригодному для практического применения в процессе проектирования новых аппаратов, когда еще нет возможности определить неравномерность распределения тока путем измерения.

Расчет взаимоиנדуктивностей и индуктивностей. Взаимоиנדуктивность между параллельными отрезками тонких проводов одинаковой

Излагается метод расчета распределения переменного тока по параллельным пластинам сложного токопровода конечной длины с учетом активных сопротивлений. Даны кривые и примеры расчета распределения тока при установившемся режиме, а также при наличии аperiodической составляющей.

длины l [см] при расстоянии между их осями c [см] выражается формулой [Л. 1]:

$$M = \pm \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + c^2}}{c} - \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{c}{l}\right)^2}}{c/l} - \frac{\sqrt{l^2 + c^2} - c}{l} \right) = \pm 2l \left(2,3 \lg \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{c}{l}\right)^2}}{c/l} - \sqrt{1 + \left(\frac{c}{l}\right)^2} + \frac{c}{l} \right) 10^{-9} [\text{гн}]. \quad (1)$$

Знак „плюс“ соответствует случаю, когда токи в рассматриваемых пластинах имеют одинаковое направление.

Внешнюю индуктивность отрезка тонкого провода круглого сечения можно определить по этой же формуле, если вместо расстояния c подставить радиус провода r [Л. 1]. Поток внутренней индуктивности следует вычислять отдельно из выражения:

$$L_{11} = \frac{\mu_0 l}{8\pi}. \quad (2)$$

Когда сечения проводников нельзя считать малыми по сравнению с расстоянием между их осями, вместо расстояний c между осями сечений следует брать средние геометрические расстояния g (между площадями сечений проводников).

На рис. 1 приведены кривые для определения средних геометрических расстояний между проводниками прямоугольного сечения, частично заимствованные из литературных источников [Л. 2], частично же разработанные вновь.

Средние геометрические расстояния между проводниками круглого сечения, как известно, равны соответствующим расстояниям между их осями.

Для определения индуктивности L_{11} удобно воспользоваться той же формулой (1) и форму-

лой для среднего геометрического расстояния сечения от самого себя:

$$g_{11} = 0,2235(a+b) \text{ — для прямоугольного сечения,} \quad (3)$$

$$g_{11} = 0,7788r \text{ — для круглого сечения.} \quad (4)$$

При этом отпадает надобность отдельно вычислять внутренний поток индуктивности.

На рис. 2 приводится кривая взаимоиנדуктивности на 1 см полосы в зависимости от относительного значения среднего геометрического расстояния $d = g:l$ соответственно значению $c:l$ в формуле (1). По этой же кривой определяется и индуктивность соответственно значению $d_{11} = g_{11}:l$.

Пример 1. Распределение тока промышленной частоты при установившемся режиме. Однополюсное короткое замыкание. Нож разъединителя состоит из восьми медных пластин сечением $F = 0,5 \times 5 \text{ см}^2$ и длиной $l = 31 \text{ см}$, расположенных согласно рис. 3 (на 1 полюс): $c_{12} = 2,1 \text{ см}$, $c_{23} = 7,9 \text{ см}$, $c_{15} = 7 \text{ см}$. Влияние соседних полюсов не учитывается. Активное сопротивление пластины (на 1 см длины) при 75°C

$$R_{n1} = \frac{\rho l}{F} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{2,5} = 0,8 \cdot 10^{-6} [\text{ом/см}]. \quad (5)$$

Сопротивление медного плоского контакта аналогичного типа по опытным данным

$$R_k = k \sqrt{P} = 77 \cdot 10^{-6} \sqrt{30} = 14 \cdot 10^{-6} [\text{ом}]. \quad (6)$$

Сопротивление двух контактов по концам пластины, приведенное к 1 см длины пластины, $R_{k1} = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ ом/см}$.

Вследствие симметрии $I_1 = I_4 = I_5 = I_8$, а также $I_2 = I_3 = I_6 = I_7$, т. е. токи во всех крайних пластинах равны между собою, и токи во всех средних пластинах также равны между собою.

Падение напряжения на 1 см длины считаем одинаковым во всех пластинах, т. е.

$$I_1 z_{11} = I_2 z_{22} \quad (7)$$

$$I_2^2 : I_3^2 = n^2 = (R^2 + \omega^2 L_2^2) : (R^2 + \omega^2 L_1^2). \quad (8)$$

Полный поток индукции для пластины 1:

$$\Phi_1 = I_1 L_1 = I_1 (L_{11} + M_{14} + M_{15} + M_{18}) + I_2 (M_{12} + M_{13} + M_{16} + M_{17}) \quad (9)$$

и аналогично, для пластины 2:

$$\Phi_2 = I_2 L_2 = I_1 (M_{21} + M_{24} + M_{25} + M_{28}) + I_2 (L_{22} + M_{23} + M_{26} + M_{27}). \quad (10)$$

Подставляя эти значения в формулу (8), получаем:

$$n^2 = \frac{R^2 + \omega^2 [L_{22} + M_{23} + M_{26} + M_{27} + n(M_{21} + M_{24} + M_{25} + M_{28})]^2}{R^2 + \omega^2 [L_{11} + M_{14} + M_{15} + M_{18} + \frac{1}{n}(M_{12} + M_{13} + M_{16} + M_{17})]^2} \quad (11)$$

Пользуясь эскизом расположения пластин (рис. 3) и кривыми рис. 1 и рис. 2, находим последовательно все интересующие нас значения (табл. 1).

Подставляя полученные значения в уравнение (11) и решая его, получим $n = 1,44$.

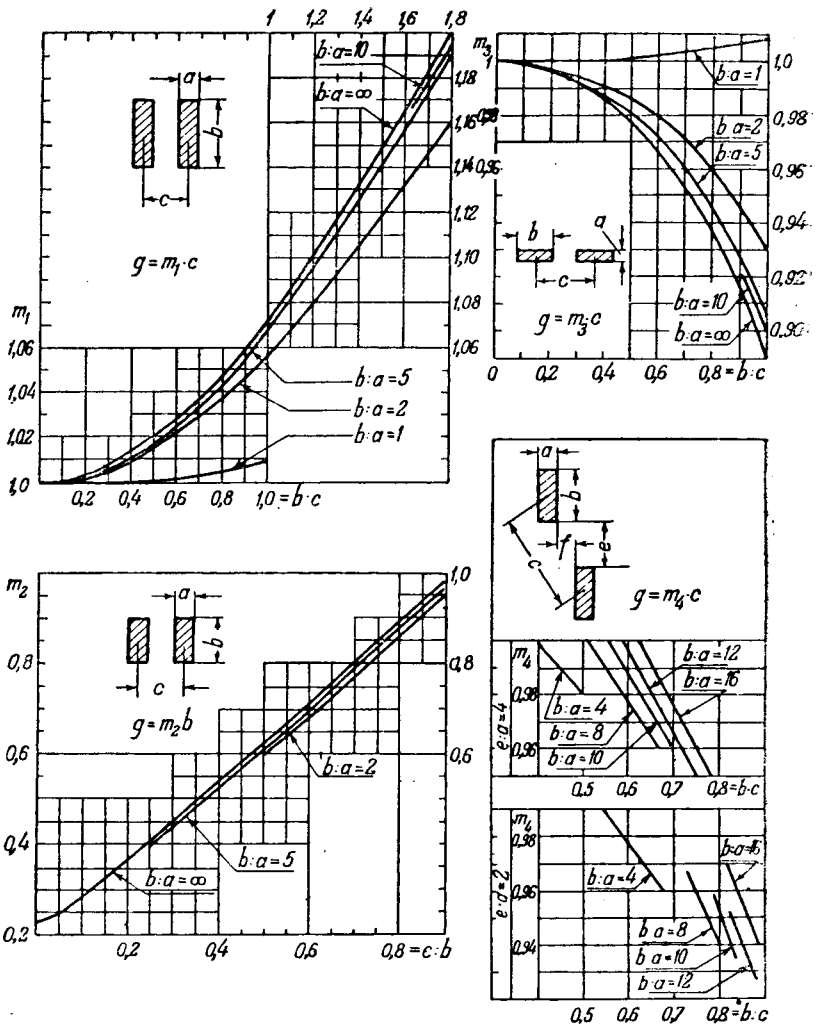


Рис. 1. Кривые для определения среднего геометрического расстояния g между параллельными проводниками прямоугольного сечения.

Если пренебречь активными сопротивлениями ($R = 0$), то формула (11) упростится:

$$n = \frac{L_{22} + M_{23} + M_{26} + M_{27} + n(M_{21} + M_{24} + M_{25} + M_{28})}{L_{11} + M_{14} + M_{15} + M_{18} + \frac{1}{n}(M_{12} + M_{13} + M_{16} + M_{17})} \quad (12)$$

Таблица 1

Расчет коэффициентов индукции к примеру 1

Индуктивность L в гн/см , расстояния g, c в см

$c_{11} =$	$g_{11} = 0,2235(0,5+5) = 1,23$	$d_{11} = 0,0323$	$L_{11} = 6,8 \cdot 10^{-6}$
$c_{12} = 2,1$	$g_{12} = 5 \cdot 0,54 = 2,7$	$d_{12} = 0,087$	$M_{12} = 4,6 \cdot 10^{-9}$
$c_{13} = 10$	$g_{13} = 10 \cdot 1,019 = 10,19$	$d_{13} = 0,328$	$M_{13} = 2,2 \cdot 10^{-9}$
$c_{14} = 12,1$	$g_{14} = 12,1 \cdot 1,011 = 12,25$	$d_{14} = 0,396$	$M_{14} = 2 \cdot 10^{-9}$
$c_{15} = 7$	$g_{15} = 7,096 = 6,72$	$d_{15} = 0,217$	$M_{15} = 2,9 \cdot 10^{-9}$
$c_{16} = 7,31$	$g_{16} = 7,31 \cdot 0,96 = 7,02$	$d_{16} = 0,226$	$M_{16} = 2,8 \cdot 10^{-9}$
$c_{17} = 12,2$	$g_{17} = 12,2 \cdot 1 = 12,2$	$d_{17} = 0,394$	$M_{17} = 2 \cdot 10^{-9}$
$c_{18} = 13,98$	$g_{18} = 13,98 \cdot 1 = 13,98$	$d_{18} = 0,451$	$M_{18} = 1,6 \cdot 10^{-9}$
$c_{23} = 7,9$	$g_{23} = 7,9 \cdot 1,03 = 8,15$	$d_{23} = 0,233$	$M_{23} = 2,7 \cdot 10^{-9}$
$c_{27} = 10,55$	$g_{27} = 10,55 \cdot 1 = 10,55$	$d_{27} = 0,340$	$M_{27} = 2,15 \cdot 10^{-9}$

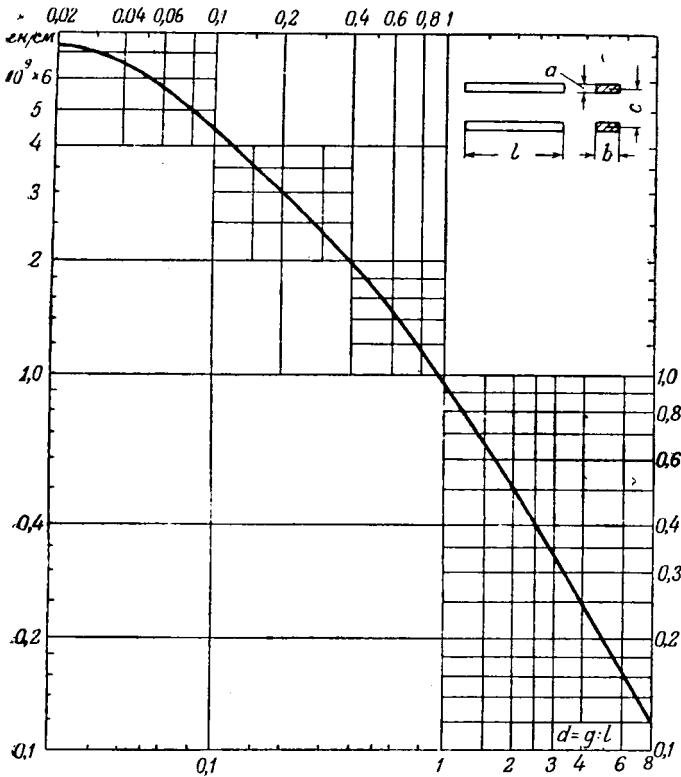


Рис. 2. Коэффициент взаимной индукции параллельных проводников конечной длины L .

При $d > 8 \dots M \approx 10^{-9} : d \text{ гн/см}$;
 при $d < 0,02 \dots M \approx 10^{-9} [-4,6 \lg d - 0,615] \text{ гн/см}$.

Решая уравнение (12) при тех же значениях всех L и M , получим: $n = 1,75 (> 1,44)$.

Ищем углы сдвига фаз тока I_1 и I_2 относительно напряжения:

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{R} = \frac{314 \cdot 21,3 \cdot 10^{-9}}{1,7 \cdot 10^{-6}} = 3,94; \varphi_1 = 75,5^\circ;$$

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{\omega L_2}{R} = \frac{314 \cdot 31,2 \cdot 10^{-9}}{1,7 \cdot 10^{-6}} = 5,76; \varphi_2 = 80^\circ;$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 4,5^\circ.$$

При столь малой разнице в углах сдвига геометрическая сумма токов будет приблизительно равна арифметической сумме их, т. е. общий ток в разьединителе:

$$I_0 \approx 4(I_1 + I_2).$$

Пример 2. Установившийся режим двухполюсного короткого замыкания. Нож разьединителя состоит из четырех медных пластин $0,5 \cdot 8 \text{ см}^2$ длиной 37 см , расположенных согласно рис. 4; $c_{12} = 4 \text{ см}$, $c_{23} = 3,8 \text{ см}$, $c_{37} = 35 \text{ см}$.

Электромагнитное поле в данном случае является плоскопараллельным.

При расчете взаимоиндуктивностей необходимо учесть, что ток в пластинах второго полюса имеет обратное направление, т. е.

$$I_1 = -I_8, I_2 = -I_7, I_3 = -I_6, I_4 = -I_5.$$

Для упрощения расчетов будем учитывать только индуктивные сопротивления, т. е. положим:

$$I_1 \omega L_1 = I_2 \omega L_2 = I_3 \omega L_3 = I_4 \omega L_4.$$

Развертывая значения индуктивностей, получим:

$$I_1(L_{11} - M_{18}) + I_2(M_{12} - M_{17}) + I_3(M_{13} - M_{16}) +$$

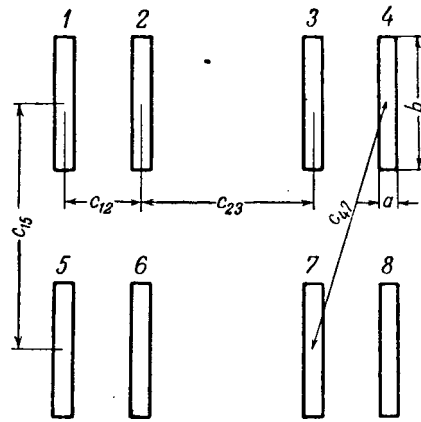


Рис. 3. Расположение пластин к примеру 1.

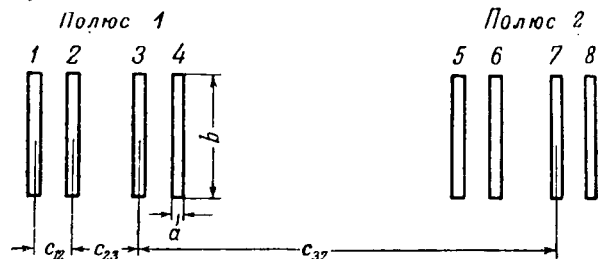


Рис. 4. Расположение пластин к примеру 2.

$$\begin{aligned} &+ I_4(M_{14} - M_{15}) = I_1(M_{31} - M_{28}) + I_2(L_{22} - M_{27}) + \\ &+ I_3(M_{23} - M_{36}) + I_4(M_{24} - M_{25}) = \\ &= I_1(M_{31} - M_{38}) + I_2(M_{32} - M_{37}) + I_3(L_{33} - M_{36}) + \\ &+ I_4(M_{34} - M_{35}) = I_1(M_{41} - M_{48}) + I_2(M_{42} - M_{47}) + \\ &+ I_3(M_{43} - M_{46}) + I_4(L_{44} - M_{45}). \end{aligned} \quad (13)$$

Из полученных трех уравнений можно определить относительные значения четырех токов, если один из них принять за единицу.

Результат определения коэффициентов индукции приведен в табл. 2.

Решая уравнения (13), получим относительные значения токов: $I_1 = 1,79$; $I_2 = 1$; $I_3 = 1,06$; $I_4 = 2,3$; или в процентах от общего значения тока:

$$I_1 = 29,1\%; I_2 = 16,3\%; I_3 = 17,2\%; I_4 = 37,4\%.$$

Если пренебречь влиянием соседнего полюса, получим

$$I_1 = I_4 = 33\%; I_2 = I_3 = 17\%.$$

С учетом активных сопротивлений и без учета влияния соседнего полюса распределение токов получилось бы еще более равномерным: $I_1 = I_4 = 30,8\%$; $I_2 = I_3 = 19,2\%$ ($n = 1,6$). При этом значения индуктивных и активных сопротивлений выразились бы следующим образом:

$$R = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ ом/см}; \omega L_1 = 3,62 \cdot 10^{-6} \text{ ом/см};$$

$$L_1 = 11,5 \cdot 10^{-9} \text{ гн/см}, \omega L_2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ ом/см};$$

$$L_2 = 22,3 \cdot 10^{-9} \text{ гн/см}.$$

Если длина пластин велика по сравнению с расстоянием между ними, расчет можно вести по средним геометрическим расстояниям, как это сделано в статье [Л.2].

Применительно к нашему случаю (однополюсная схема) этот метод даст следующий результат:

$$\begin{aligned} &I_1(\lg g_{11} + \lg g_{14}) + I_2(\lg g_{12} + \lg g_{13}) = \\ &= I_1(\lg g_{12} + \lg g_{24}) + I_2(\lg g_{22} + \lg g_{23}); \end{aligned}$$

$$n = \frac{\lg 1,9 + \lg 4,8 - \lg 4,95 - \lg 8,35}{\lg 1,9 + \lg 12,2 - \lg 4,95 - \lg 8,35} = 2,6 > 1,6,$$

или в процентах от общего значения тока:

$$I_1 = I_4 = 36,1\% \text{ и } I_2 = I_3 = 13,9\%,$$

т. е. неравномерность по этому методу получается существенно больше, чем в случае учета активных сопротивлений и конечной длины проводников.

Распределение тока короткого замыкания при наличии аperiodической составляющей. В тех случаях, когда частота свободных колебаний пластин ножа больше удвоенной частоты тока, электродинамические взаимодействия между ними определяются наибольшим мгновенным значением тока. Поэтому представляет интерес и вопрос распределения тока между пластинами при наличии аperiodической составляющей.

Пример 3. Разберем случай однополюсного короткого замыкания через нож разъединителя, указанный в примере 2, т. е. при $R = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ ом/см}$, $L_1 = 11,5 \cdot 10^{-9} \text{ гн/см}$, $L_2 = 22,3 \cdot 10^{-9} \text{ гн/см}$.

Общее значение протекающего через нож тока $2i_0 = 2(i_1 + i_2)$ определяется параметрами цепи и не зависит от характера распределения тока по пластинам ножа.

Таблица 2

Расчет коэффициентов индукции к примеру 2
Индуктивность L в гн/см, расстояния g , c в см

$c_{11} =$	$g_{11} = 0,2235 (0,5 + 8) = 1,9$	$d_{11} = 0,05$	$L_{11} = 6 \cdot 10^{-9}$
$c_{12} = 4$	$g_{12} = 8 \cdot 0,62 = 4,95$	$d_{12} = 0,13$	$M_{12} = 3,7 \cdot 10^{-9}$
$c_{13} = 7,8$	$g_{13} = 7,8 \cdot 1,07 = 8,35$	$d_{13} = 0,22$	$M_{13} = 2,7 \cdot 10^{-9}$
$c_{14} = 11,8$	$g_{14} = 11,8 \cdot 1,032 = 12,2$	$d_{14} = 0,32$	$M_{14} = 2,2 \cdot 10^{-9}$
$c_{15} = 35$	$g_{15} = 35 \cdot 1,003 = 35,1$	$d_{15} = 0,948$	$M_{15} = 0,955 \cdot 10^{-9}$
$c_{16} = 39$	$g_{16} = 39 \cdot 1,003 = 39,2$	$d_{16} = 1,06$	$M_{16} = 0,9 \cdot 10^{-9}$
$c_{17} = 42,8$	$g_{17} = 42,8 \cdot 1,002 = 42,9$	$d_{17} = 1,16$	$M_{17} = 0,83 \cdot 10^{-9}$
$c_{18} = 46,8$	$g_{18} = 46,8 \cdot 1,002 = 47$	$d_{18} = 1,27$	$M_{18} = 0,75 \cdot 10^{-9}$
$c_{23} = 3,8$	$g_{23} = 8 \cdot 0,6 = 4,8$	$d_{23} = 0,126$	$M_{23} = 3,9 \cdot 10^{-9}$
$c_{25} = 31$	$g_{25} = 31 \cdot 1,003 = 31,2$	$d_{25} = 0,843$	$M_{25} = 1,1 \cdot 10^{-9}$
$c_{27} = 38,8$	$g_{27} = 38,8 \cdot 1,003 = 39$	$d_{27} = 1,05$	$M_{27} = 0,9 \cdot 10^{-9}$
$c_{35} = 27,2$	$g_{35} = 27,2 \cdot 1,007 = 27,4$	$d_{35} = 0,74$	$M_{35} = 1,23 \cdot 10^{-9}$
$c_{36} = 31,2$	$g_{36} = 31,2 \cdot 1,003 = 31,4$	$d_{36} = 0,848$	$M_{36} = 1,1 \cdot 10^{-9}$
$c_{45} = 23,2$	$g_{45} = 23,2 \cdot 1,01 = 23,4$	$d_{45} = 0,632$	$M_{45} = 1,4 \cdot 10^{-9}$

Случай *a*. Затуханием аperiodической составляющей пренебрегаем. Имеем

$$i_0 = i_1 + i_2 = 1 - \cos \omega t; \quad \frac{di_0}{dt} = \omega \sin \omega t;$$

$$i_1 R + L_1 \frac{di_1}{dt} = i_2 R + L_2 \frac{di_2}{dt} = R(i_0 - i_1) + L_2 \frac{d(i_0 - i_1)}{dt};$$

$$2Ri_1 + (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} = Ri_0 + L_2 \frac{di_0}{dt} = R - R \cos \omega t + \omega L_2 \sin \omega t;$$

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{2R}{L_1 + L_2} i_1 = \frac{R}{L_1 + L_2} - \frac{R}{L_1 + L_2} \cos \omega t + \frac{\omega L_2}{L_1 + L_2} \sin \omega t.$$

Полученное линейное дифференциальное уравнение имеет определенное решение.

$$i_1 = e^{-\int 2Adt} \left\{ k + \int e^{+\int 2Adt} [A - A \cos \omega t + c \sin \omega t] dt \right\};$$

$$i_1 = ke^{-2At} + 0,5 + \frac{2AC - \omega A}{\omega^2 + 4A^2} \sin \omega t - \frac{\omega C + 2A^2}{\omega^2 + 4A^2} \cos \omega t$$

10*

$$\text{(обозначено: } A = \frac{R}{L_1 + L_2} = 37,3, C = \frac{\omega L_2}{L_1 + L_2} = 207,$$

$$K = \frac{\omega C + 2A^2}{\omega^2 + 4A^2} = 0,5 = 0,152).$$

Для определения постоянной интегрирования K использовано начальное условие: при $t = 0, i_0 = 0, i_1 = 0$.

Приравняв нулю первую производную $\frac{di_1}{dt}$, находим,

что i_1 имеет максимальное значение $i_{1\text{макс}} = 1,222$ при $t \approx 0,01 \text{ сек}$ $\omega t = 180^\circ$.

Аналогичным образом находим, что $i_2 = i_0 - i_1$ имеет максимальное значение $0,778$ при $t = 0,01047 \text{ сек}$; $\omega t = 188,5^\circ$.

Значение $i_{1\text{макс}} : i_{2\text{макс}} = 1,222 : 0,778 = 1,59$ приблизительно равно значению $1,6$, полученному в примере 2.

Случай *b*. Аperiodическая составляющая затухает с постоянной времени T_c . Имеем:

$$i_0 = i_1 + i_2 = e^{-t/T_c} - \cos \omega t;$$

$$\frac{di_0}{dt} = -\frac{1}{T_c} e^{-t/T_c} + \omega \sin \omega t; \quad (14)$$

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{2R}{L_1 + L_2} i_1 = \frac{RT_c - L_2}{T_c(L_1 + L_2)} e^{-t/T_c} -$$

$$-\frac{R}{L_1 + L_2} \cos \omega t + \frac{\omega L_2}{L_1 + L_2} \sin \omega t;$$

$$i_1 = K_1 e^{-2At} + \frac{PT_c - L_2}{(2AT_c - 1)(L_1 + L_2)} e^{-t/T_c} +$$

$$+ \frac{2AC - \omega A}{\omega^2 + 4A^2} \sin \omega t - \frac{\omega C + 2A^2}{\omega^2 + 4A^2} \cos \omega t; \quad (15)$$

$$K_1 = \frac{\omega C + 2A^2}{\omega^2 + 4A^2} - \frac{RT_c - L_2}{(2AT_c - 1)(L_1 + L_2)}.$$

Полученные выражения для i_1 и K_1 являются более общими и переходят в выражения для случая *a*, если положить $T_c = \infty$. При $T_c = 0,05 \text{ сек}$:

$$\frac{RT_c - L_2}{(2AT_c - 1)(L_1 + L_2)} = 0,44; \quad K_1 = 0,212;$$

$$i_{1\text{макс}} = 1,118 \text{ при } t = 0,0096 \text{ сек}; \quad \omega t = 172^\circ 40';$$

$$i_{2\text{макс}} = 0,703 \text{ при } t = 0,00984 \text{ сек}; \quad \omega t = 177^\circ 20';$$

$$i_{1\text{макс}} : i_{2\text{макс}} = 1,58.$$

Вследствие почти одновременного достижения токами i_1 и i_2 наибольшего значения, в данном частном случае мы получим практически то же значение отношения $i_{1\text{макс}} : i_{2\text{макс}}$, если определим значения токов для $t = 0,01 \text{ сек}$, не находя наибольших значений аналитически.

Таким образом видно, что наличие аperiodической составляющей, как без учета затухания ее, так и с учетом затухания, практически не снижает отношения $i_{1\text{макс}} : i_{2\text{макс}}$, как этого можно было бы ожидать, исходя из упрощенного представления о переходном процессе, как о процессе наложения равномерного распределения аperiodической составляющей на равномерное распределение составляющей периодической (симметричной).

Литература

1. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. т. III, Госэнергоиздат, 1948.
2. Н. В. Dwight. El. Eng. стр. 536—538, № 8/9, 1946.

[21. 10. 1949]

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 35 кВ ПО СИСТЕМЕ ДПЗ (два провода—земля)

Существенными вопросами для системы ДПЗ, на которые должна дать ответы опытная эксплуатация такой электропередачи, являются следующие: 1) величина асимметрии токов и напряжений; 2) поведение линейной и подстанционной изоляции в условиях повышенного в $\sqrt{3}$ раз напряжения по отношению к земле; 3) поведение рабочих заземлений в системе ДПЗ; 4) влияние линий ДПЗ на линии связи и ряд других вопросов.

Наблюдения велись над работой двух линий электропередачи 35 кВ (рис. 1). Одна из них протяженностью 9 км включена в работу в 1945 г. и вторая, протяженностью 4 км, включена в 1946 г. Обе линии выполнены проводами МГ-50 на деревянных опорах. Подвесные гирлянды из двух изоляторов П-4,5 на промежуточных опорах и 3 на анкерных.

Практика работы линии по системе ДПЗ показала, что нагрузка фаз трансформаторов на стороне 6 кВ, а также генераторов практически равномерны, т. е. применение земли в качестве третьего рабочего провода не создает в системе сколько-нибудь заметной асимметрии. Однако, если у трансформатора, работающего от линии ДПЗ, будет полностью снята нагрузка, произойдет резкое перераспределение напряжений по фазам 6 кВ. На двух фазах напряжение по отношению к земле повышается до линейного, а на третьей фазе, заземленной на стороне 35 кВ, практически понижается до нуля. Это создает видимость появления «земли» на шинах распределительного устройства понизительной подстанции, а также на шинах генераторного напряжения цэс при подаче напряжения на нее через сеть ДПЗ с дизельной блокстанции. Однако, достаточно включить даже ненагруженную воздушную линию 6 кВ, соединенную с распределительным устройством кабелем длиной 50—100 м или трансформатор собственных нужд на шины генераторного напряжения цэс, чтобы «земля» исчезла.

Рабочее заземление выполнено отдельно от защиты и состоит из четырех рядов трехметровых труб диаметром 50 мм, забитых в землю по 7 штук в ряд в шахматном порядке на расстоянии 3 м друг от друга. Все трубы соединены железным прутом диаметром 20 мм.

Для уменьшения переходного сопротивления в почву введена поваренная соль, а электроды окружены кузнечной гарью. Пятилетняя эксплуатация четырех таких заземлений показала их надежную работу. Величина сопротивления при рабочем токе около 150 А практически не изме-

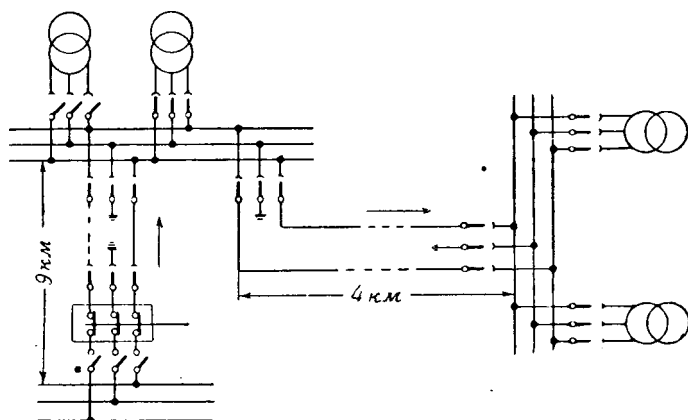


Рис. 1.

нилась. Контрольная раскопка показала, что ни трубы электроды, ни соединительные стержни, почти совершенно не подверглись сколько-нибудь заметной коррозии.

Распределение напряжения по поверхности почвы в зоне контура рабочего заземления линии ДПЗ показано на рис. 2. Измерения сделаны при рабочем токе 70 А. При резком увеличении тока в линии при коротких замыканиях в сетях потребителей и особенно на самой линии 35 кВ это напряжение достигает величины, опасной для жизни человека. При коротких замыканиях зона на расстоянии 10—15 м от границ контура заземления является опасной в отношении шагового напряжения и ограждается от проникновения в нее людей и животных.

О поведении изоляции на основе пятилетнего срока эксплуатации можно сказать, что все виды линейной и подстанционной изоляции 35 кВ вполне применимы для работы в системе ДПЗ, но требуют более тщательной проверки и выбраковки перед установкой.

Отмечается, что электропередачи, работающие по системе ДПЗ, почти не поражаются грозовыми разрядами, тогда как трехпроводные линии, проходящие в этом же районе, имели повреждения в каждую грозу.

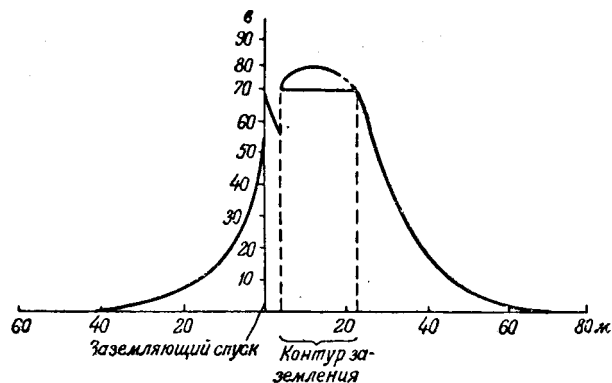


Рис. 2.

Влияние линий 35 кВ ДПЗ сказывается лишь на те линии связи, которые проходят в непосредственной близости от них. Это в первую очередь относится к линиям оперативной связи энергетической системы. Это влияние весьма сильно ослабляется применением простейших средств защиты, как, например, включением конденсаторов между проводами линии связи и землей.

Если существующая энергосистема работает по трехпроводной системе, вновь сооружаемые линии ДПЗ можно подключать к ней через разделительный трансформатор 35/35 кВ или при наличии запаса мощности на понизительных подстанциях через повысительный трансформатор, подключенный к шинам 6 кВ.

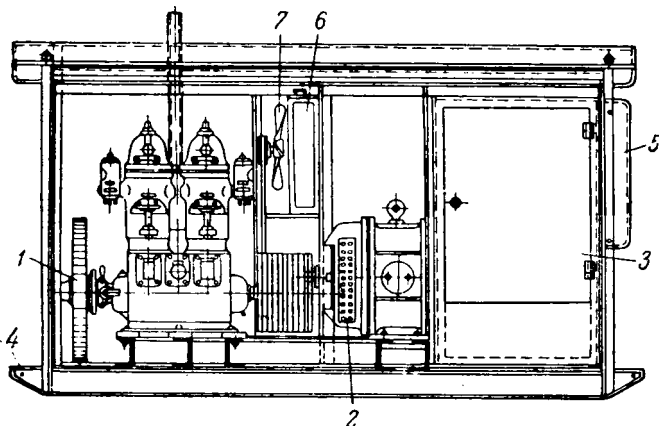
(Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности, № 11, 1949, В. К. Шибанов)

ОТ РЕДАКЦИИ

Примененный способ защиты цепей связи нельзя считать рациональным, так как он в значительной мере увеличивает затухание рабочих токов. Навесные мешающие напряжения низкой частоты также не будут устранены.

ПЕРЕДВИЖНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ДВИГАТЕЛЕМ НД-40

На Московском электромеханическом заводе организовано производство передвижных электростанций мощностью 25—275 *квт*. В настоящее время выпускаются передвижные электростанции 25 *квт* с нефтяным calorизаторным двухцилиндровым двигателем завода «Борец» НД-40, 500 об/мин. Посредством клиновидных ремней двигатель соединен с генератором трехфазного тока марки СГ-25/6 напряжением 400/230 *в* с выведенным нулем. На рисунке показан общий вид станции. Станция имеет габаритные размеры: длина 3 м, ширина 1,5 м и высота 2 м. Общий вес около 3,5 т.



Общий вид передвижной электростанции.

1—двигатель; 2—генератор; 3—распределительный щит; 4—основная рама; 5—топливные баки; 6—радиатор; 7—вентилятор.

Распределительный щит имеет аппаратуру для управления генератором, возбудителем и для распределения энергии по пяти линиям, из которых 2 трехфазных 380 *в* для силовых нагрузок, 2 однофазных 220 *в* для осветительных целей и 1 для освещения станции. В цепь обмотки возбуждения включен специальный регулятор напряжения конструкции Московского электромеханического завода, обеспечивающий постоянство напряжения на зажимах генератора при колебании нагрузки в сети. В кузове установлены баки для топлива: основной на 150 л тяжелого топлива и пусковой, меньшего размера, для легкого дизельного топлива.

Первые электростанции уже успешно работают, обеспечивая нефтеразведочные установки электроэнергией.

(Энергетический бюллетень М.Н.П., № 10, 1949, Г. С. Лопоян)

НОВАЯ СЕРИЯ РУДНИЧНЫХ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 100 *квт* типа «КУЗБАСС»

Новая серия рудничных взрывобезопасных короткозамкнутых электродвигателей «Кузбасс» предназначена для замены выпускавшихся до настоящего времени взрывобезопасных электродвигателей многочисленных типов мощностью до 100 *квт*.

В основу создания серии «Кузбасс» были положены следующие принципы: 1) достижение наибольшей прочности электродвигателей как в механическом отношении, так и в части изоляции; 2) снижение пусковых токов при улучшенных разгонных и механических характеристиках.

Повышенная прочность электродвигателей этой серии достигается благодаря: 1) выбору конструкции корпуса в виде стальной трубы, защищающей от повреждений все важнейшие узлы машины; 2) применению изоляции на стекловолноке; 3) применению открытых пазов и твердых секций у электродвигателей мощностью, начиная с 14,5 *квт* в необдуваемом исполнении и начиная с 25 *квт* в обдуваемом (при $2 p = 4$); 4) увеличению воздушного зазора примерно на 15% по сравнению с МА-140 (у некоторых двигателей); 5) применению усиленных лабиринтовых

уплотнений, предохраняющих обмотку статора от попадания смазки, а подшипник — от загрязнения; 6) улучшению конструкции выводного устройства; 7) усилением конструкции всех деталей: валов, щитов, подшипников, подшипниковых крышек, винтовых соединений и др.

Стремление снизить вес двигателя с целью облегчения переноски в подземных условиях, а также для уменьшения расхода материалов повело к применению наружного обдува, который осуществляется вентилятором из алюминиевого сплава. Устраняется также возможность возникновения открытого искрения в случае задевания вентилятора о колпак. Предусмотрено в качестве модификации необдуваемое исполнение, предназначенное для применения в сухих шахтах, где в ряде случаев нельзя допустить вдувания пыли.

Серия электродвигателей «Кузбасс» в обдуваемом исполнении осуществлена на пяти диаметрах стали статора при двух длинах в каждом диаметре с диапазоном мощностей от 8 до 100 *квт* (при 1500 об/мин синхронных). Модификация в необдуваемом исполнении осуществлена на трех диаметрах при двух длинах в каждом диаметре с диапазоном мощностей от 5 до 17 *квт* (при 1500 об/мин синхронных).

Для обеспечения надежности обмотки статора в эксплуатационном отношении в двигателях 3, 4 и 5-го габаритов применены компаундированные твердые секции (из прямоугольных проводников) и открытые пазы. В двигателях 1 и 2-го габаритов применены мягкие секции и полукруглые пазы с полукруглым дном. С целью достижения высоких пусковых токов ротор выполнен двухленточным. Числа пазов ротора выбраны близкими к числу пазов статора в таком сочетании, которое позволяет избежать больших провалов в механической характеристике.

Главнейшие монтажные размеры электродвигателей новой серии идентичны с размерами серии МА-140, что упрощает замену двигателей. Концы валов со стороны привода в серии «Кузбасс» увеличены по сравнению с серией МА-140 в связи с тем, что опыт эксплуатации двигателей МА-140 выявил недостаточную прочность валов у них для некоторых видов приводов.

Помимо основного исполнения КО в новой серии имеются две основные конструктивные модификации: а) необдуваемое исполнение и б) фланцевое исполнение.

(Вестник электропромышленности, № 12, 1949, А. Ф. Пякратьев и Г. И. Перцов)

ХАРАКТЕРИСТИКА ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ ПРИ СВЕРХВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Люминесцентным лампам свойственны значительные недостатки — ограниченная мощность, большие размеры, малая яркость, зависимость работы от температуры окружающей среды, что сужает возможности их использования. Поэтому, каждая разработка нового типа лампы, свободной хотя бы от одного из этих недостатков, заслуживает внимания. С этой точки зрения представляют интерес работы по использованию дугового разряда при сверхвысоком давлении (20—40 ат).

Колба лампы, по условиям механической и термической прочности, а также в целях обеспечения выхода ультрафиолетового излучения выполняется из плавного кварца. Зажигание дуги осуществляется посредством третьего электрода, подключаемого в момент зажигания к трансформатору Тесла. Избыточное давление создается в лампе за счет глубокого охлаждения известного объема газа. При опытах были использованы газы аргон, криптон и ксенон. Питание ламп осуществлялось постоянным током.

Из кривых рис. 3, приведенного в работе, для контрольной лампы с «холодным» (в момент зажигания) давлением около 20 ат видно, что 80% светового потока устанавливается в отличие от ртутных ламп сверхвысокого давления практически мгновенно после зажигания лампы. 100% светового потока устанавливается спустя несколько минут при установившемся тепловом режиме, когда давление в лампе увеличивается более, чем в два раза.

Стабилизация дуги (конвекцией) в этих лампах слаба. Она повышается при наличии на катоде участка с локально повышенной температурой. Это налагает свой отпечаток на конструкцию лампы.

Градиент потенциала составляет 26, 30 и 38 в/см соответственно для аргона, криптона и ксенона. Суммарное падение напряжения на электроде, наоборот, уменьшается от аргона к ксенону и составляет 16, 12 и 11 в.

Световая отдача возрастает от аргона к ксенону. При давлении 38 ат и токе 3 а она составляет для ксенона немногим менее 5 лм/вт, а при 9 а она достигает 18 лм/вт, что сравнимо со световой отдачей накальных проекционных ламп. Экономичность собственного разряда значительно выше, чем лампы в целом. Возможность конструирования лампы с длинной дугой позволила бы достичь световой отдачи 55 лм/вт. О степени яркости этого типа лампы можно судить по тому, что яркость средней части криптоновой лампы даже при небольшом сравнительно токе в 9 а составляет около 80 св при расстоянии между электродами 4 мм. В видимом участке спектра почти все излучение обусловлено интенсивным непрерывным спектром. В ультрафиолетовой области имеет место чисто непрерывный спектр, который можно проследить при достаточных экспозициях до границы поглощения его кварцем, до $\lambda = 1800 \text{ \AA}$. В инфракрасной области доля непрерывного спектра слаба сравнительно с излучением в линиях.

Распределение энергии в видимой части спектра расматриваемых криптоновых и ксеноновых ламп обуславливает хорошую цветность излучения и цветопередачу освещаемых ими объектов. Эти лампы следует отнести к источникам белого света с температурой порядка 5400° К. Освещение, даваемое ксеноновыми лампами, почти не отличается от солнечного. Непрерывный спектр в ультрафиолетовой области с достаточно большой величиной яркости делает целесообразным использование описанных ламп для исследования фотохимических процессов, изучения спектров поглощения и других целей. Видимое излучение может быть с успехом применено в кинопроекции чернотелых и, главным образом, цветных фильмов, для освещения при киносъемках, в прожекторах направленного и заливающего света.

(Известия Академии наук СССР, Отделение технических наук, № 9, 1949, Д. А. Гоухберг)

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРА В УСЛОВИЯХ РАЗРЯДА

Разряд конденсатора через малое сопротивление широко применяется для получения вспышки света при фотографировании, в радиолокационных установках для получения импульсов большой мощности, а также для воспламенения электродетонаторов (Электричество, № 3,

1945, стр. 30). Во всех этих случаях конденсатор играет роль аккумулятора электрической энергии, включаемого в цепь с малым полным сопротивлением. В этих условиях количество энергии, которое конденсатор может отдать нагрузке, т. е. внешнему сопротивлению $R_{вн}$ будет зависеть от соотношения между внешним и внутренним сопротивлением конденсатора R_k , величина которого определяется в основном сопротивлением обкладок и выводов. Энергия, отдаваемая конденсатором нагрузке, будет в этом случае равна:

$$W_{вн} = W \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_k}{R_{вн}}}$$

где W — энергия заряженного конденсатора в втсек; R_k и $R_{вн}$ — в ом.

Чем больше отличается величина R_k от нуля, тем меньше будет величина отдаваемой конденсатором энергии $W_{вн}$ по сравнению с полным запасом энергии конденсатора W . В связи с этим надо добиваться минимального значения для внутреннего сопротивления конденсатора R_k , если этот конденсатор предполагается использовать, как источник электрической энергии при быстром разряде. Для измерения величины сопротивления R_k предлагается производить разряд испытуемого конденсатора через баллистический гальванометр (включаемый в цепь через вакуумный термоэлемент), последовательно с которым включено активное сопротивление известной величины. Особое внимание при таком измерении надо обращать на сопротивление ключа, с помощью которого производится включение конденсатора, так как это сопротивление складывается с внутренним сопротивлением испытуемого конденсатора. Автор предлагает использовать для этой цели специальный ртутный выключатель с весьма малым сопротивлением. При испытании разрядного бумажного конденсатора емкостью 0,12 мкф и рабочим напряжением 12 кв постоянного тока, пропитанного пентахлордифенилом, было получено значение сопротивления R_k порядка 0,5 ом. При таком значении сопротивления R_k и сопротивления разрядной цепи, равном 5 ом, энергия, отданная конденсатором при разряде, будет составлять 91% от полной энергии, полученной при заряде. Влияние последовательного внутреннего сопротивления конденсаторов следует учесть нашим организациям, занимающимся применением конденсаторов в качестве источника электроэнергии при кратковременном разряде на малое сопротивление.

[Pr. I.R.E. т. 37, № 6, 1949. S. Melton]

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

ЗА РУБЕЖОМ

МАГНИТОЭМУЛЬСИОННЫЕ МУФТЫ

(Обзор)

Такая муфта состоит из двух параллельных поверхностей, разделенных воздушным зазором, заполненным смесью масла и тонкого стального порошка. Эти поверхности могут быть выполнены в виде двух параллельных дисков (дисковый тип) или концентрических цилиндров (цилиндрический тип). На одной из половин муфты помещена катушка, создающая магнитный поток в зазоре между поверхностями. Если магнитный поток отсутствует, то момент, передаваемый ведущей частью муфты на ведомую, создается лишь за счет вязкости жидкости и, вообще говоря, не велик. При включении возбуждающей катушки слой стального порошка в зазоре как бы уплотняется под воздействием магнитного потока и образует надежное сцепление ведущей и ведомой частей.

Передаваемое усилие, по данным Бюро стандартов (Bureau of Standards), где были поставлены испытания с различнообработанными поверхностями — полированными, чисто обточенными, ободранными — не зависит от состояния поверхности. По опытам же лаборатории «Дженерал Электрик» при насеченной поверхности это усилие возрастает, особенно при увеличении индукции в зазоре [Л. 2].

Очень важен правильный выбор масло-стальной смеси. Жидкость не должна содержать серы, иначе вследствие ее

химического воздействия на сталь магнитная проницаемость смеси и передаваемый момент снижаются. Вязкость жидкости должна быть невелика для уменьшения момента при обесточенной катушке. Соотношение между весом стального порошка и весом жидкости обычно берется 5:1. При меньших соотношениях будет мала проницаемость смеси, что потребует увеличения катушки, при больших — вязкость смеси будет слишком велика. Проницаемость смеси при соотношении 5:1 примерно в 8 раз больше проницаемости воздуха. Для порошка обычно применяется карбонильное железо. Размер частиц — порядка 40 мкм. Если вместо карбонильного железа взять порошок из нержавеющей стали, то при одинаковом соотношении весов порошка и масла передаваемый момент уменьшится в 1,6 раза [Л. 1]. В качестве жидкости может быть взят керосин или машинное масло. Особенно рекомендуется кремнийорганическое масло с высокой температурой вспышки и малой вязкостью.

Важно также правильно выбрать тепловой режим, особенно для муфт, работающих с регулировкой скорости или же в режиме тормоза, т. е. со скольжением. Муфта может рассеять 0,15 вт/см² при малой скорости и естественном охлаждении и до 0,64 вт/см² при большой скорости и уси-

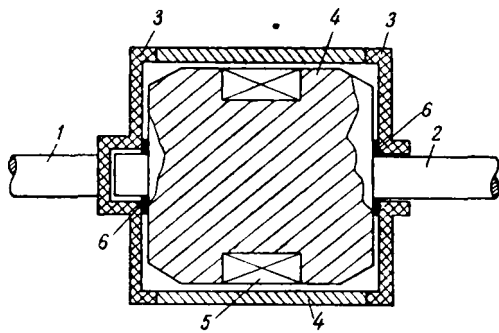


Рис. 1. Схема цилиндрической магнитоэмulsionной муфты.

1—ведущий вал; 2—ведомый вал; 3—фланцы из немагнитного материала; 4—магнитный материал; 5—обмотка электромагнита; 6—уплотнения подшипников.

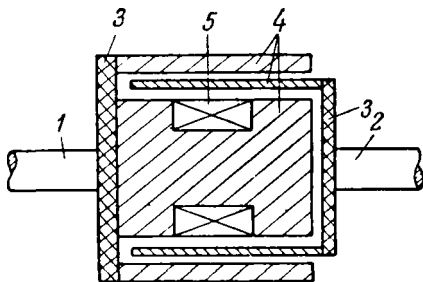


Рис. 2. Схема магнитоэмulsionной муфты с несколькими поверхностями трения.

1—ведущий вал; 2—ведомый вал; 3—детали из немагнитного материала; 4—детали из магнитного материала; 5—обмотка электромагнита.

ленным облуде. Для увеличения охлаждающей поверхности могут быть применены ребра. Возможно также и применение водяного охлаждения. При повышении температуры внутреннее давление может повыситься настолько, что могут быть разрушены уплотнения [Л. 3]. Чтобы предохранить муфту от этого, необходимо стремиться уменьшить объем смеси в ней. Кроме того, применяются специальные расширительные бачки на корпусе [Л. 1, 4] и даже автоматическое отключение муфты при повышении давления выше определенного предела.

Уплотнения должны предупреждать утечку жидкости и повреждение подшипников вследствие попадания стальных частиц. Для этой цели служат также магнитные ловушки, представляющие из себя кольцеобразные постоянные магниты, размещенные между уплотнениями и подшипниками [Л. 1, 5].

Наиболее удобным считается цилиндрический тип муфты, схематически изображенный на рис. 1. Ее достоинства сравнительно с дисковой — это отсутствие осевого давления, меньший диаметр (что важно для скоростных приводов) и меньший вес.

Для передачи больших моментов применяется муфта с несколькими поверхностями трения по схеме рис. 2. Такая конструкция имеет небольшой момент инерции ведомой части, что зачастую бывает важно (например, для сервоприводов). Для снижения момента, возникающего вследствие вязкости смеси, может быть применено механическое увеличение зазора между поверхностями при выключении возбуждения [Л. 4].

По экспериментальным данным при индукции в зазоре $B = 8000$ гс, тангенциальное усилие в зазоре получается около $0,73$ кг на 1 см² рабочей поверхности.

Зависимость передаваемого момента от ампервитков для муфты, передающей 40 л. с. при 1800 об/мин и диаметром $6''$ ($152,4$ мм), дана на рис. 3 [Л. 2]. В пределах от 0 до номинального момента (16 кгм) эта зависимость практически линейна. Зависимость передаваемого момента

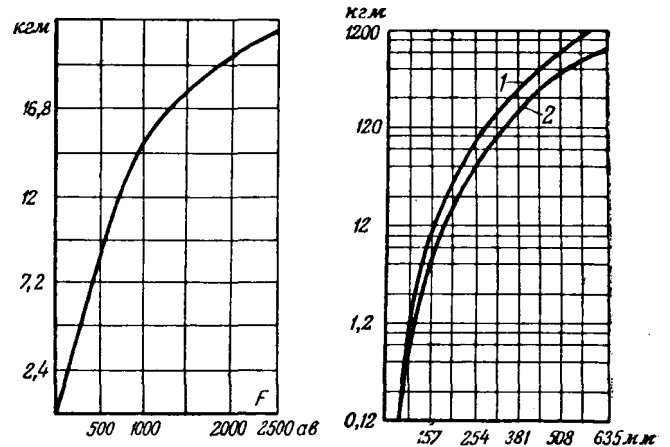


Рис. 3. Зависимость вращающего момента от ампервитков возбуждения F .

Рис. 4. Зависимость вращающего момента от диаметра муфты.

1—поверхности с насечкой; 2—поверхности без насечки.

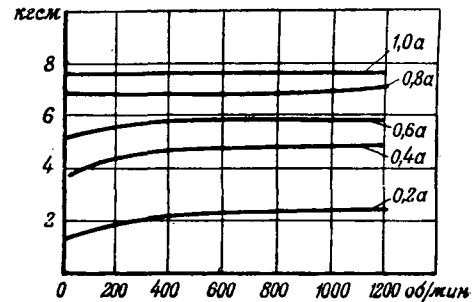


Рис. 5. Зависимость вращающего момента от числа оборотов при различных величинах тока в обмотке электромагнита.

от размеров муфты дана на рис. 4 [Л. 2]. От скорости вращения муфты, как это видно на рис. 5 [Л. 1], он почти не зависит.

Переходные процессы в муфте проходят весьма быстро. Так, например [Л. 1], приводятся осциллограммы, показывающие, что через $1/30$ — $1/60$ сек после включения тока муфта уже передает полный момент. То же относится и к размыканию муфты. Для возбуждения может быть использован переменный ток, что, однако, не рекомендуется, так как усложняет расчет и конструкцию муфты.

Катушка, создающая магнитный поток, может быть также размещена на неподвижной части муфты, вне поверхности трения. Такое расположение позволяет отказаться от контактных колец и уменьшить момент инерции вращающихся частей [Л. 1].

Сравнительно с обычными фрикционными муфтами тот же передаваемый момент габариты и вес описываемых муфт больше, а мощность намагничивающих катушек — меньше.

Область применения этих муфт очень широка. Они применяются в автомобилях, в приводах гребных винтов на судах с двигателями дизеля, в сервомеханизмах, как усилители мощности, как демпферы, сглаживающие ударную нагрузку, для приводов с регулировкой скорости, как тормоза и динамометры.

При применении в муфтах постоянных магнитов они могут быть использованы как предохранители от перегрузки.

Литература

1. Transactions of the AIEE, т. 67, стр. 1308 — 1315, 1948.
2. General Electric Review, стр. 39 — 43, № 12, 1949.
3. Machine Design, стр. 98 — 102, № 5, 1949.
4. La Machine Moderne, стр. 45 — 46, № 473, 1948.
5. Instruments, т. 21, стр. 756 — 764, № 8, 1948.

Инж. Ю. И. АНОСОВ

К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей¹

(Электричество, № 1, 1950)

Инж. Е. Н. ПРИКЛОНСКИЙ

НИИ Министерства химической промышленности

Вторая редакция ГОСТ на номинальные напряжения сохраняет ряд недостатков первой редакции. Одна крайность первой редакции заключалась в том, что существующее напряжение 500 в заменялось слишком близким ему 660 в. Новая редакция имеет другую крайность: взамен 500 в рекомендуется 1 000 в.

Для выявления недостатков новой редакции ГОСТ прежде всего необходимо опровергнуть ошибочное мнение о том, что следует немедленно исключить напряжения 500 в из шкалы напряжений. Именно сейчас, как никогда в прошлом, выявилась целесообразность его широкого применения. Оно существует на ряде электрических установок Советского Союза и за границей. Для него уже имеется разработанная серия электродвигателей, трансформаторов, рубильников, предохранителей, проводов и кабелей с резиновой изоляцией, пусковой и защитной аппаратуры. Имеются все основания полагать, что даже в будущем, после освоения массового выпуска электрооборудования на повышенное напряжение 660, 865 или 1 000 в, напряжение 500 в во многих случаях окажется более экономичным.

Обоснование этому дает рассмотрение истории развития техники электроснабжения.

В прошлом считалось целесообразным применение напряжения 380/220 в, так как предполагалось экономически выгодным использование возможностей объединения силовой и осветительной нагрузки на трансформаторы и на распределительные сети. Между тем это напряжение было одинаково неблагоприятным как для осветительной, так и для силовой сети.

Для осветительной сети оно неблагоприятно как предельное по технике безопасности и требующее усложнения монтажа групповой разводки и зануления. Кроме того, при нем требуется применение ламп накаливания на 220 в, при котором световой поток на $9 \div 24\%$ меньше, чем при $110 \div 127$ в.

Для силовой сети напряжение 380 в приводит к неполному использованию изоляции электродвигателей, одинаковой для машин до 500 в. Также при нем мы имеем возможность использовать простую и дешевую пусковую и защитную аппаратуру в виде рубильников и предохранителей. Напряжение 500 в является предельным, при котором дугообразование сохраняет неустойчивость, поэтому при любом более высоком напряжении, видимо, будет необходима замена рубильников на автоматы с разъединителями.

В настоящее время считается доказанным нецелесообразность объединения силовой и осветительной нагрузки на трансформаторы и на распределительные сети. Объясняется это тем, что силовая нагрузка с наличием отстающего коэффициента мощности приводит к большим потерям напряжения в трансформаторах. Это ограничивает допустимое падение напряжения в осветительной сети. Экономичность ламп накаливания при сниженных напряжениях сильно уменьшается. Следовательно, при объединении нагрузки на кабели допустимые падения напряжения из-за соображений небольшой осветительной нагрузки должны

быть снижены для относительно большой силовой нагрузки, приводя к неоправданному перерасходу цветного металла. При выделении для осветительной нагрузки своих трансформаторов и фидеров питания напряжение 380/220 в не сохраняет никаких преимуществ по сравнению с 500 в.

На этом основании была предложена новая схема электроснабжения с внедрением местной трансформации напряжения для осветительной нагрузки непосредственно в цехах или даже у отдельных групповых сборок с использованием сухих трансформаторов типа ТС. В этих условиях возможен независимый выбор напряжения как для силовой, так и для осветительной нагрузки. При этом выявлено, что для освещения вполне целесообразна местная трансформация напряжения на 220/127 в (даже с напряжения 380/220 в). Этим обеспечивается снижение расхода электроэнергии на освещение, которое в короткие сроки окупает все дополнительные затраты на местную трансформацию и на утяжеление групповой осветительной сети. Все это указывает на то, что необходимо немедленное широкое внедрение системы 500 и 220/127 в, так как напряжение 380 в для силовой сети не сохраняет никаких преимуществ.

При исключении 500 в из ГОСТ неизбежно использование экономически неблагоприятного напряжения 380 в, которое приводило и будет приводить к общему увеличению затрат на установку.

В настоящее время имеется простой метод для количественного определения перерасхода. Надо учесть, что оптимальное число подстанций может приблизительно приниматься обратно пропорциональным половинной или первой степени от напряжения. Такая зависимость выявлена многими авторами математических методов определения количества подстанций. Следовательно, с уменьшением напряжения с 500 до 380 в стоимость основной зависимой части подстанций увеличится в среднем на 18%. Далее нашими исследованиями показано, что при оптимальном решении соотношения этих зависимых от напряжения частей расхода по подстанциям к расходу на распределительные сети должно оставаться неизменным. Следовательно, на те же 18% увеличатся расходы на распределительные сети. Как показывают расчеты для нормальных заводских условий абсолютная величина перерасхода может составить 14 руб/кв.а.

Аналогичным способом мы получим уже не перерасход, а экономию по зависимой части электрохозяйства для новых повышенных напряжений по сравнению с 380 в (без учета удорожания машин и аппаратов). Подсчеты показывают, что в обычных заводских условиях проценты экономии будут:

- При 660 в — 33% (26 руб/кв.а)
- „ 865 в — 45% (35 руб/кв.а)
- „ 1 000 в — 50% (39 руб/кв.а)

Однако, с внедрением этих повышенных напряжений имеет место удорожание электродвигателей, а также пусковой и соединительной аппаратуры. Оценка этого удорожания в настоящее время затруднительна. Тем не менее ориентировочные прикидки показывают, что отказ от 500 в и переход на новые напряжения 660, 865 или 1 000 в, видимо, может оправдываться лишь при условии установки электродвигателей средней мощностью более 6 квт.

¹ См. Электричество, № 4 и 5, 1950.

При сохранении напряжения 500 в в шкале стандартных напряжений система 865 в имеет технические преимущества по сравнению с системой 1 000 в. Напряжение 865 в связано с напряжением 500 в коэффициентом 1,73. Это создает возможность разработки одной серии машин на 865/500 в, аналогично существующей серии 380/220 в. Поэтому следует оставить в ГОСТ напряжение 500 в, а рекомендуемое новое напряжение 1 000 в заменить напряжением 865 в.

Инж. М. М. ЛЕБЕДЕВ

Лаборатория электротехники Академии наук Армянской ССР

На расширенном совещании в феврале 1949 г. Лаборатории электротехники Академии наук Армянской ССР совместно с Армянским отделением ВНИТОЭ, посвященном обсуждению проекта стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей, было высказано единодушное одобрение восстановлению в новом стандарте напряжения 20 кВ, как выгодного для сельской электрификации. Отмечена необходимость проведения дополнительных исследований в диапазоне 35—110 кВ для проверки введения в стандарт напряжения 60 кВ.

В результате обсуждения нового проекта стандарта Лаборатория электротехники считает необходимым сделать следующие замечания по предлагаемой шкале напряжений и дискуссионным статьям, опубликованным в журнале «Электричество», № 1, 1950 г.:

1. Отметить с удовлетворением введение в шкалу напряжения 1 000 в для электрификации сельского хозяйства, промпредприятий и городских сетей.

2. Необходимо чтобы примечание к напряжению 500 в было правильно понято заводами-изготовителями для безболезненного обеспечения существующих установок соответствующим оборудованием.

3. Включение в стандарт напряжения 310 кВ предлагаемого в дискуссии А. А. Горевым, как промежуточное между 220 и 380 кВ, является несколько преждевременным ввиду недостаточной изученности условий производства аппаратуры для напряжения выше 220 кВ. В настоящее время достаточно стандартизировать лишь одно напряжение выше 220 кВ, на котором сконцентрировать все работы научных и производственных организаций. В первую очередь должно быть стандартизировано напряжение, безусловно, необходимое для межрайонных связей, каковым на основании всех проработок является напряжение порядка 400 кВ.

Инж. И. Л. КОВАЛЬСКИЙ

Москва

Целесообразность питания коротких неразветвленных силовых сетей с электроприемниками малой мощности при напряжении 380 в является вполне очевидной, тогда как применение напряжений 380 или 500 в для приемников средней мощности, а также для электросетей разветвленных и большой протяженности при сравнительно малых нагрузках, едва ли может быть оправдано, так как в этих случаях появляются излишние затраты цветных металлов и потери электроэнергии.

Как правило, вследствие малой пропускной способности питающей линии с напряжением 380 и 500 в приходится прибегать к более высокому напряжению — 6 000 в, что вызывает значительное удорожание установки: вместо низковольтных распределительных шкафов и простой пусковой аппаратуры уже требуются сложные и дорогостоящие высоковольтные распределительные устройства и щиты управления. Между тем, в большинстве случаев, вполне возможно было бы ограничиться напряжением 1 000 в, при котором пропускная способность линий довольно велика, а номинальная мощность электродвигателя может достигать 250—300 кВт.

Если в распределительных сетях при напряжении 380 в принято считать нормальной нагрузку на каждую линию не больше 100 кВт, то при напряжении 1 000 в этот предел возрастет до 275—300 кВт, что резко сократит количество линий, распределительных щитов и силовых пунктов. Кроме того, представится возможность значительно увеличить количество двигателей, питаемых от одной группы, что является весьма важным при широком внедрении поточной системы производства. Получится вполне ощутимая экономия средств, которая может быть примерно определена, если сравнить следующие три варианта электроснабжения даже небольшого предприятия, на котором распределительная сеть выполняется с трансформаторными подстанциями: 6/0,4; 6/0,1 и 35/0,1 кВ.

Технико-экономическое сравнение этих трех вариантов показывает, что по второму варианту капитальные затраты составляют 81% от затрат по первому, т. е. общепринятому варианту, а ежегодные расходы — 90%. Еще большую экономию дает третий вариант, так как в этом случае ежегодные расходы получаются равными 70% при капитальных затратах 84%.

Если подсчитать экономию, которую мы можем получить от повышения эксплуатационного напряжения силовых сетей до 1 000 в не только на предприятиях цветной металлургии, но и по всему Союзу, то она покроет в несколько лет те затраты, которые вызовет проведение этого мероприятия. Поэтому необходимо поднять вопрос об изготовлении электрооборудования для напряжения 1 000 в.

Предельной допустимой величиной эксплуатационного низкого напряжения для электродвигателей и коммутационной аппаратуры переменного тока у нас в Союзе принято считать 500 в, по условиям возникновения и гашения электрической дуги. Кроме того, считается нежелательным превышение этого предела из соображений безопасности обслуживающего персонала.

Первый аргумент в наши дни утратил свое значение, в связи с появлением усовершенствованной коммутационной аппаратуры (деионные выключатели, контакторы с дугогасящими решетками и пр.). Второй мотив также не является вполне обоснованным, поскольку условия безопасности обслуживания электроустановок могут быть в одинаковой степени обеспечены как при напряжениях 380—500 в, так и при напряжении 1 000 в. Статистические данные говорят, что почти всегда количество несчастных случаев бывает значительно больше при низких напряжениях, нежели при высоких. Объясняется это тем, что чем ниже напряжение, тем чаще обслуживающий персонал практически пренебрегает правилами безопасности. Следовательно, борьба с несчастными случаями на электротехнических установках должна вестись не по линии снижения эксплуатационного напряжения, а по пути неуклонного выполнения правил эксплуатации и безопасности.

Таким образом, видимых препятствий к введению стандартного напряжения 1 000 в в настоящее время не имеется, поэтому необходимо это мероприятие осуществить как можно быстрее.

Инж. Л. А. ДУБИНСКИЙ

Ленинградское отделение Гидроэнергопроекта

Наименование ГОСТ в первой редакции было более коротким и более удачным. Упоминание генераторов и приемников совершенно излишне. Логичнее было бы включить также и трансформаторы и аппаратуру, что, однако, чрезмерно удлинит наименование.

По § 1. В первой редакции данный параграф также был сформулирован более удачно. Непонятно, почему следует считать трансформаторы и аппаратуру «работающими в сети», а генераторы — «подключенными к сети», что относится и к § 3.

По табл. 2. Введение по второй редакции напряжения 1 000 в является в принципе более предпочтительным, чем 660 в. Однако, его применение встретит значительные трудности в связи с отсутствием аппаратуры на 1 000 в. С этой точки зрения напряжение 660 в может оказаться более приемлемым, так как для него в значительном числе случаев могла бы быть использована имеющаяся аппара-

тура на 500 в. Упомянутое мы считаем важным преимуществом напряжения 660 в.

По табл. 3. Поскольку напряжения генераторов 13,8 и 15,75 кВ допускаются к применению лишь при отсутствии потребителей на генераторном напряжении, то непонятно, о наличии каких «значительных технико-экономических преимуществ» идет речь. Следовало бы сохранить в стандарте лишь одно из этих номинальных напряжений для генераторов, а именно 15,75 кВ. Это напряжение следует дать без скобок и указать для него соответствующее номинальное напряжение, равное 15 кВ, а также наивысшее напряжение сети, равное 17,5 кВ.

Номинальное напряжение сети 60 кВ следует поместить в стандарт без скобок.

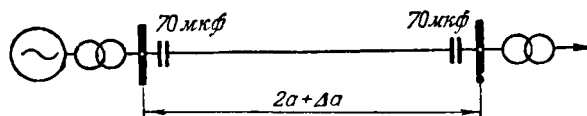
Кандидат техн. наук Н. Ф. РАКУШЕВ

Куйбышевский индустриальный институт
им. Куйбышева

Применительно к линиям дальней электропередачи энергии проект стандарта на номинальные напряжения является недостаточно продуманным, ибо он не учитывает тех качественных сдвигов, которые наметились в этой области. Трудности, которые появляются при передаче значительных мощностей на большие расстояния, возникают в силу необходимости обеспечить достаточный запас устойчивости для параллельной работы энергосистем, связанных длинной линией. Количественное накопление этих трудностей, начиная с некоторого предела, требует качественно нового решения вопроса о дальней передаче энергии: необходимо использовать продольно-емкостную компенсацию индуктивного сопротивления линий посредством последовательных конденсаторов. В этом и заключается то качественно новое, что дает нам техника ближайшего будущего в области передачи энергии переменным током.

На основании длительного изучения данного вопроса мы можем высказать следующее положение: имеются все основания считать, что отечественная промышленность может наладить массовый выпуск последовательных конденсаторов для компенсации линий электропередачи напряжением от 60 до 220 кВ включительно с вполне удовлетворительными показателями как по надежности, так и по стоимости. Но в таком случае следует учитывать то обстоятельство, что, во-первых, пропускная способность линий значительно возрастет и, во-вторых, дальность электропередачи при одинаковом исходном напряжении также резко увеличится.

Примем в качестве основы простейшую схему продольной компенсации одной цепи по нижеследующему рисунку.



Предполагая, что каждая цепь работает в связанной схеме электропередачи, можно получить мощности и дальности, приведенные в таблице.

Напряжение, кВ	Номинальные		Длительные аварийно-перегрузочные мощности, тыс. кВт	Длина, км		Полная дальность передачи, км
	Натуральная мощность, тыс. кВт	Передаваемая мощность, тыс. кВт		Полной компенсации 2a	Допустимой нескомпенсированной Δa	
60	9	25	50	230	20	250
110	30	50	80	230	70	300
155	60	75	120	230	100	330
220	120	150	225	230	130	360
310	240	300	450	230	170	400

Примечание. Принято $\chi = 0,4 \text{ ом/км}$.

Нарастив рассматриваемую цепь еще одним таким же звеном, можно увеличить дальность дополнительно на длину полной компенсации 2a, т. е. на 230 км и осуществить уверенную передачу энергии на расстояние до 500 км при 110 кВ и до 700 км при 310 кВ.

Обстоятельная проверка на экономическую плотность тока и устойчивость при аварийной перегрузке может повести к некоторому снижению указанных в таблице дальностей, однако окончательные выводы от этого не изменятся, а сводятся они к следующему.

1. Использование продольно-емкостной компенсации позволяет для заданной передаваемой мощности снизить напряжение линии, по крайней мере, на одну ступень стандарта.

2. Применение продольно-емкостной компенсации требует сгущения шкалы напряжений.

Таким образом, те разрывы, которые допущены в проекте между 35 и 110 кВ, а также между 220 и 400 кВ, — недопустимы. Попытка прикрыть первый из указанных пробелов введением напряжения 60 кВ, в качестве не рекомендованного, должна быть признана неприемлемой. Мы не видим никаких оснований к тому, чтобы ставить напряжение 60 кВ в скобки. Все стандартизированные напряжения должны быть полностью равноправны и, как явствует из таблицы, линии 60 кВ с продольно-емкостной компенсацией во многих случаях по своим показателям могут поспорить с обычными линиями 110 кВ.

Таблица позволяет сделать еще один существенный вывод. Если работать не по связанной, а по блочной схеме, то три компенсированные цепи 310 кВ в состоянии будут передавать 1000 тыс. кВт на расстояние 800—900 км так как величина допустимой аварийной перегрузки в этом случае может быть снижена до 15%. За счет этого удастся повысить остаточную длину Δa и одновременно поднять передаваемую мощность до 350 тыс. кВт на цепь. Но тогда на ближайшие 10 лет напряжение 400 кВ вообще может не понадобиться. Существенно отметить, что отпадает необходимость в наиболее высоком напряжении, а значит и наиболее дорогое, трудное для освоения оборудование.

Разумеется, необходимо осваивать новые виды оборудования, но это должно быть оборудование, дающее наибольший технический и экономический выигрыш. Таким именно оборудованием являются последовательные конденсаторы. Как показывают расчеты, достаточно выпустить всего лишь два типа конденсаторов — для линий 110 и 155 кВ. Парно-последовательное включение позволит применить их и для компенсации линий 220 и 310 кВ, причем такое решение оказывается даже более дешевым, нежели использование конденсаторов, изготовленных специально для этих двух напряжений. Одновременно конденсатор типа 110 кВ вполне пригоден для линий 60 кВ, обеспечивая им указанные в таблице показатели работы. При переходе от одного напряжения к другому достаточно менять лишь корпус и внешнюю изоляцию, сохраняя один и тот же тип рабочей части конденсатора.

Недооценка возможностей продольно-емкостной компенсации приведет к очень неприятным последствиям. Наглядным примером этого является строящаяся шведская энергосистема 380 кВ. Для передачи незначительной мощности 300 тыс. кВт до ближайшей точки сети 220 кВ (около 470 км) вполне можно было бы воспользоваться напряжением 220 кВ. Достаточно было бы взять 2 цепи с продольно-емкостной компенсацией, несущие каждая по 150 тыс. кВт в нормальных условиях и по 225 тыс. кВт при аварийных перегрузках. Вместо этого строится одна цепь 380 кВ с раздвоенными фазами, которая по стоимости и, самое главное, по надежности заметно уступает предыдущему варианту.

Массовое строительство линий 400 кВ, вместо компенсированных 220 и 310 кВ, приведет к огромному перерасходу средств и электрооборудования. Как раз к этому и ведет рассматриваемый проект стандарта с его шкалой напряжений.

Наши выводы сводятся к следующему.

1. Включить в шкалу напряжение 60 кВ на полностью равных правах со всеми остальными напряжениями.

2. Включить в стандарт и напряжение 310 кВ как, безусловно, экономически и технически целесообразное для дальних линий электропередачи.

3. Для сверхдальних линий, в качестве перспективного, следует принять напряжение 400 кв. В этом случае при полной поперечной и продольной компенсации линия 400 кв сможет передать мощность 400 тыс. квт на цепь на расстояние 1 500—2 000 км с вполне удовлетворительными показателями. Надобности в этом напряжении до 1960 г. при указанных ранее условиях может и не встретиться.

4. Напряжение 154 кв округлить до 155 кв (половина 310 кв).

Таким образом, шкала рассмотренных напряжений будет выглядеть следующим образом:

$$U_n = 60 \quad 110 \quad 155 \quad 220 \quad 310 \quad 400 \text{ кв.}$$

Вместе с тем необходимо поставить вопрос об освоении последовательных конденсаторов на 110 и 155 кв с выпуском их в промышленном количестве в 1953—1954 гг.

Правила устройства электротехнических установок¹

Кандидат техн. наук И. Ф. ПОЛОВОЙ

Ленинградское отделение Гидроэнергопроект

По разделу «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 000 в» необходимо сделать следующие замечания. Воздушные промежутки на подстанциях (распределительных устройствах) являются элементом изоляции, поэтому их электрическая прочность должна быть согласована с электрической прочностью изоляции аппаратуры высокого напряжения подстанций. Завышение воздушных промежутков приводит к необоснованному увеличению общих габаритов сооружений, тогда как их уменьшение приводит к снижению общего уровня изоляции. Кроме того, при выборе воздушных промежутков во всех необходимых случаях должны учитываться требования безопасности. Воздушные промежутки принято характеризовать величинами разрядных напряжений. Поэтому при согласовании их электрической прочности целесообразно исходить из разрядных напряжений внешней изоляции аппаратуры высокого напряжения. Разрядные напряжения воздушных промежутков как при импульсах, так и при рабочей частоте должны быть не ниже, чем у внешней изоляции аппаратуры высокого напряжения. На этом основании могут быть выбраны минимальные допустимые расстояния на подстанциях и в распределительных устройствах, которые при жесткой ошиновке соответствуют расстояниям в свету между токоведущими частями различных фаз и между ними и заземленными частями.

Мокроразрядные напряжения рабочей частоты не характерны для воздушных промежутков, и производить выбор целесообразно по сухоразрядным напряжениям рабочей частоты и по 50-процентным разрядным напряжениям при импульсах. По материалам исследований ВЭИ могут быть установлены сухоразрядные напряжения рабочей частоты для внешней изоляции аппаратуры высокого напряжения и для воздушных промежутков, а также 50-процентные разрядные напряжения при импульсах для внешней изоляции аппаратуры. По материалам исследований Ленинградского политехнического института можно установить 50-процентные разрядные напряжения при импульсах для воздушных промежутков². При этом получают значения минимальных допустимых воздушных промежутков, приведенные в таблице 5.

Практика эксплуатации электрических установок показала, что высота расположения голых токоведущих частей 2 500 мм при рабочем напряжении ниже 1 000 в обеспечивает безопасные условия. Для подстанций и распределительных устройств напряжением выше 1 000 в можно принять соотношение

$$h_0 = 2\,500 + S_{мин}$$

где $S_{мин}$ — минимальное допустимое воздушное расстояние для подстанций данного рабочего напряжения.

При этом можно допустить: высоту расположения нижних фланцев аппаратов с изоляцией из нескольких элементов (разрядники, разъединители) без ограждений —

2 500 мм; расстояние от токоведущих частей до сплошных ограждений, исключаяющих просовывание рук, равным минимальным допустимым воздушным расстояниям подстанций; расстояние от токоведущих частей до барьерных ограждений — увеличенным против $S_{мин}$ на 500—750 мм, чтобы исключить разряд на неосторожно протянутую руку.

Замечания по принятым величинам воздушных промежутков. а) Сравнение величин минимальных допустимых воздушных промежутков, приведенных в табл. 1 настоящих замечаний с таковыми, принятыми в табл. 1 «Правил» (§ 53), показывает, что последние являются заниженными для подстанций всех напряжений, кроме 220 кв. Это занижение составляет около 33% для подстанций 20 кв и, постепенно уменьшаясь, доходит до нуля для подстанций 220 кв. Этим нарушается условие равной прочности с остальной изоляцией подстанций и снижается надежность эксплуатации.

б) Принцип построения расстояний табл. 2 рассматриваемого раздела «Правил» (§ 54) несколько неясен. Соответствующие значения логично получать, как

$$R = S_{мин} + a,$$

где $S_{мин}$ — минимальное допустимое воздушное расстояние;

a — добавочный член, учитывающий расстояние, на которое может неосторожно попасть за барьер рука человека.

Очевидно, что значение a не должно зависеть от рабочего напряжения установок. Между тем в табл. 2 «Правил» оно принято различным, а именно:

Напряжение, кв	35 и ниже	110	154	220
Расстояние a	600	750	600	500 мм

в) Величины табл. 3 «Правил» (§ 55) следовало бы определять так:

$$C = 2\,500 + S_{мин}$$

При этом, если воспользоваться значениями $S_{мин}$, принятыми в «Правилах» (§ 53), получаются следующие цифры, которые для подстанций 110 кв расходятся с цифрами, принятыми в § 55 «Правил».

Рабочее напряжение, кв	35 (и ниже)	110	154	220
Величина C	2 900	3 500	4 000	4 500 мм

г) § 57 «Правил» предусматривает выбор габаритов до транспортируемого оборудования по условиям безопасности (по табл. 2 § 55 «Правил»), а не по условиям электрической прочности. Такой подход был бы обоснован только при необходимости нахождения на транспортируемом оборудовании обслуживающего персонала. Однако, эта возможность не предусматривается самими «Правилами», так как для этого расстояния табл. 2 «Правил» недостаточны. Расстояния до транспортируемого оборудования значительно

¹ Обращение редакции к читателям, в связи с обсуждением Правил, напечатано в № 11 журнала, стр. 93, 1949 г. Выступления по дискуссии см. Электричество, № 12, 1949 г., №№ 3 и 4, 1950 г.

² А. А. Горев и Б. М. Рябов, Импульсные характеристики линейной изоляции. Электричество, № 10, 1945.

но влияют на общие размеры подстанций. Поэтому во всех тех случаях, когда транспортирование производится по специальной дороге (например, рельсовый путь) имеет смысл сократить их до значений $S_{мин}$.

д) В тексте рассматриваемого раздела «Правил» нет специального упоминания о расстояниях от ножей разъединителей в отключенном положении до заземленных и токоведущих частей. Однако, это расстояние зафиксировано на чертеже фиг. 1 «Правил» и установлено равным расстоянию от токоведущих частей до барьерных ограждений.

Эти указания не согласованы между собой. Достаточно взять расстояние до заземленных частей равным минимальному допустимому воздушному расстоянию $S_{мин}$, а до токоведущих частей равным расстоянию от ножей в отключенном положении до губок разъединителей, которое меньше, чем расстояние, предусмотренное «Правилами».

В § 74 «Правил» даются воздушные расстояния для закрытых подстанций. Эти расстояния выбраны с уменьшением для напряжения 110 кВ против необходимых (табл. 5) по условиям коммутационных перенапряжений и совершенно не учитывают требований к импульсной прочности воздушных промежутков. Между тем большинство закрытых подстанций 35 кВ и выше имеют воздушные линии передачи и подвержены одинаковой с открытыми подстанциями опасности со стороны блуждающих волн грозового происхождения.

Предложения. 1. В § 53 изменить табл. 1 «Правил», приняв в ней следующие величины (табл. 1):

Таблица 1

Номинальное напряжение в кВ	10 и ниже	15	20	35	110	154	220
Расстояние А (фиг. 1), в свету в см	30	35	40	55	120	150	200

2. В § 55 изменить табл. 2 «Правил устройства», приняв в ней следующие величины (табл. 2):

Таблица 2

Номинальное напряжение в кВ	35 и ниже	110	154	220
Расстояние В (фиг. 1) в свету в см	105	170	200	250

3. В § 56 изменить табл. 3 «Правил устройства», приняв в ней следующие величины (табл. 3):

Таблица 3

Номинальное напряжение в кВ	35 и ниже	110	154	220
Расстояние С (фиг. 1) в свету в см	300	370	400	450

4. § 57 изменить, придав ему следующую формулировку: «Неограждаемые токоведущие части должны быть расположены так, чтобы расстояния от них до габаритов транспортируемого оборудования не были меньше:

а) значений табл. 1, если транспортировка производится по рельсам или по специальной дороге, фиксирующей положение транспортных средств;

б) значений табл. 2 в остальных случаях.

5. Внести в текст «Правил устройства» следующий параграф, фиксирующий расстояние (Е) от ножей разъединителей в отключенном положении до токоведущих и заземленных частей.

Расстояние от ножей разъединителей в отключенном положении до заземленных частей должно быть не менее величины А табл. 1, а расстояния до токоведущих частей должны быть не менее значений табл. 4.

Таблица 4

Номинальное напряжение в кВ	20 и ниже	35	110	154	220
Расстояние Е (фиг. 1) в свету в см	50	60	120	170	220

6. § 74 «Правил» изложить следующим образом.

§ 74. Для закрытых подстанций и распределительных устройств, связанных с воздушными сетями, расстояния в свету между голыми токоведущими частями разных фаз, а также между ними и заземленными частями и ограждениями должны быть не менее соответствующих расстояний, фиксированных в § 53 и 55. Для подстанций и распределительных устройств, не имеющих связи с воздушными сетями, эти расстояния должны быть не менее величин, приведенных в табл. 6.

Таблица 5

Номинальное рабочее напряжение подстанций, кВ	Наибольшее допустимое рабочее напряжение подстанций, кВ	При промышленной частоте			При импульсах		Минимальные допустимые воздушные расстояния на подстанциях, мм
		Сухоразрядное напряжение внешней изоляции аппаратуры, кВ	Допустимая кратность коммутационных перенапряжений	Необходимая длина воздушных расстояний (по кривой для электродов стержень — плоскость), мм	50-процентное разрядное напряжение внешней изоляции аппаратуры (при положительной волне), кВ	Необходимая длина воздушных расстояний (для электродов стержень — плоскость при положительной полярности импульсов), мм	
3	3,5	27	13,35	35	75	95	100/70*
6	6,9	35	8,80	50	103	190	200/100
10	11,5	46	6,90	70	144	180	300 120
15	17,5	60	5,90	120	175	330	350/120
20	23	75	5,65	170	195	360	400/170
35	40,5	110	4,70	260	280	540	550/260
110	121	300	4,27	900	660	1 200	1 200
154	169	415	4,25	1 200	760	1 450	1 500
220	242	550	3,94	1 700	1 075	2 000	2 000

* В числителе — величины для открытых и закрытых подстанций, имеющих связь с воздушными линиями передачи. В знаменателе — величины для закрытых подстанций, не имеющих связи с воздушными линиями передачи. Для первых определяющее значение имеет импульсная прочность, для вторых — электрическая прочность при коммутационных перенапряжениях.

Таблица 6

Наименование габаритов (фиг. 2)	Расстояния в см при номинальном напряжении между фазами в кВ					
	Выше 1 до 3	6	10	20	35	110
Между проводами разных фаз, а также от токоведущих частей до заземленных конструкций и частей зданий — А	7	10	12	17	26	90
От токоведущих частей до сплошных ограждений — В	10,5	13	15,5	21	32	100
От токоведущих частей до сетчатых ограждений — С	17,5	20	22,5	28	39	107
От токоведущих частей до барьеров — D	50	50	50	70	80	140

и далее § 74 излагать как в Правилах.

Инж. Ю. Л. МУКОСЕЕВ

г. Горький

В связи с опубликованными статьями С. М. Лившица, К. А. Смирнова и Е. Н. Приклонского по вопросу напряжений между 380 и 3 000 в, необходимо сделать следующие дополнения к предложению о введении в стандарт напряжений 660 в для сетей и 660/380 в для приемников электроэнергии.

Из всех доводов, приведенных С. М. Лившицем против напряжения 660 в, наиболее аргументированным является отказ от необходимости применения пуска переключением со звезды на треугольник, с чем автор считает необходимым согласиться.

Однако, С. М. Лившиц, как и некоторые другие авторы, совершенно неправильно игнорирует такой основной фактор для выбора напряжения, как средняя мощность приемника энергии в данной конкретной установке. Не случайно повышенное напряжение 500 в удерживается в бумажной промышленности, в цветной металлургии, в установках собственного расхода электростанций и других предприятиях, где средняя мощность приемников энергии, работающих на этом напряжении, находится в пределах 50—100 квт. Напряжение 500 в в этих установках облегчает сети и пусковую аппаратуру, а также снижает потери энергии по сравнению с 380 в.

С другой стороны, вполне закономерно в черной металлургии, текстильной промышленности и ряде других отраслей установилось напряжение 380 в, так как средняя мощность приемников энергии этого напряжения там менее 50 квт.

Вполне понятно, что напряжение 380/220 в там вытеснило напряжение 500 в, так как первое напряжение вполне экономично решает вопрос распределения энергии для мелких приемников.

Ясно также, что для электропромышленности очень важно сократить число напряжений, и в своем идеале она вообще желала бы изготовлять оборудование всего трех-четыре напряжений, но это явный абсурд с народнохозяйственной точки зрения.

Если напряжение 500 в является существующим, то напряжение 660/380 в также фактически уже существует. Министерство электропромышленности СССР выпускает, например, электродвигатели АМ 117/4, 180 квт, 380 в — треугольник, т. е. 380/660 в, причем обмотки соединены треугольником и наружу выведены всего 3 конца, к великой досаде промышленных энергетиков, желающих повысить cos φ таких незагруженных двигателей переключением обмоток на звезду.

Задача применения нового напряжения между 380 и 3 000 в должна решаться в реальных конкретных условиях работы нашей промышленности, именно в тех отраслях, где средняя мощность приемника находится в пределах 50—100—150 квт. Сюда относятся: бумажная промышленность, цветная металлургия (обогащительные фабрики), нефтяная, горная, торфяная и другие промышленности, а также установки собственного расхода тепловых электро-

станций. Частично сюда относятся машиностроение (термические и сварочные цехи, компрессорные и насосные) и сельское хозяйство (электротракторы).

Вопросы стандартизации и маневренности электрооборудованием наиболее просто решаются применением напряжения 660/380 в для приемников электроэнергии, которые могут работать как в сетях 380 в, так и в сетях 660 в. Разумеется, что эти приемники энергии должны будут иметь выведенными все шесть концов.

Примером подхода к вопросу о напряжении между 380 и 3 000 в с отрывом от реальной действительности являются предложения о введении напряжения $500 \sqrt{3} = 865$ в и $500 \times 2 = 1 000$ в. Напряжение 865 в предлагается в статье Е. Н. Приклонского. Рассматривается отвлеченная схема распределения энергии с применением кабелей, без указания отрасли промышленности, вне связи с мощностями приемников и трансформаторов, в то время как эти факторы являются основными и решающими для выбора напряжения.

Введение совершенно нового напряжения 1 000 в, не дающего возможности применить оборудование с этим напряжением в других сетях, усложнит эксплуатацию, затруднит маневрирование электрооборудованием и противоречит стандартизации оборудования для массового производства.

Таким образом, исходя из положений, что: во-первых, для установок со средней мощностью приемников 50—100—150 квт необходимо промежуточное напряжение между 380 и 3 000 в; во-вторых напряжение приемников должно обеспечить максимальную стандартизацию и маневренность электрооборудованием в сетях наиболее распространенного напряжения 380 в, — мы приходим к выводу, что наиболее правильным будет введение в стандарт напряжения 660 в для сетей и 660/380 в — для приемников энергии. Таким образом, электродвигатели до 220 квт должны изготавливаться всего двух напряжений — 380/220 в и 660/380 в, что будет вполне достаточно для соблюдения интересов электропромышленности в части максимальной стандартизации.

Инж. М. Д. ГОРЕНШТЕЙН

Новосибирскэнерго

По разделу «Распределительные устройства выше 1 000 в» считаю необходимым внести нижеследующие предложения.

§ 14а следует дополнить примечанием, о необязательности устройства шинных полок в распределительных устройствах до 10 кв при мощности подстанции до 30 тыс. квд. Шинные полки необходимо применять только на распределительных устройствах генераторного напряжения электростанций. Данный параграф должен быть также уточнен примечанием о необязательности устройства перегородок между токоведущими частями в распределительных устройствах простейшего типа (городские и сельские киоски, мелкие трансформаторные пункты промышленных предприятий и т. д.).

§ 18. Желательно уточнить вопрос о необходимости линейных разъединителей, в частности, на фидерах трансформаторов. Если трансформаторное помещение удалено от распределительных устройств, или если щит низкого напряжения эксплуатируется другой организацией, установка линейных разъединителей должна быть обязательной.

§ 20. Необходимо указать температуру воздуха, при которой требуется устройство для подогрева масла в выключателях, так как ни в руководящих указаниях, ни в инструкциях не регламентируется предельная степень загустения масла, что имеет значение для обеспечения нормальной работы масляных выключателей.

§ 24. Примечание о необязательности блокировки масляного выключателя с разъединителем, если они установлены в разных помещениях, следует исключить, так как именно при расположении приводов в разных помещениях наиболее вероятны ошибочные отключения разъединителей под нагрузкой.

§ 28. Наименьшее расстояние между поручнями и от поручня до земли следует принять 0,75 м вместо 0,6 м, что обеспечит выполнение ограждений для открытых распределительных устройств с двумя перекладинами. При-

нятая в «Правилах» высота 0,6 м требует в этом случае трех переключателей, что излишне.

§ 29. Необходимо конкретизировать термин «удобство» в зависимости от габаритов и веса. В частности, необходимо указать, при какой мощности трансформаторов обязателен подъездной железнодорожный путь.

§ 30. Необходимо дополнить требованием об обязательной установке компенсаторов при длине прямого участка шин более 15 м.

§ 32. Устанавливать термометры на входе масла и воды излишне. Достаточно установка термометров только на выходе.

§ 35. Первую фразу необходимо изменить так: «Стены и потолки всех помещений должны быть оштукатурены и побелены». Отсутствие штукатурки вызывает сильное загрязнение оборудования.

§ 54. Расстояние между фазами гибкой ошиновки необходимо типизировать в зависимости от пролета, в виде таблицы, аналогичной табл. 14 раздела «Воздушные линии выше 1000 в». Это облегчит проектирование и упростит централизованное изготовление конструкций распределительных устройств. Формулу § 54 нужно оставить для проверки при не стандартных условиях.

§ 68. Желательно дополнить: «при открытой установке трансформаторов до 1000 кВа включительно или под металлическими закрытыми трансформаторными киосками допускается применение деревянных фундаментов». Для подстанций на торфоразработках также необходимо разрешение установки трансформаторов на деревянных свайных основаниях, независимо от мощности трансформаторов.

§ 78. Четвертый абзац можно изменить без ущерба для эксплуатации: «В коридоре управления, где находятся приводы выключателей и разъединителей, указанные выше размеры должны быть увеличены соответственно до 1,2 и 1,5 м». Эти расстояния обычно дают возможность удовлетворить требования § 77 и дадут существенную экономию в кубатуре. Указанное увеличение габаритов необходимо распространить и на коридоры обслуживания, хотя и без приводов, но имеющие разъединители, отключаемые штангой.

§ 79. Допускаемое снижение расстояния между трансформатором и задней стеной (последний абзац) необходимо распространить на трансформаторы до 320 кВа включительно, обычно применяемые в городских киосках и мелких заводских подстанциях. Для городских киосков с трансформаторами до 320 кВа включительно необходимо также уменьшить до 0,5 м габариты до боковых стен и двери. Данный параграф необходимо также дополнить требованиями к металлическим трансформаторным киоскам: для уменьшения расхода металла можно допустить уменьшение габаритов до стен за счет выполнения боковых дверей.

§ 81. В целях снижения высоты подстанций 6—10 кВ (часто определяемой только данными требованиями, особенно в заводских подстанциях и центральных распределительных пунктах с воздушными выводами и взрывными ячейками) необходимо расстояние H (рис. 2) принять 2,5 м, как и внутри помещений. Этим будет достигнута значительная экономия, а опасность поражения людей, находящихся обычно не на самой высокой точке крыши, мало вероятна, так как ремонты крыши и уборка снега чаще всего производятся при отключенных линиях и под наблюдением.

§ 84. Огнезащитная обшивка изнутри дверей в камерах баковых выключателей излишня. Загорание масла в ячейках масляных выключателей исключительно редко. При взрыве же масляника дверь, как правило, разрушается. Требование обшивки двери нужно оставить только для камер трансформаторов.

§ 94. Добавить: «Во взрывных камерах баковых масляных выключателей для выполнения воздушного вывода разрешается установка линейного разъединителя и вентилярных разрядников». Такое разрешение значительно упростит конструкцию подстанций заводских и сельскохозяйственных установок, избавив от необходимости устройства второго этажа или башен для воздушных выводов или от применения кабельных вставок для вывода на воздушную линию электропередачи.

§ 96. Дополнить: «Под трансформаторами мощностью до 180 кВа включительно, располагаемых в отдельных камерах при расстоянии до соседних зданий более 10 м, устройство маслосборных ям не обязательно».

§ 97. Для удобства пользования «Правилами» (имея в виду ряд недостаточно опытных мелких проектных организаций) целесообразно дополнить данный параграф таблицей сечений входных и выходных проемов, в зависимости от мощности трансформатора и температуры воздуха.

§ 103. Необходимо дополнить: «или деревянными, обитыми снизу огнезащитным покрытием». Такое дополнение особенно необходимо для случая прокладки силовых и контрольных кабелей под съемным полом щитовых помещений.

§ 130. Поскольку мощность подстанций, встроенных в современные крупные дома, значительна, необходимо допустить установку трансформаторов до 560 кВа включительно.

§ 132. Необходимо разрешить выполнение подстанций в жилых домах также и в цокольном этаже, с условием обеспечения удобной выкатки трансформаторов и устранения возможности попадания в подстанцию ливневых вод. Это увеличит используемый для жилья объем зданий. Замена же трансформаторов даже в цокольном этаже при правильно запроектированной подстанции особых трудностей не представляет.

Кроме внесения указанных выше изменений, необходимо раздел «Распределительные устройства выше 1000 в» дополнить с целью регламентации ряда освещенных вопросов. Так, 1) необходима глава о требованиях по устройствам сигнализации, измерений и блокировки (количество сигнальных ламп, положения масляных выключателей, лампы безопасности в камерах трансформаторов и выключателей и т. д.); 2) необходимо регламентировать выполнение воздушных вводов в закрытые подстанции через одну ячейку для возможности выполнения ремонтных работ; 3) должны быть установлены минимальные расстояния в свету между вентилярными разрядниками при внутренней или наружной установке; 4) в целях упрощения закрытых распределительных устройств желательно допустить установку вентилярных разрядников снаружи на балконах или металлических конструкциях под воздушными вводами с глухим подключением под гайку линейного ввода (большинство потребительских подстанций допускает полное погашение на время присоединения или отсоединения разрядников); 5) необходимо регламентировать расстояние от наружного контура заземления до стен подстанции не менее $1,5 \div 2$ м; 6) необходимо ввести параграф, требующий обязательной установки разъединителя в камере трансформатора для цеховых подстанций, не имеющих своего распределительного устройства и питающихся от центрального распределительного пункта независимо от наличия линейного разъединителя на центральном распределительном пункте; 7) после § 79 необходимо добавить параграф, регламентирующий высоту установки кабельной воронки высокого напряжения в камере трансформатора: «Кабельные воронки высокого напряжения в камерах трансформаторов должны устанавливаться на высоте выводов высокого напряжения трансформатора». Хотя этот вопрос и не принципиальный, однако многие проектные организации, ссылаясь на требования энергосистем, устанавливают вводные воронки на высоте 2,5 м, что ухудшает наблюдение за воронкой, и выполняют спуски к небольшим трансформаторам шинами, нагружая лишние конструкции и ухудшая безопасность эксплуатации; 8) одновременно с утверждением новых «Правил» необходимо в вводной части дать указания о том, что решения об оставлении в эксплуатации действующих установок, выполненных до издания настоящих «Правил», выносятся главным инженером энергосистемы, а для установок промпредприятий — главным инженером Энергосбыта; 9) для удобства пользования «Правилами» в качестве приложения должны быть даны основные определения из действующих ГОСТ, например, классификация помещений — категории А, Б, В, Г, Д, определения: стоевые, полусгораемые, огнестойкие и т. д.



К статье И. М. Чалидзе, Н. А. Златева и Ю. А. Варьяша „К вопросу о схемах коммутации крупных гидроэлектростанций“

(Электричество, № 11, 1949)

Описанная авторами нового вида схема коммутации крупных гидроэлектростанций с установкой крупных блоков повысительных трансформаторов в сочетании с попережными связями на генераторном напряжении, образующими «кольцевую» схему на этом напряжении¹, ни в коем случае не может считаться наилучшим решением вопроса. При обосновании предложенной схемы авторы допустили целый ряд неточностей и спорных положений.

1. Авторы указывают, что только при отдаче на другом напряжении мощности больше, чем 30% от отдаваемой на основном напряжении, оправдывается применение трехобмоточных трансформаторов. Между тем подсчеты, произведенные для ряда практических случаев, показывают, что как по стоимости трансформаторов, так и по величине потерь трехобмоточные трансформаторы имеют преимущества перед двумя двухобмоточными уже при отдаче на втором напряжении мощности более 15% мощности на основном напряжении.

2. При обосновании схемы авторы статьи исходят из определенного жесткого распределения нагрузок по напряжениям и поэтому считают, что увеличение на 30% мощности основных двухобмоточных трансформаторов позволяет при отключении одной из трансформаторных групп перегружать оставшиеся в работе группы и сохранить на короткое время выдаваемую станцией мощность. Между тем на практике, в зависимости от режима работы сети потребителей на каждом напряжении, распределение нагрузок по напряжениям может изменяться в довольно широких пределах как в зависимости от суточного и годового графиков нагрузки, так и при развитии нагрузок по годам. В результате, увеличенная на 30% мощность некоторых трансформаторных групп может быть использована при нормальной работе, и при аварийном отключении трансформаторной группы никакого запаса мощности трансформаторов может не оказаться.

Преимущества трехобмоточных трансформаторов, в частности, заключаются также в том, что они позволяют очень гибко приравниваться к перемещению нагрузки с одного напряжения на другое, без изменения установленной мощности трансформаторов.

3. Возможность сохранения мощности, отдаваемой генератором при отключении одной трансформаторной группы за счет перегрузки других трансформаторных групп на промежуток времени, определенный авторами в 7,5 мин, не может иметь решающего значения для надежной работы энергосистемы, так как обеспечить производство сколько-нибудь сложных оперативных переключений в энергосистеме за указанное время невозможно.

4. При отключении одного или нескольких трансформаторов в схеме многоугольника незачем оставлять разомкнутым многоугольник на стороне высокого напряжения и тем обосновывать целесообразность применения «кольцевых» схем на генераторном напряжении. После отключения трансформатора и разъединителя в его цепи, многоугольник снова замыкается, и никакой необходимости в связях между всеми генераторами по этой причине нет.

Авторами не учтены следующие важные обстоятельства.

1. Не оценена в достаточной мере та высокая степень надежности, которую имеют в эксплуатации современные крупные силовые трансформаторы. Случаи аварийного отключения крупных силовых трансформаторов крайне редки и ни в какое сравнение не идут с числом случаев

отключений воздушных линий передач высокого напряжения и даже с числом аварий генераторов. с числом случаев отключений воздушных линий передач высокого напряжения и даже с числом аварий генераторов.

2. Отмеченная высокая надежность мощных силовых трансформаторов высокого напряжения дает возможность применять все большие единичные мощности трехфазных трансформаторов. В ближайшее время производственные возможности заводов обеспечат дальнейшее увеличение единичной мощности трехфазных трансформаторов. Величина потерь и стоимость двух трехфазных трансформаторов будет, во всяком случае, не больше, а скорее меньше, чем соответствующие данные, относящиеся к одной группе из однофазных трансформаторов двойной мощности. При ограниченности места для размещения повысительных трансформаторов на гидроэлектростанциях трехфазные трансформаторы также имеют преимущества по сравнению с группами из однофазных трансформаторов.

3. Действительно, на гидроэлектростанциях целесообразно укрупнять мощность трансформаторных единиц. Однако, из этой правильной мысли авторы делают неправильный вывод, что этого можно достигнуть только путем создания сложных схем соединений на генераторном напряжении. Следует отметить, что и при ранее применяемых блочных схемах соединения гидроэлектростанций широко практиковалось укрупнение мощных трансформаторов. Достаточно привести примеры Волховской и Нижне-Свирской гидроэлектростанций, на которых по несколько генераторов работают на одну трансформаторную группу.

Следует также отметить, что авторы статьи не указывают целесообразные пределы укрупнения трансформаторной мощности на гидроэлектростанциях. Следует считать правильным укрупнять мощность трансформаторов на гидроэлектростанциях до величин, соизмеримых с мощностью, передаваемой по одной воздушной линии соответствующего напряжения:

110 кв 30—40 тыс. кв
150 кв 55—75 тыс. кв
220 кв 120—150 тыс. кв

4. Предлагаемая авторами схема электрических соединений требует выполнения на генераторном напряжении сложных сборок с аппаратурой и ошиновкой, рассчитанных на большие номинальные токи, что уже само по себе понижает надежность работы электростанции и при отсутствии нагрузки на генераторном напряжении не может быть оправдано.

На основании изложенного можно сделать следующие общие выводы: 1) предлагаемая авторами «кольцевая» схема электрических соединений всех генераторов гидроэлектростанции на генераторном напряжении имеет столь существенные недостатки перед более простой и более надежной блочной схемой соединений, что она ни в коем случае не может быть рекомендована к применению; 2) для укрупнения трансформаторных единиц на гидроэлектростанциях, с целью упрощения схем электрических соединений и уменьшения числа элементов распределительных устройств повышенного напряжения, в указанных выше пределах, может быть рекомендовано соединение нескольких генераторов на генераторном напряжении и при отсутствии нагрузок на этом напряжении. При этом должна быть сохранена простая блочная схема соединений со связью между отдельными блоками только на повышенном напряжении.

Инж. А. Б. КРИКУНЧИК

¹ Электричество, № 11, 1949.

Профессор М. А. Бонч-Бруевич

к 10-летию со дня смерти

Одним из выдающихся представителей советской школы ученых-радиотехников являлся Михаил Александрович Бонч-Бруевич, который умер 7 марта 1940 г. Его многочисленные изобретения и научные труды, широкий размах научно-технической мысли и исключительно плодотворная деятельность по претворению своих изобретений в жизнь, создали ему мировую известность и глубокое уважение со стороны всех, кто соприкасался с ним. Вся деятельность Михаила Александровича была направлена на выполнение государственных заданий. Великая Октябрьская социалистическая революция и личное содействие ее вождей — Ленина и Сталина обеспечили широкий размах развития научного наследия изобретателя радио А. С. Попова. В процессе решения задач, которые ставились Советским правительством уже в первые годы после революции перед инженерами и учеными, выростали талантливые ученые, сочетавшие ин-



женерную практику с теоретической работой, и одним из таких ученых и инженеров был Михаил Александрович Бонч-Бруевич.

М. А. Бонч-Бруевич родился 23 февраля 1888 г. в Орле в семье техника. Среднее образование он получил в Киеве, где жил с семилетнего возраста. Будучи в последних классах училища, он увлекался естественными науками и электротехникой и устроил у себя дома маленькую лабораторию, в которой производил различные физико-химические опыты. В 1906 г. Михаилу Александровичу удалось построить при помощи примитивных средств радиопередатчик и радиоприемник по схеме Попова, при помощи которых он передавал телеграфные знаки на расстоянии нескольких сот метров. Увлечению радиотехникой во всей жизни Михаила Александровича немало способствовало и то обстоятельство, что в период учебы в Военном инженерном училище в Петербурге он пользовался большим вниманием со стороны профессора В. К. Лебединского. Первая исследовательская работа Михаила Александровича по электрической искре была выполнена под руководством В. К. Лебединского и была удостоена премии Русского физико-химического общества.

По окончании высшего образования в 1914 г. М. А. Бонч-Бруевич был назначен на Тверскую приемную радиостанцию, которая была в дальнейшем реорганизована в Центральную радиолaborаторию им. В. И. Ленина в Нижнем-Новгороде (г. Горький). Деятельность ученых, которые сгруппировались вокруг этой лаборатории, имела очень большое значение для развития радиотехники. Михаил Александрович отличался особой страстью к экспериментам которые заранее тщательно обдумывал. Он занялся разработкой и изготовлением радиоламп, что было совершенно необходимо. Несмотря на примитивность оборудования лаборатории и отсутствие опыта, были изготовлены первые образцы радиоламп. Они были неказисты на вид, но по своим показателям были лучше зарубежных: лампы

служили дольше и стоили дешевле. Вначале для удлинения срока службы в них были применены два катода и два цоколя. Таким образом, в одном стеклянном баллоне находились две лампы. Это давало выигрыш при изготовлении, так как основная трудность заключалась в достижении необходимого вакуума. Когда одна из половинок такой лампы выходила из строя, лампу переворачивали и включали второй катод. Ряд радиоламп, разработанных М. А. Бонч-Бруевичем в дальнейшем, сохранили свое значение до сих пор; в свое время они являлись образцами, которые заимствовались рядом иностранных фирм.

Наряду с успешной разработкой и изготовлением радиоламп М. А. Бонч-Бруевич настойчиво работал над осуществлением радиотелефонирования, для чего надо было отказаться от имевшихся машинных и искровых радиостанций, разработать и изготовить ламповые генераторы и радиотелефонные приемники. Этими вопро-

сами и занялся М. А. Бонч-Бруевич.

С первых же дней Великой Октябрьской социалистической революции Ленин и Сталин уделяли большое внимание делу развития радиосвязи. 2 декабря 1918 г. Ленин подписал Положение о радиолaborатории, которая организовалась на базе Тверской приемной радиостанции. В Положении указывалось, что лаборатория является первым этапом к организации в России Государственного социалистического радиотехнического института, конечной целью которого является объединение в себе и вокруг себя, в качестве организующего центра: а) всех научно-технических сил России, работающих в области радиотелеграфа; б) всех радиотехнических учебных заведений России; в) всей радиотехнической промышленности России.

Перед лабораторией также была поставлена задача разработать радиотелефонные передатчики дальнего действия.

Ленин особенно высоко ценил возможность телефонных радиопередач, как средство непосредственного общения с большой аудиторией, минуя других лиц, в отличие от радиотелеграфирования, где расшифровка производится третьими лицами. В конце 1919 г. опыты М. А. Бонч-Бруевича по радиотелефонной передаче были успешно осуществлены. Радиопередатчик Нижегородской радиолaborатории все чаще стал передавать в эфир свои поэтические: «Слушайте, говорит Нижегородская радиолaborатория».

В письме к М. А. Бонч-Бруевичу от 5 февраля 1920 г. Ленин писал:

«... Пользуюсь случаем, чтобы выразить Вам глубокую благодарность и сочувствие по поводу большой работы радиозобретений, которую Вы делаете. Газета без бумаги и «без расстояний», которую Вы создаете, будет великим делом. Всяческое и всемерное содействие общаю Вам оказывать этой и подобным работам».

Ленин постоянно уделял внимание вопросам радиосвязи, в особенности строительству радиовещательных станций, выкрикивал во все нужды для решения этих задач, и продолжал следить за исследовательской деятельностью М. А. Бонч-Бруевича.

17 марта 1920 г. Ленин подписал постановление СТО о строительстве первой советской радиотелефонной станции в Москве с радиусом действия в 2000 верст. 27 января 1921 г. Ленин подписал постановление Совнаркома, в котором одобрялась деятельность Нижегородской радиолaborатории и Наркомпочтелю было поручено строительство ряда станций в наиболее важных пунктах страны.

19 мая 1922 г. Владимир Ильич обратился с письмом к И. В. Сталину, посвященным делу развития радиотехники. К письму был приложен доклад М. А. Бонч-Бруевича, которого Ленин рекомендовал, как крупнейшего изобретателя в радиотехнике и одного из главных деятелей Нижегородской радиолaborатории, о награждении которой орденом Трудового Красного Знамени Ленин ходатайствовал за несколько дней до того.

Михаил Александрович всю жизнь гордился личным вниманием Ленина и Сталина к проводившейся работе в области развития радиотехники и прилагал все усилия, чтобы оправдать внимание вождей Советского государства, выполняя наилучшим образом поставленные перед ним задачи.

О новизне выполнявшегося в Нижегородской лаборатории дела говорит следующий общезвестный факт. Радиостанция на Ходынке в Москве осенью 1920 г. передавала контрольную радиотелефонную передачу, которая была принята в Берлине. Немцы ответили о принятии текста Московской радиотелефонной станции по телеграфу, так как в Берлине еще не было радиотелефон-

ной станции, которая могла бы осуществить передачу на большое расстояние.

Радиостанции, построенные в Советском Союзе, были самыми мощными в мире, и в это дело было вложено немало труда М. А. Бонч-Бруевичем.

В 1933 г. Михаил Александрович руководил работами по изучению ионизированных слоев стратосферы. Им было открыто свойство некоторых слоев, обуславливающее нарушение нормальной радиосвязи за счет поглощения радиоволн. При исследовании Михаил Александрович пользовался разработанным под его руководством методом импульсной работы радиотехнических устройств, который широко применяется в современной радиотехнике.

М. А. Бонч-Бруевич был не только выдающимся ученым и инженером, но и талантливым педагогом. Еще в 1921 г. он был избран профессором Нижегородского университета, а в 1922 г. профессором Московского высшего технического училища. С 1932 г. до конца своей жизни Михаил Александрович был профессором и научным руководителем Ленинградского института инженеров связи, которому присвоено его имя.

Перу М. А. Бонч-Бруевича принадлежит 60 научных работ и 7 капитальных учебников по радиотехнике. Некоторые из этих учебников выдержали по несколько изданий и до сих пор остаются примерными по методике и содержанию.

Жизнь Михаила Александровича прошла в творческом сочетании науки и техники, в преданном служении народу и коммунистической партии.

Кандидат техн. наук В. Ю. РОГИНСКИЙ



Встреча работников науки и стахановцев городского электротранспорта

3 марта 1950 г. в Москве состоялось Научно-техническое совещание, организованное Автомобильно-дорожным институтом им. Молотова, совместно с Академией коммунального хозяйства им. Памфилова, посвященное вопросам учета и экономии электрической энергии, а также токосъему на городском электротранспорте.

В совещании приняли участие научные сотрудники Академии, профессорско-преподавательский состав и студенты старших курсов Института, представители Всесоюзного научно-инженерно-технического общества городского электротранспорта, инженеры и лучшие стахановцы вагоновожатые трамвайных предприятий г. Москвы, Калинин и Ногинска, представители Дортранспроекта и других организаций. Всего на совещании присутствовало свыше 150 чел.

Совещание, открытое доктором эконом. наук, проф. А. С. Кудрявцевым, заслушало доклады руководителя лаборатории городского электротранспорта Академии коммунального хозяйства, кандидата техн. наук Ю. М. Галонена на темы: «Индивидуальный учет и пути экономии электрической энергии на подвижном составе городского электротранспорта» и «Проблема токосъема трамвая». Доклады иллюстрировались световыми картинками и действующими экспонатами новой конструкции электродинамических счетчиков энергии постоянного тока, а также специальными электроизмерительными приборами, разработанными лабораторией, в числе которых были: *электронный виброграф, быстроходный электромагнитный отсчетчик пути и индикатор числа пусков вагона*. Были показаны также образцы износоустойчивых угольно-графитных контактных вставок, с новыми типами вставкодержателей для токоприемников трамваев, обладающие сроком службы примерно в 8 раз больше существующих.

После докладов развернулись оживленные прения. М. С. Черток (Октябрьское депо Московского трамвая) подчеркнул огромное значение индивидуального учета электрической энергии на подвижном составе трамвая и охарактеризовал основные пути получения дополнительной экономии электроэнергии. По существующим нормам величина удельного сопротивления движению для четырехосных вагонов составляет 4,5 кг/т, а для двухосных 5 кг/т. По Октябрьскому депо удалось снизить удельное сопротивление движению в среднем соответственно до 4,1 и 4,2 кг/т, причем указанные величины далеко не являются предельными, так как на отдельных вагонах величина удельного сопротивления движению снижается до 3 кг/т, что обеспечивает большую эксплуатационную экономию электрической энергии (до 30%). В связи с значительным вводом в эксплуатацию новых типов подвижного состава трамвая, оборудованного быстроходными тяговыми двигателями, расчетные коэффициенты в формулах для определения сопротивления движению подлежат пересмотру. Установка счетчиков энергии на подвижном составе трамвая даст возможность проверить эксплуатационный режим ведения поезда по сравнению с тяговыми расчетами и установить наиболее выгодный режим ведения вагона на линии. Применение угольно-графитных контактных вставок даст, помимо улучшения условий токосъема и увеличения срока службы вставок, экономию цветного металла.

А. А. Колобов (Калининский трамвай) привел интересные данные о достигнутой экономии электрической энергии (16%) против установленных норм, указав, что экономия получена в основном благодаря систематически выполняемым мероприятиям по текущему ремонту и осмотру подвижного состава трамвая перед выходом его из депо. Помаршрутное определение расхода электрической энергии на трамвае в г. Калинин является целесообразным. Периодически всех вагоновожатых следует инструк-

тировать на опытном вагоне, оборудованном счетчиками энергии, с одновременным выявлением таким путем способности каждого вагоновожатого вести поезд экономично.

В. А. Барынин (Лаборатория городского электротранспорта) подчеркнул большое значение режима ведения поезда, отметив что каждый лишний пуск вагона вызывает затрату электроэнергии в 4 *звт-час*, достаточную для освещения двухкомнатной рабочей квартиры в течение 8 час. Он обобщил опыт работы лучших вагоновожатых-стахановцев, на основании личных наблюдений во время проведения экспериментальных исследований, и сформулировал основные условия ведения вагона на линии, обеспечивающие минимальный расход электрической энергии.

М. П. Кузыкина и **Т. Я. Макарова** (вагоновожатые-стахановцы Ногинского трамвая) рассказали о своей работе на трамвае и о методах, направленных к повседневной экономии электрической энергии. Перед выездом на линию следует тщательно проверять наличие зазоров между тормозными колодками и бандажами. На линии следует максимально использовать выбег вагона. Работа постоянно на одном и том же маршруте обеспечивает хорошее знание вагоновожатым профиля пути и позволяет вести вагон с минимальным расходом электроэнергии. Периодическая проверка знаний вагоновожатыми Правил технической эксплуатации трамвая и Правил уличного движения, практикуемая на Ногинском трамвае, способствует ведению правильной эксплуатации подвижного состава.

А. А. Богдан (вагоновожатая-стахановка Калининского трамвая) поделилась своим многолетним опытом рационального режима ведения и обслуживания поездов трамвая, обеспечивающего минимальный расход электрической энергии, рассматривая введение счетчиков энергии на подвижном составе трамвая как многообещающее массовое мероприятие и как мощный стимул для достижения эффективной экономии электрической энергии всеми вагоновожатыми трамвая.

Доцент **В. Г. Сосняк** (Академия коммунального хозяйства) указал на огромное значение для экономии электрической энергии хорошего состояния путей трамвая и затронул, в частности, интересную проблему шлифовки рельсов, практикуемую в настоящее время на ряде трамваев в Москве, Риге, Калининграде и др. Применение счетчиков энергии на подвижном составе трамвая, равно и угольно-графитных вставок целесообразно начать как можно скорее.

Совещание отметило актуальность разработанных Академией коммунального хозяйства вопросов индивидуального учета электрической энергии и введения угольно-графитных контактных вставок и подчеркнуло необходимость скорейшего освоения промышленностью серийного производства специальных счетчиков энергии и контактных вставок.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН



В секциях электротермии МОНИТОЭ и Дома инженера и техника им. Дзержинского

В феврале 1950 г. в Москве в Доме инженера и техника им. Дзержинского на заседании актива секций электротермии МОНИТОЭ и Дома инженера и техника состоялась обсуждение книги К. З. Шепеляковского и С. Е. Рыскина «Техника применения индукционного нагрева» (Машгиз, 1949 г.).

Во вступительном слове кандидат техн. наук **К. З. Шепеляковский** сообщил о задачах, поставленных авторами при написании книги.

Инж. Ю. И. Китайгородский, которому было поручено подготовить отзыв о книге, отметил, что эта книга восполняет пробел в литературе по индукционному нагреву, так как в этой области был издан ряд монографий теоретического характера, но не было книги, которая могла бы служить пособием для заводских работников. Если при оценке книги К. З. Шепеляковского и С. Е. Рыскина исходить из главного критерия, сводящегося к проверке наличия в книге исчерпывающих данных о практическом применении различной аппаратуры по индукционному нагреву и практических данных о технологических процессах, то необходимо подчеркнуть следующие недостатки обсуждаемой книги: 1) отсутствуют сравнительные экономические характеристики индукционного и печного нагрева; 2) недостаточны и схематичны расчеты электрических параметров индуктора и конденсаторной батареи при заданных условиях; 3) в книге мало материалов по применению индукционного нагрева заготовок под штамповку; 4) нет ряда практических данных по использованию аппаратуры.

Наряду с этим в книге имеются и положительные моменты: 1) весьма ценными являются приведенная авторами экспериментальная таблица параметров системы индуктор-деталь и методика настройки лампового генератора на оптимальный режим калориметрическим методом; 2) в книге хорошо разобран вопрос о самоотпуске деталей при поверхностной закалке; 3) практическую ценность представляют данные по поверхностной закалке большого числа деталей автомобильного производства; 4) правильно исследован вопрос о причинах появления макро- и микротрещин и способы борьбы с этим вредным явлением.

Инж. Э. Д. Спивак (ЭНИМС), указав, что рассматриваемая книга написана на базе материалов, авторами

бильной промышленности, выразила сожаление, что авторы пренебрегли опытом применения индукционного нагрева в станкостроении. В книге имеются неточности: в частности, вопреки утверждению авторов, при закалке напильников нет необходимости проводить их обезжиривание.

Кандидат техн. наук **Г. В. Дершварц** отметил, что в книге обобщен большой практический материал, вследствие чего она, несомненно, будет очень полезна для работников промышленности. К неудачным местам книги относятся следующие: 1) на стр. 9 и 10 дается неточное определение глубины проникновения: «Величины глубины проникновения определяют, считая условно, что потери энергии в проводнике одинаковы как в случае распределения плотности тока по закону, выраженному уравнением (4), так и в случае равномерной плотности тока,

равной $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ по всей глубине δ ». Между тем это равен-

ство энергии не условно, а безусловно; в табл. 28 авторы дают в общем правильную ориентацию на соотношение минимального диаметра цилиндрического изделия к частоте при сквозном индукционном нагреве, однако этот минимальный размер зависит не только от электрического к. п. д. системы индуктор-деталь, как это указывают авторы в формуле (9), но также и от термического к. п. д.: наилучшее использование энергии достигается,

когда $\frac{D}{\delta} = 3,5$ (D — диаметр изделия, а δ — глубина проникновения). Именно эта формула и должна служить для определения связи между частотой и минимальным диаметром. Приходится, наконец, сожалеть о том, что в книгу не вошли обширные материалы, которые авторы накопили по расчетам трансформаторов системы **В. П. Володина** и индукторов со стальным магнитопроводом.

Инж. Ф. И. Шуманский (ЗЭГО) высказал недоумение по поводу пропуска в книге материалов, необходимых для расчета высокочастотных трансформаторов со стальным сердечником и материалов по централизованному питанию высокочастотных аппаратов.

Инж. С. А. Яицков (ЗИС), отметив, что рецензируемая книга получила благодарный отклик у мастеров и

производственников автомобильного завода им. Сталина, упрекнул авторов в недостаточном внимании, уделенном ими индукционному нагреву на высоких частотах и ламповым генераторам.

Инж. Р. Д. Байзельман (Машгиз) согласился с критикой книги и выразил пожелание, чтобы в дальнейшем выпускаемые в области индукционного нагрева книги проходили общественное рецензирование еще в стадии рукописи.

Затем слово для ответа на замечания было предоставлено автору книги К. З. Шепеляковскому, который в основном признал вскрытые недостатки книги и согласился с необходимостью учесть большинство замечаний при дальнейших изданиях.

Подводя итоги дискуссии председательствовавший на

заседании кандидат техн. наук, доц. А. Д. Свенчанский указал, что, несмотря на ряд отмеченных недостатков, общая оценка книги Шепеляковского и Рыскина как со стороны рецензента, так и со стороны выступавших была положительной. Собрание секций приняло решение об освещении в печати отзыва Ю. И. Китайгородского на книгу Шепеляковского и Рыскина «Техника применения индукционного нагрева». Кроме того, было принято решение о целесообразности издания в 1951 г. монографии, освещающей достижения в области индукционного нагрева в станкостроительной промышленности и о желательности выпуска в будущем нового, исправленного издания рассмотренной книги.

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



Библиография

Н. Г. ВОСТРОКНУТОВ. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН.
260 стр., ц. 17 руб. Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1949.

Среди книг по электроизмерительной технике, предназначенных для среднего технического персонала, имеются книги, пользующиеся достаточно большой популярностью и распространением; таковы, например, учебники В. С. Попова «Электрические измерения и приборы» (3-е издание, 1947 г.) и В. О. Арутюнова «Электроизмерительная техника» (2-е издание, 1939 г.). Эти учебники могут служить достаточно хорошими пособиями для лиц со средним техническим образованием, встречающихся в своей практической деятельности с электрическими и магнитными измерениями. Однако, в них сравнительно мало внимания уделяется вопросам поверки электроизмерительных приборов; пособий, специально посвященных этим вопросам, до настоящего времени не имеется. Поэтому книга Н. Г. Вострокнута, составленная, как указано в предисловии к ней, по заданию Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР в соответствии с программой, утвержденной Комитетом, и предназначенная в качестве пособия для поверительного состава системы Комитета, должна привлечь к себе серьезное внимание.

Рассматриваемая книга содержит, кроме введения, тринадцать глав и дает описание принципа действия электроизмерительных приборов различных систем и методов измерения электрических и магнитных величин и параметров электрических цепей. Кроме описания принципа действия приборов, даются указания по поверке приборов: в главе четвертой — мостов и магазинов сопротивления, в главе пятой — потенциометров постоянного тока, в главе шестой — измерительных трансформаторов и приборов, служащих для их поверки, в главе девятой — омметров и частотомеров; последняя глава книги посвящена вопросам поверки амперметров, вольтметров, ваттметров и счетчиков. Собственно поверке приборов в книге посвящено всего 45 страниц, причем 22 из них относятся к поверке потенциометров постоянного тока и измерительных трансформаторов, на долю же остальных приборов отводится настолько мало места, что ряд практических указаний дается либо в самом общем виде, либо вовсе опускается; материал излагается излишне конспективно, без сопровождения необходимыми иллюстрациями и схемами. Крайне недостаточно освещен вопрос о подборе реостатов для регулирования тока в поверочных схемах, не дается указаний о различного рода предосторожностях при проведении эксперимента, отсутствуют указания по форме записей наблюдений и обработке результатов наблюдений.

Таким образом, книга Н. Г. Вострокнута в части, касающейся поверки электроизмерительных приборов, не отвечает своему назначению — служить пособием для поверительного состава системы Комитета.

Еще в меньшей степени она может служить пособием для инженерно-технических работников отраслевых лабораторий, на что претендует автор в предисловии. В части, касающейся описания принципа действия электроизмерительных приборов и методов измерения, книга Н. Г. Вострокнута значительно уступает книгам, упомянутым в начале рецензии.

Описание принципа действия и теории электроизмерительных приборов дается в крайней элементарной форме, несмотря на то, что автор предполагает наличие у читателей практического знакомства с основной электроизмерительной аппаратурой.

Особенно неудачно изложение вопроса об измерении мощности и энергии и об измерении емкости и индуктивности мостовыми методами. Автор явно не справился с попыткой элементарного изложения принципа действия измерительных схем переменного тока. Ряд векторных диаграмм приведен без соответствующих объяснений. Существенным недостатком главы седьмой (Измерение мощности и энергии) является отсутствие понятий о генераторных зажимах; даже на схемах для измерения мощности и энергии эти зажимы не отмечаются. Явно неудачна, по нашему мнению, также попытка автора дать элементарный вывод условий равновесия мостовых схем переменного тока, что и проявилось при выводе условия равновесия моста Шеринга, когда соотношения, правильно определяющие равновесие моста, автор вынужден был назвать приближенными.

Описание электроизмерительных приборов проводится автором применительно лишь к принципиальным электрическим схемам и эскизам, характеризующим принцип действия приборов в самом общем виде. Во всей книге, содержащей 135 рисунков, не приведено ни одной фотографии реально существующего прибора. Значительные успехи электроприборостроительной промышленности нашей страны не нашли никакого отражения.

Отдельных недочетов в книге настолько много, что их невозможно перечислить в краткой рецензии, почему по необходимости приходится указать лишь наиболее существенные из них.

К одному из таких существенных недостатков относится крайняя засоренность книги устаревшей терминологией. Борьба за чистоту русского языка в технической литературе, повидимому, прошла мимо автора и ответственного редактора книги М. А. Быкова. В различных местах встречаются термины: мотор, мотор-генератор, динамо-машина, коммутатор, дроссель, зуммер-умформер, скин-эффект, токи Фуко, паразитные токи, литцендрат, клеммовая коробка, ваттные потери и др., уже давно вышедшие из употребления. От автора, пишущего по заданию Коми-

тета по делам мер и измерительных приборов, следовало ожидать не только применения современной технической терминологии, но и определенных попыток к замене неудачных терминов, относящихся к области электроизмерительной техники. Имеются в виду такие термины, как, например, корректор, арретир, керн, индикатор, калиброванный шунт, калиброванный провод, различные схемы и приборы с собственными именами (схема Арона и др.), которые автор применяет, совершенно не задумываясь над их явной непригодностью. Наряду с правильными и установившимися терминами автор часто употребляет те же термины в искаженном виде: вращающий момент — момент вращения, метод замещения — метод подстановки, номинальное значение — номинал, фазное напряжение — фазовое напряжение, спиральная пружина — спиралька и др. Такую же непростительную небрежность автор допускает и в вопросах чисто метрологических, выражая частоту переменного тока в периодах (1), применяя условные обозначения единиц измерения в тексте или после формул, хотя это допускается лишь после числовых значений величин. Имеется и ряд стилистических небрежностей.

Большое количество различного рода недочетов, выражающихся, главным образом, в нестандартных условных обозначениях, допущено автором в рисунках. Одни и те

же электроизмерительные приборы обозначаются автором то в виде окружности со стрелкой, то в виде окружности с буквой внутри или вне, то в виде прямоугольника или квадрата. Подобное же разнообразие в обозначениях допущено в отношении конденсаторов, магазинов сопротивлений и других элементов схем. На некоторых рисунках имеются обозначения, не объясненные в тексте.

Автору книги следует поставить в упрек допущенные им неточности при указании приоритета в разработке эталонов единицы тока и индуктивности. В первом случае в числе других не указана фамилия проф. Б. М. Яновского, под руководством которого завершены работы по изготовлению эталонов единицы тока — ампервесов. Во втором случае в числе других указывается фамилия проф. Е. Г. Шрамкова, который, хотя и является одним из руководящих научных работников ВНИИМ, непосредственного участия в работах по изготовлению эталонов индуктивности не принимал.

Многочисленные недостатки рецензируемой книги не позволяют рекомендовать ее читателям.

Кандидат техн. наук, доц. Л. Л. КРАПИВЕНСКИЙ
Ленинградский политехнический институт им. Калинина



А. С. САНДЛЕР. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). 138 стр., цена не указана. Госэнергоиздат, 1949.

Выпущенные до настоящего времени книги по электрооборудованию металлорежущих станков предназначались в основном для механиков. Особенностью этих книг является их насыщенность общими вопросами теории электрического привода, аппаратуры и схем электрического управления; и лишь небольшая часть их объема посвящается специфическим вопросам электрооборудования станков.

Рецензируемая книга представляет собой пособие по электрооборудованию станков для электриков, уже овладевших теорией электрического привода и управлением электроприводами. Книга А. С. Сандлера является учебным пособием для инженерно-технических работников промышленных предприятий и предназначается для слушателей факультета усовершенствования Всесоюзного заочного энергетического института (ВЗЭИ), работающих по эксплуатации электрооборудования металлорежущих станков. Выход в свет такого пособия следует считать вполне своевременным и весьма желательным.

Книга начинается введением, в котором дается краткий исторический обзор развития электропривода станков и рассматриваются современные тенденции его развития. Этот раздел книги изложен слишком кратко и схематично. В нем не отражена роль русских и советских ученых, отечественных станкостроительных заводов, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Не отмечены такие прогрессивные тенденции в станкостроении, как введение автоматических станочных линий, развитие автоматического копирования, применение электронно-ионной и электромашинной автоматики.

Остальной материал книги разбит на две части. В первой части излагаются основные положения по электрическому приводу металлорежущих станков; вторая часть посвящается схемам управления типовых металлорежущих станков.

Первую часть автор начинает с определения скорости и усилия резания для различных видов станочных работ (глава I). Необходимо отметить, что ни в одном из учебников или учебных пособий по электрооборудованию металлорежущих станков эти данные не приводятся, в то время как они не только полезны, но прямо таки необходимы для электриков. Приведенные здесь формулы построены на основе существующих официальных нормативов, не учитывающих достижений стахановцев-скоростников, и должны быть впоследствии скорректированы в соответствии с новейшими данными. Нельзя, однако, не отметить, что автор в ряде мест книги все же подчеркивает необходимость выбора оптимального режима работы

по максимальной производительности станка. В этой главе следовало бы привести более подробные справочные данные, что дало бы возможность получать достоверные результаты расчета величин усилия и скорости резания. Так, например, на стр. 11 для машиноподелочной стали приводится значение коэффициента $C_{v60} = 35 \div 85$ или для хромистой стали $C_{v60} = 15 \div 40$, т. е. их значения сильно колеблются; точных указаний о выборе этих коэффициентов не приводится.

Глава II посвящена вопросам выбора мощности электродвигателей для станков. Объединение в одной главе всех вопросов, связанных с определением мощности, надо признать правильным. Здесь изложена методика расчета мощности электродвигателей для токарного и продольно-строгального станков. Повидимому, недостаток места не позволил автору дать методику расчета для других типов станков и заставил его слишком схематично остановиться на расчете мощности электродвигателя для продольно-строгального станка. В то же время непропорционально много места уделяется вопросу допустимого числа включений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, причем некоторые рекомендации по повышению числа включений не могут быть реализованы в эксплуатации и должны быть адресованы к конструкторам машин, например, повышение числа включений за счет снижения потерь холостого хода посредством уменьшения потерь в стали (стр. 33).

В главе III излагаются особенности управления электроприводами металлорежущих станков. Полезный материал этой главы может быть без ущерба несколько сокращен за счет изъятия тех вопросов, которые прорабатываются в основных курсах — Теория электропривода и Управление электроприводами. К числу таких вопросов относится пуск короткозамкнутого двигателя включением однофазного сопротивления и систем генератор — двигатель с серийными машинами. Автор не уделил внимания разработанной ЭНИМС системе электронно-ионного привода «ЭЛИР», данные по которой были опубликованы в журнале «Станки и инструмент» еще в августе 1947 г. Эту главу следовало бы дополнить также данными о специальной станочной аппаратуре — электромагнитных муфтах и столах, соленоидах, специальных пусковых выключателях и т. д.

В главе IV изложены вопросы точного останова применительно к электроприводам переменного тока и приведены оригинальные разработки автора (в частности, получение пониженной скорости при использовании многоско-

ростного короткозамкнутого двигателя с включением в одну из обмоток постоянного тока, а в другую — переменного трехфазного тока, а также схема электрической фиксации с асинхронным двигателем).

Во второй части книги рассматриваются схемы управления типовыми металлорежущими станками: токарными, сверлильными, строгальными, шлифовальными, копировальными, агрегатными. Здесь перечисляются требования к схемам и приводится их описание. В пределах небольшого объема, который отведен этой части, дано много полезного материала, в достаточной степени систематизированного и, за немногими исключениями, хорошо изложенного. Приведено описание схем как отечественных станков, так и станков иностранных фирм, получивших распространение на наших машиностроительных заводах. По этой части книги, однако, уместно высказать следующие замечания:

Отсутствуют материалы по схемам фрезерных станков. Следовало бы осветить работы лауреатов Сталинской премии Т. Н. Соколова и И. А. Дружинского в области автоматического копирования и привести материалы по электрокопировальным станкам, выпущенным в последнее время заводом им. Свердлова. Отсутствуют сведения об автоматических измерителях размеров и схемах управления шлифовальными станками с применением этих измерителей. В рассматриваемой работе, к сожалению, вследствие ограниченного объема (об этом упоминает автор в предисловии) не нашло отражение электрооборудование автоматических станочных линий, созданных отечественными заво-

дами и ЭНИМС и нашедших распространение на наших машиностроительных заводах. Учитывая, что книга предназначена для электриков, во второй части наряду с требованиями к схемам управления станками следовало бы дать более подробное описание станков и привести их технические характеристики. Последняя глава «Основные положения по проектированию электрооборудования металлорежущих станков» изложена слишком схематично. Ее следовало бы расширить и снабдить примерными расчетами и схемными узлами.

Техническое оформление книги оставляет желать много лучшего. Имеется ряд незамеченных опечаток, например, на стр. 96 напечатано «плавного движения» вместо «главного движения», на стр. 115 — «скорость врезания» вместо «скорость вращения» и т. д. Неудовлетворительно воспроизведены фотографии. Обозначения и надписи на схемах настолько мелки и неясны, что в ряде случаев их невозможно прочесть.

Несмотря на отмеченные выше недостатки, книга может служить пособием для инженерно-технических работников. Положительный опыт автора книги в отношении методики изложения вопросов электрооборудования станков желательно использовать при создании более полноценного учебного пособия, предназначенного для инженерно-технических работников и студентов, специализирующихся в области электрооборудования промышленных предприятий.

Кандидат техн. наук, доц. Г. П. ХАЛИЗЕВ
Всесоюзный заочный политехнический институт



Р. ОЛЬДЕНБУРГ и Г. САРТОРИУС. ДИНАМИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. Перевод с немецкого И. И. Погожева под редакцией А. В. Михайлова. 328 стр., ц. 18 руб. Госэнергоиздат, 1949.

Изложение большей части материала рецензируемой книги ведется абстрактно, с отрывом от технического содержания излагаемого предмета. Теоретический материал почти не иллюстрируется какими-либо техническими примерами, что придает книге схоластический, формальный характер. В книге, объемом свыше 22 печатных листов, приводится только один и то крайне элементарный пример системы автоматического регулирования.

Это обстоятельство значительно обесценивает книгу как для начинающего читателя, так и для практика. Что касается специалиста, интересующегося теорией автоматического регулирования, то он почерпнет для себя некоторое количество интересного материала, главным образом, из части четвертой «Прерывное регулирование» и из раздела «Специальные контуры регулирования» второй части; остальной материал книги вряд ли представит для него интерес.

Поясним сказанное выше на нескольких примерах.

1. Читатель, прочитав введение и раздел «Контур регулирования и его элементы», так и не поймет что такое система регулирования и какие реальные конструкции и устройства авторы понимают под квадратами, изображенными на рис. 1.

2. Раздел «Линейная передающая система», занимающий более двух печатных листов, содержит краткое конспективное изложение операторного исчисления и совершенно бесполезен, так как начинающий читатель отсюда ничего не усвоит, а читатель, знакомый с операторным исчислением, в этом материале не нуждается.

3. Раздел «Математическое исследование контура регулирования» изложен формально и неудовлетворительно. Остается неясным, как составить дифференциальное уравнение системы регулирования. Критерии Гурвица и Найквиста излагаются конспективно и поверхностно. Неясна возможность использования некоторых результатов. Например, непонятно, где на практике может встретиться параллельное включение передающих систем (стр. 70). Понятие добротности регулирования формулировано чётко и небрежно. Автор не указывает, что он понимает под продолжительностью установившегося процесса и для какого возмущения определяется максимальное отклонение регулируемой величины.

4. Часть вторая «Непрерывное регулирование», занимающая около трети книги, хотя и содержит некоторый материал, интересный для специалиста, все же в большей своей части страдает теми же недостатками, что и вся книга в целом. Так, например, § 51, полностью заимствованный авторами из книги В. Вагнера «Операторное исчисление» (на немецком языке), бесполезен для систем автоматического регулирования, поскольку случай, при котором характеристическая функция замкнутой системы автоматического регулирования имеет n равных корней, на практике никогда не имеет места. Далее, развиваемый авторами метод, при котором сложная система заменяется системой, состоящей из одного или двух инерционных звеньев и обладающей, кроме того, запаздыванием, в значительной степени лишен практического интереса, поскольку авторы не дают способа, с помощью которого можно было бы расчетным путем по параметрам реальной системы найти параметры эквивалентных простых звеньев и время запаздывания.

Также имеет очень ограниченное практическое применение предлагаемый авторами способ определения параметров системы, основанный на минимуме площади, ограниченной кривой переходного процесса. Этот способ основан на допущении того, что процесс регулирования протекает аperiodически, т. е., очевидно, по монотонной кривой. Между тем технические требования, предъявляемые к современным системам регулирования, а в особенности к следящим системам, из условия быстрейшего заставляют выбирать параметры систем так, чтобы переходный процесс имел колебательный характер.

5. Часть третья «Нелинейности» написана совершенно неудовлетворительно. В настоящее время невозможно представить себе даже краткое изложение теории нелинейных цепей, игнорирующее работы советских ученых в этой области. Глава о нелинейностях в рецензируемой книге бедна по содержанию и изложена на теоретическом уровне, соответствующем состоянию этого вопроса лет 20 тому назад.

Несомненно ценный материал содержится в четвертом разделе книги «Прерывное регулирование». В этом разделе решается ряд интересных задач динамики прерывного регулирования, как, например, систем регули-

рования с падающей дужкой. Показывается использование критерия Гурвица для отыскания условий устойчивости систем прерывного регулирования, переходный процесс в которых описывается линейными уравнениями в конечных разностях.

Нужно отметить исключительно тщательную и добросовестную работу переводчика и редактора. Однако, технические термины не всегда выбраны удачно. Например, переводчик и редактор применяют термины «объект регулирования» вместо «регулируемый объект», «операционное исчисление» вместо «операторное исчисление», «отставание» вместо «запаздывание» — последний термин принят в теоретической электротехнике и математической физике при рассмотрении явлений в цепях с распределенными постоянными и ни в коем случае не является тождественным, как это утверждает редактор в предисловии, термину «инерционность».

Редактору следовало бы заменить ссылки на труднодоступные читателю иностранные курсы операторного ис-

числения (стр. 37), ссылками на соответствующие пособия на русском языке. Значительная часть иностранной литературы, приведенной в конце книги, уже переведена и ее следовало бы перенести в список литературы на русском языке.

В заключение нужно отметить, что издание перевода рецензируемой книги можно оправдать только бедностью литературы на русском языке по автоматическому регулированию, в то время как советские ученые имеют ряд значительных достижений в области теории автоматического регулирования. Можно не сомневаться в том, что если бы переводчик и редактор, являющиеся ведущими специалистами в области автоматического регулирования, использовали бы время, потраченное ими на перевод и редактирование для написания оригинальной книги на эту же тему, то получилась бы книга значительно более ценная, чем рецензируемая.

Кандидат техн. наук Д. И. МАРЬЯНОВСКИЙ



Е. Л. ШАЦ. РЕМОНТ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТРАНСФОРМАТОРОВ. 169 стр., ц. 10 руб. Издательство Министерства промышленности строительных материалов РСФСР, 1949.

В условиях небольших предприятий ремонт электрических двигателей переменного тока и силовых трансформаторов высшего напряжения 6 ÷ 10 квт представляет большие трудности. Рецензируемая книга излагает методы выполнения этих работ в условиях простейшей мастерской.

Книга состоит из трех частей. Первая часть посвящена ремонту асинхронных электродвигателей и силовых трансформаторов. Здесь последовательно изложен весь технологический процесс ремонта асинхронных электрических двигателей мощностью 0,52—100 квт. Подробно разобраны вопросы дефектирования машин; приведены формы дефектировочных карт, перечислены стадии работы и способы исполнения.

Весьма содержательно изложены вопросы перемотки машин. Автор, основываясь на своем личном опыте, приводит ряд простейших приспособлений, которые в большинстве своем могут быть изготовлены собственными силами на местах из имеющихся под рукой материалов. Вспомогательные станки, рекомендуемые автором для использования в процессе бандажирования, имеют простую конструкцию и также могут быть изготовлены из недефицитных материалов.

Эксплуатация электродвигателей связана с частыми ремонтами механической части: перезаливкой и расчоткой скользящих подшипников, заменой подшипников, проточкой и шлифовкой контактных колец, шеек валов и др. Автор приводит ряд рациональных способов выполнения этих работ с помощью несложного оборудования.

Вопрос ремонта силовых трансформаторов освещен менее подробно. Однако, и здесь автор не ограничивается общими указаниями, а дает ряд конкретных способов выполнения этой работы.

Во второй части книги излагаются вопросы послеремонтного контроля и поверочных

расчетов. Автор приводит несложную методику поверочных расчетов асинхронных двигателей и трансформаторов. В условиях небольших предприятий необходимость поверочного расчета из-за изменения какого-либо параметра (мощности, скорости вращения, напряжения) представляется нередко.

Третья часть книги посвящается обслуживанию электрических машин. Излагаются методы наблюдения, осмотра, проверки. Автор разбирает причины неисправностей и предлагает способы их устранения.

Наряду с общей положительной оценкой рецензируемой книги, нельзя не отметить некоторые ее недостатки. В первой части книги явно неполно освещен вопрос ремонта роторных обмоток. В качестве материала для заливки подшипников автор рекомендует «Альту-син—Д»; этот материал в ремонтной практике распространения не получил, и указания о нем излишни. Ничего не сказано в книге о подготовке изоляционного масла; между тем вопросы регенераций и сушки масла имеют весьма большое значение в эксплуатационной практике. Методика поверочного расчета машин, приведенная во второй части книги, должна быть несколько расширена. Часто, например, возникает необходимость расчета основных параметров двигателя при отсутствии паспортных и обмоточных данных; способов выполнения этой работы автор не приводит.

Имеющиеся в книге инж. Е. Л. Шац недостатки, которые желательно учесть и исправить при повторном издании, не снижают значительной ценности книги. Эта книга — нужное и полезное пособие для практиков-ремонтников, должна быть с удовлетворением принята широкими кругами энергетиков небольших предприятий и сельского хозяйства.

Инж. А. М. ГАНЕЛИН
ВИЭСХ



М. Ю. ПОШЕРСТНИК и Н. Г. ТУРКИН. ПРОИЗВОДСТВО КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ. 136 стр., ц. 4 руб. 15 коп. Госэнергоиздат, 1949.

Выпуск книги, посвященный технологии производства кабелей связи, следует приветствовать. Давно назрела острая необходимость в технической литературе по этой отрасли кабельной техники. Изданная в 1933 г. книга В. Д. Лебедева «Телефонные кабели» в настоящее время устарела, а книга В. А. Вишневого «Производство кордельных кабелей», вышедшая в 1940 г., содержит только описание изолирования и скрутки одного типа кабелей связи — кабелей с кордельно-бумажной изоляцией. К тому

же в настоящее время обе упомянутые книги являются библиографической редкостью.

Однако, рецензируемая книга не оправдала возложенных на нее надежд, так как ее содержание во многом не соответствует современному уровню развития кабельной техники, а отсутствие четкого плана изложения, небрежная редакция и плохой подбор иллюстраций затрудняют восприятие материала. Кроме того, в большинстве глав не содержится ряда технических данных, необходимых для

книг, посвященных технологии производства. Отсутствие этих данных в значительной мере обесценивает содержание книги.

В главе I отсутствует графическая схема построения линий связи, с помощью которой можно просто и наглядно иллюстрировать принцип классификации кабелей по области применения. Вместо этого, нарушая единый принцип классификации (стр. 8), часть кабелей авторы разделяют по области применения, а другую — по роду изоляции.

Авторы книги уделяют очень мало внимания применяемому в настоящее время способу изолирования жил городских телефонных кабелей спиральной обмоткой бумажной лентой, хотя подробно описывают устаревший способ изолирования треугольником.

Производству высокочастотных кабелей дальней связи с изоляцией из стирофлекса в книге уделено всего 8 строк.

О производстве кабелей для передачи частот до 60 кГц написано всего 10 строк, причем не объяснено главное: с помощью каких технологических мероприятий обеспечивается изготовление кабелей с улучшенными характеристиками.

Авторы подробно описывают старые малопроизводительные станки, но ничего не сообщают читателю о современных быстроходных станках, установленных на ряде отечественных кабельных заводов.

Так, в книге описаны весьма примитивные вертикальные парокрутильные станки и громоздкий старый восьмиклетьевой станок общей скрутки, но не уделено места более совершенным горизонтальным парокрутильным станкам и быстроходным дисковым крутильным машинам.

Существенным недостатком книги является отсутствие в ней целого ряда необходимых технологических сведений.

В разделе «Бронирование» нет основных характеристик станков, пропущено описание центрального бронепроволочника, не указаны размеры применяемой бронепроволоки.

В главе VII нет технических характеристик основного оборудования: изолирующих, крутильных и комбинированных крутильно-изолирующих машин. В этой главе имеется описание двухклетьевого крутильной машины, но по существу ничего не сказано об одноклетьековой машине, нашедшей большое применение в кабельной технике; нет значений коэффициента шага скрутки кабелей, линейных скоростей, чисел оборотов клетей и тому подобных необходимых сведений.

В главе IX (Испытания кабелей связи) не приведены электрические схемы и совершенно не уделено внимания одному из важнейших испытаний — измерению коэффициентов связи.

Книга весьма плохо иллюстрирована. Описание корделеобмотчика (стр. 92) не сопровождается чертежом и потому малопонятно. Чертежи основных узлов бумажно-массовой машины в книге не приведены, что весьма усложняет усвоение материала.

В некоторых формулах, приведенных в книге, не указаны единицы измерения, что не дает возможности пользоваться формулами для практических расчетов.

Одновременно с отсутствием в книге ряда необходимых сведений она загромождена лишними данными, органически не связанными с остальными разделами. Так, в книге, посвященной краткому изложению технологии производства кабелей связи не следовало приводить теорию обмотки пряжей. Теоретический материал главы II не связан с остальными частями книги; к тому же, в столь сжатом виде этот теоретический материал не может дать читателю ничего полезного (особенно это относится к определению затухания и переходных токов).

Большим недостатком рецензируемой книги является наличие многочисленных ошибок и опечаток, попавших в нее в результате недозмотра как самих авторов, так и редактора И. В. Барковского. Приведем лишь несколько примеров.

В 1947 г. стандарт на кабели для сигнализации и блокировки был изменен. Однако, авторы не учли происшедшего изменения стандарта, в результате чего на стр. 35 и 36 содержится 7 ошибок и одна совершенно неправильная таблица (№ 13).

Ошибочно дана единица измерения удельного объема сопровитвления $ом/см^3$ вместо $ом \cdot см$ (стр. 44).

Ошибочно указано, что пайка жил городских телефонных кабелей производится встык с помощью серебряного припоя (стр. 62—63). Фактически, ни на одном из кабельных заводов такой способ не применяется, а вместо него производится простая скрутка жил с последующим залуживанием.

На стр. 12 d обозначает диаметр голой проволоки, а на стр. 14 оказывается, что d — расстояние между осями проводов, равное диаметру изолированной жилы.

Рецензируемая книга «предназначена для мастеров и рабочих кабельной промышленности». Сегодняшний уровень производства кабелей связи и большие задачи, стоящие перед этой отраслью электротехники, требуют высокой технической грамотности рабочих и мастеров и поэтому учебное пособие для них должно быть написано на более высоком уровне, чем рецензируемая книга.

Инж. Р. М. ЛАКЕРНИК, Инж. Д. Л. ШАРЛЕ



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

Издания 1949 г.

ГОРТЕР К. ПАРАМАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ. Под редакцией и с вступительной статьей С. А. Альшулер и Б. М. Козырева. 144 стр., ц. 9 руб. 60 коп. Изд-во иностранной литературы.

КРАТКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Под общей редакцией В. А. Зиновьева. Часть первая. 532 стр., ц. 17 руб 15 коп. Гостехиздат.

Первая часть справочника содержит девять отделов. В отделе втором — «Физика», составленном проф. К. П. Яковлевым, имеется небольшой (7 страниц) раздел V «Магнитные и электрические явления».

КЭЙ Д., ЛЭЙ Т. СПРАВОЧНИК ФИЗИКА-ЭКСПЕРИМЕНТАТОРА. Перевод Е. Е. Фридман под ред. Д. Франк-Каменского. 299 стр., ц. 29 руб. 50 коп. Гос. изд-во иностранной литературы.

ЛЕВИТИН Е. А., ГИРШГОРН Ш. И., КРАКАУ В. Н., ПЕВЦОВ В. П. РАДИОВЕЩАТЕЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ. Ремонт и наладка. 400 стр. + вклейки, ц. 26 руб. Всесоюзное кооперативное издательство.

ПТИЦЫН С. В. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКСИДНОМ КАТОДЕ. 136 стр., ц. 4 руб. 95 коп. Гостехиздат.

Изготовление большинства современных электронных приборов было бы невозможно без применения оксидного катода, представ-

ляющего источник термоэлектронов, состоящий из оксидов щелочно-земельных металлов — бария, стронция и кальция. Оксидный катод обладает решительными преимуществами перед другими катодами и, главным образом, благодаря низкой рабочей температуре (750—850°С). В книге не только освещена природа явлений, протекающих в оксидном катоде, но поставлен целый ряд проблемных тем, связанных с применением оксидного катода, например, в импульсном режиме. Большое внимание уделено изложению результатов отечественных работ по изучению оксидного катода.

САХАРОВ Л. Н. КАК ПОСТРОИТЬ КОЛХОЗНУЮ ГИДРО-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЮ. 36 стр., ц. 60 коп. Саратовское областное государственное изд-во.

СЕЛВУД П. МАГНИТОХИМИЯ. Перевод Б. И. Болтакса под редакцией Я. Г. Дорфмана. 283 стр., ц. 20 руб. Изд-во иностранной литературы.

* **СНОЕК Я. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ НОВЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.** Перевод Л. А. Шубиной под ред. С. В. Вонсовского. 222 стр., ц. 14 руб. Изд-во иностранной литературы.

ТАЖИЕВ И. Т. ЭНЕРГИЯ ВЕТРА КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БАЗА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА КАЗАХСТАНА. Под общей редакцией Н. В. Красовского, с предисловием В. П. Ветчинкина. 199 стр. Казахское государственное изд-во.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензий.

ТРОЯНОВСКИЙ В. В. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЧАСЫ. 138 стр., ц. 3 руб. 90 коп. Машгиз.

* ШАЦ Е. Л. РЕМОНТ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ и ТРАНСФОРМАТОРОВ. 168 стр., ц. 10 руб. Изд-во Министерства промышленности строительных материалов.

Рецензия на эту книгу помещена в настоящем номере журнала (стр. 95).

ШУСТЕР В. Г. НЕМЕЦКО-РУССКИЙ СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ ПО РАДИО. 439 стр. (около 12 000 терминов), ц. 8 руб. 20 коп. Гостехиздат.

ЯСНОГОРОДСКИЙ И. З. НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ. 128 стр., ц. 8 руб. 20 коп. Машгиз.

Метод нагрева в электролите открывает широкие возможности для применения во многих отраслях промышленности. Большая скорость нагрева сочетается с возможностью регулирования глубины прогрета; этот метод позволяет совмещать нагрев и деформацию заготовок, деталей. Автор метода — автор книги — удостоен Сталинской премии. В книге рассматриваются физические основы процесса электронагрева деталей и заготовок в электролите, методы нагрева, конструкции и особенности автоматов для нагрева в электролите и области их применения. В книге также описан оригинальный комбинированный агрегат, в котором одновременно осуществляется нагрев и штамповка заготовок.

Издания 1950 г.

ПЕЧОНЫЙ Х. Д. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СОВЕТСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ. (Украинское НИТО автомобильного транспорта). 178 стр., ц. 6 руб. Гостехиздат Украины.

ТРУДЫ МОСКОВСКОГО ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. В. М. МОЛОТОВА. Выпуск V (Гидроэнергетика). Под редакцией Т. Л. Золотарева (Московский энергетический институт). 119 стр., беспл. Изд. МЭИ.

В сборник входят статьи: Т. Л. Золотарева «Гидроэнергетическая наука», Д. О. Сейфулла «Исследование характеристик энергетического процесса гидроагрегатов методов особых режимных точек», И. А. Гимиского «Графический метод определения потерь при сезонном регулировании гидроэлектрических станций», К. К. Кузьмина «Принципы классификации машинных зданий гидроэнергетических станций», Л. Д. Кароль «Расчет энергетических параметров гидроаккумулирующих станций», С. М. Слисского «Современное состояние проблемы использования приливо-отливной энергии океанов и морей», Б. М. Лось «Приближенный метод расчета уровней в нижних бьефах гидроэлектростанций при суточном регулировании».

ТРУДЫ СТУДЕНЧЕСКОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА Под общей редакцией В. А. Голубиова. Выпуск IV. Прикладная электроника. (Московский энергетический институт им. Молотова). 43 стр., беспл. Изд. МЭИ.

Сборник, подготовленный к печати Зав. кафедрой прикладной электроники МЭИ доц. А. А. Соколовым, содержит работы студентов: Е. А. Глазова «Новая схема электронного вычитателя», Г. В. Кириллова «Селективный усилитель низкой частоты», К. М. Котова «Управление частотой мултивибратора посредством сеточного напряжения», В. Д. Лобзикова «Электронный цифровисец», Г. П. Прудковсого и О. В. Прудковской «Электронная схема низкочастотного фильтра, управляемая изменением одного параметра», Н. А. Фоминой «Стабилизатор светового потока газосветной лампы» и Г. Н. Шур «Электронный буквоисец».

ШИЛЛИНГ В. СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ, ИНВЕРТОРОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ. Перевод с немецкого И. В. Антика под редакцией И. Л. Каганова. 464 стр., ц. 24 руб. Госэнергоиздат.

Книга предназначена для инженеров, проектирующих выпрямительные схемы и устройства. Она отличается ясностью и строгостью

систематичностью изложения. Автор оригинально использует метод наложения для исследования сложных процессов многофазных схем. Детально рассматриваются процессы коммутации и роль индуктивности в различных звеньях выпрямительных схем. Решение задач доведено до инженерной методики. Наличие большого числа графиков в безразмерных величинах избавляет от утомительных вычислений экспоненциальных и сложных тригонометрических функций. В книге нашли отражение почти все основные вопросы классической теории преобразования токов на уровне конца 30-х годов.

Книга распадается на четыре раздела. В первом разделе «Однофазные схемы» рассмотрен управляемый однофазный выпрямитель при активной, индуктивной и смешанной нагрузке и при работе на против-э. д. с. (двигатель, батарея) с ограничением тока омическим или индуктивным сопротивлением. В конце раздела дано введение в теорию многофазных схем, рассматриваемых как совокупность сдвинутых по фазе однофазных схем. Во втором разделе «Многофазные схемы» рассмотрены токи и напряжения в многофазном дросселе при несимметричном включении, общие условия для распределения токов в трансформаторах при несимметричной нагрузке; токи в одно-, двух-, трех- и шести фазных трансформаторах; теория неуправляемого выпрямителя со связанными анодными дросселями при работе его на против-э. д. с. при наличии или отсутствии большого катодного дросселя; теория того же выпрямителя с первичным дросселем, работающего на против-э. д. с., при наличии или отсутствии большого катодного дросселя; теория управляемого выпрямителя с большим катодным дросселем. В заключение раздела даны практические ценные числовые примеры расчета. Третий раздел «Инверторные схемы» состоит из двух глав. В одной главе рассмотрены инверторы, ведемые сетью, а в другой — самовозбуждаемые инверторы. В части А первой из этих глав — излагается теория инвертирования как развития принципа выпрямления, в части Б — описаны эксплуатационные характеристики выпрямительно-инверторных схем. В главе «Самовозбуждаемые инверторы» рассмотрены параллельный инвертор и самовозбуждающийся преобразователь частоты с промежуточной цепью постоянного тока. В четвертом разделе «Схемы преобразователей частоты и вентиляльные машины» рассмотрены: преобразователи с огибающей кривой, преобразователь с переменным углом управления, вентиляльные машины и вентиляльные схемы как нагрузка сети.



ПОПРАВКИ

В статье Л. М. Шильдинера (Электричество, № 10, 1949) на странице 48, левая колонка, 17 строка сверху слова: «поперечной м. д. с.» — следует исключить.

В заметке П. Л. Калантарова «Об электромагнитных единицах» (Электричество, № 4, 1950) следует читать:

на стр. 78, правая колонка, 18-ую строку снизу: «... ортодоксальный классический эрстед, и никакных...»

» » 79, левая колонка, 1-ую строку сверху: «... того же самого классического эрстеда, равного...»

