

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



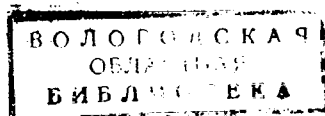
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1953

8

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Г. И. Атабеков</b> — Вопросы релейной защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией	3
<b>П. Ф. Гогицаишвили</b> — О поэтапном построении городских распределительных электросетей	11
<b>А. Г. Москалев</b> — Запись частоты для определения частотных динамических характеристик энергосистем	14
<b>И. Л. Каганов</b> — Применение электроники в промышленности	16
<b>В. В. Фетисов</b> — Переходное падение напряжения и потери под щетками в машине постоянного тока при расстроенной коммутации	23
<b>А. И. Вольдек</b> — Влияние неравномерности воздушного зазора на дифференциальное рассеяние асинхронной машины	32
<b>П. А. Ионкин</b> — Применение эквивалентных схем активного четырехполюсника и шестиполусника для расчета нелинейных цепей	39
<b>Р. А. Воронов</b> — Расчет токов и напряжений в цепях с безинерционными нелинейными элементами	44
<b>В. Л. Грановский и И. А. Лукацкая</b> — Природа обратного тока в ионном вентиле при высоком обратном напряжении	49
<b>В. О. Арутюнов и П. Н. Горюнов</b> — К обобщенной теории индукционных электроизмерительных приборов	54
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
<b>Т. П. Мусатов и В. П. Коваленко</b> — Включение мощных синхронных компенсаторов без сушки	59
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
<b>Я. Г. Дорфман</b> — Выдающийся русский физик Г. В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве	61
<b>В. И. Попков и Л. З. Сидлик</b> — Об изобретении расщепленных проводов	67
<b>СТАНДАРТЫ И НОРМЫ</b>	
<b>Н. А. Цекун</b> — К пересмотру правил защиты подземных металлических сооружений от коррозии	70
<b>ДИСКУССИИ</b>	
К статье М. И. Гитмана „Вопросы электроснабжения сельского хозяйства в зонах крупных гидроэлектростанций“ <b>И. А. Будзко</b> . Правила устройства электротехнических установок <b>М. Д. Горенштейн, В. А. Караман, М. Д. Глейзер</b> . Термины и определения в Правилах изготовления взрывозащищенных машин и электрических аппаратов <b>С. М. Лившиц</b>	73
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b>	
О регулирующем эффекте нагрузки. Два термина по электротяге.	78
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Новое в технике освещения очистных забоев. Некоторые новые применения диэлектрического нагрева. Развитие системы 380 кВ в Швеции. Электрификация железных дорог Северной Франции на однофазном токе 50 Гц. Уточненный расчет напряжения короткого замыкания трансформаторов. Упрощенный графический анализ работы дросселя насыщения при установившемся режиме.	80
<b>ЗАОЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“</b>	
<b>ХРОНИКА</b>	
Конференция по осветительным установкам. От ИАТ АН СССР	92
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
<b>Г. В. Сербиновский и Э. С. Иохвидов</b> — Рецензии на книги Д. С. Чукаева „Электроснабжение городов“ и Н. В. Волоцкого „Электрические установки жилых домов“.	94
Номограмма для решения полного кубического уравнения (на третьей полосе обложки)	



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,  
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**  
**зунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, доктор 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.

# Вопросы релейной защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией

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

Москва

**Введение.** Разработке проблемы продольной компенсации высоковольтных линий электропередачи, т. е. последовательного включения в линию устройств, компенсирующих в той или иной степени ее индуктивность, посвящены многочисленные труды советских ученых и инженеров.

Известно, что предел передаваемой мощности по условиям статической устойчивости при постоянстве напряжений по концам электропередачи обратно пропорционален параметру  $|A_{12}|$  четырехполюсника, замещающего электропередачу. Поэтому уменьшение параметра  $|A_{12}|$  с помощью последовательно включенных конденсаторов является одним из средств повышения предела передаваемой активной мощности.

В последнее время в связи с проектированием и сооружением высоковольтных линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией возникла практическая потребность в разработке вопросов защиты компенсированных линий и самих компенсирующих устройств от коротких замыканий [Л. 1...3, 7 и 8].

Выбор типов защиты и способов ее выполнения зависит от схемы электропередачи, заданных режимов ее работы и параметров системы, обуславливающих выбор основных требований к релейной защите и электроавтоматике электропередачи.

С переходом на более высокие напряжения возрастают расстояния между проводами и снижается вероятность возникновения многофазных коротких замыканий.

На линиях 400 кВ двухфазные короткие замыкания, надо полагать, будут представлять относительно редкое явление, возникновения же симметричных трехфазных коротких замыканий (помимо перехода в них несимметричных коротких замыканий) практически ожидать, видимо, не придется. Поэтому защита таких линий во избежание реагирования на перегрузки и качания может быть выполнена с использованием составляющих обратной и нулевой последовательностей.

Однофазные отключения и возможность работы электропередачи с отключенной фазой (в цикле ОАПВ) вносят осложнения в релейную защиту в связи с необходимостью выбора поврежден-

*Рассмотрена работа направленных, дистанционных и дифференциальных реле на линиях электропередачи с продольной емкостной компенсацией в зависимости от выбора местоположения конденсаторных батарей и степени компенсации. Даны приближенные расчетные выражения для выбора зон действия дистанционных реле. Рассмотрен ряд вопросов, связанных с пофазным шунтированием конденсаторов продольной компенсации в поврежденных фазах. Статья печатается в порядке обсуждения.*

ной фазы и с появлением составляющих обратной и нулевой последовательностей при неполнофазных режимах. Поэтому требования, предъявляемые к релейной защите линий электропередачи, существенно зависят от

того, предусматривается ли однофазное или трехфазное отключение линии.

В дополнение ко всем требованиям, которые обычно предъявляются к быстродействующей релейной защите линий электропередачи, при наличии продольной емкостной компенсации возникают некоторые особые требования, к числу которых относятся следующие.

1. Автоматическое шунтирование конденсаторов продольной компенсации при сверхтоках и дешунтирование их при исчезновении токов короткого замыкания.

2. Правильная работа релейной защиты линий электропередачи в случае автоматического шунтирования конденсаторов в одной, двух или трех фазах (в зоне или вне зоны действия защиты).

3. Быстрое отключение короткого замыкания и в связи с этим применение двух видов основной защиты, надежно резервирующих друг друга (по условиям динамической устойчивости электропередачи).

4. Учет специфических особенностей линий электропередачи большой протяженности (емкостная проводимость, реакторы поперечной компенсации, коронирование и т. д.).

5. Учет переходных процессов в линиях и в конденсаторах, в начальные моменты коротких замыканий, а также при автоматических повторных включениях и коммутационных переключениях.

В линиях с продольной емкостной компенсацией можно ожидать появления составляющих тока пониженной частоты (частоты собственных колебаний). При этом, как показывают теоретические исследования, даже при симметричных трехфазных коротких замыканиях при наличии емкостной продольной компенсации возникают токи обратного чередования фаз пониженной частоты.

Учет переходных процессов в первичных и вторичных цепях при аналогических методах

исследований работы релейной защиты, в общем случае, весьма затруднителен.

Настоящая статья посвящена рассмотрению влияния продольной емкостной компенсации на работу реле различного типа: реле направления мощности, дистанционных реле, балансных токовых реле и др. В качестве первого приближения рассмотрение проведено без учета апериодических составляющих. Предполагается также, что реле отстроены от влияния гармоник, отличных от основной, и поэтому высшие и субгармонические колебания не учитываются.

Наряду с отстройкой защиты от влияния гармонических составляющих самостоятельный интерес представляет вопрос о возможности использования гармонических составляющих для целей релейной защиты. Этот вопрос нуждается в отдельном исследовании.

В зависимости от конкретных условий указанные выше типы реле могут применяться на практике в различных комбинациях. Дифференциальный и дистанционный принципы могут использоваться как самостоятельно (защита параллельных линий, резервная защита и т. д.), так и в сочетании с высокочастотным принципом. При этом дистанционные реле могут выполнять функции органов направления и пусковых органов высокочастотных защит, дистанционных омметров и дистанционных избирателей фаз. То же можно сказать и об органах направления мощности, которые могут применяться в качестве составных элементов токовых, дистанционных и высокочастотных защит. Поведение вышеуказанных реле при коротких замыканиях зависит от выбора степени компенсации и местоположения конденсаторных батарей.

**Степень компенсации.** Параметр  $A_{12}$ , от которого зависит величина активной мощности на отправном и приемном концах электропередачи, учитывает первичные параметры линии, величину сопротивления и местоположение конденсаторов продольной компенсации. Имея размерность сопротивления, параметр  $A_{12}$  в общем случае содержит активную и реактивную составляющие. Реактивная составляющая  $A_{12}$ , в свою очередь, представляет собой разность индуктивного и емкостного сопротивлений.

Под степенью компенсации ниже подразумевается отношение емкостной составляющей параметра  $A_{12}$  к индуктивной составляющей того же параметра. Степени компенсации, равной единице, соответствует случай, когда реактивная составляющая  $A_{12}$  равна нулю.

При замене четырехполюсника эквивалентной П-образной схемой сопротивление продольного элемента П-образной схемы равно параметру  $A_{12}$ . Поэтому степени компенсации, равной единице, соответствует случай, когда реактивное сопротивление продольного элемента П-образной эквивалентной схемы равно нулю.

Поскольку выражение параметра  $A_{12}$  зависит от местоположения конденсаторов, то степень компенсации также изменяется в зависимости от местоположения конденсаторов.

Положим, что конденсаторная батарея, имеющая сопротивление  $x_c$ , включена в некоторой промежуточной точке электропередачи, разделяющей ее на два участка. Обозначим параметры четырехполюсников, эквивалентных этим двум участкам электропередачи, соответственно через  $A'_{11}$ ,  $A'_{12}$ ,  $A'_{21}$ ,  $A'_{22}$  и  $A''_{11}$ ,  $A''_{12}$ ,  $A''_{21}$ ,  $A''_{22}$ .

Параметры четырехполюсника, эквивалентного всей электропередаче, определяются в результате перемножения трех матриц:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -jx_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A''_{11} & A''_{12} \\ A''_{21} & A''_{22} \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} A'_{11}A''_{11} - jx_c A'_{11}A''_{21} + A'_{12}A''_{21} & A'_{11}A''_{12} - jx_c A'_{11}A''_{22} + A'_{12}A''_{22} \\ A'_{21}A''_{11} - jx_c A'_{21}A''_{21} + A'_{22}A''_{21} & A'_{21}A''_{12} - jx_c A'_{21}A''_{22} + A'_{22}A''_{22} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Таким образом, выражение  $A_{12}$  имеет вид:

$$A_{12} = A'_{11}A''_{12} + A'_{12}A''_{22} - jx_c A'_{11}A''_{22}. \quad (2)$$

В тех случаях, когда активными потерями в линии можно пренебречь, первые два слагаемых выражения (2) представляют собой индуктивное сопротивление и согласно принятому выше определению степень компенсации находится по формуле:

$$k = \frac{x_c A'_{11}A''_{22}}{A'_{11}A''_{12} + A'_{12}A''_{22}} = \frac{x_c}{\left| \frac{A'_{12}}{A'_{11}} + \frac{A''_{12}}{A''_{22}} \right|}. \quad (3)$$

Величины  $\frac{A'_{12}}{A'_{11}}$  и  $\frac{A''_{12}}{A''_{22}}$  в знаменателе выражения

(3) представляют входные сопротивления двух вышеуказанных четырехполюсников, измеренные со стороны, присоединенной к конденсаторной батарее при замкнутых противоположных зажимах (отправного и приемного концов).

Если через  $l'$  и  $l''$  обозначить длину участков линии электропередачи, разделенных конденсаторной батареей, и положить, что в силу отсутствия активных потерь характеристическое сопротивление линии вещественно ( $Z = z$ ), а коэффициент распространения — мнимый ( $\gamma = ja$ ), то выражение (3) примет вид:

$$k = \frac{x_c}{z(\operatorname{tg} al' + \operatorname{tg} al'')}. \quad (4)$$

При неизменных значениях  $x_c$ ,  $z$ ,  $a$  и  $l' + l'' = l$  максимум степени компенсации соответствует условию:

$$\frac{\partial k}{\partial l'} = 0, \text{ откуда } l' = 0.5l.$$

Таким образом, при прочих равных условиях степень компенсации получается наибольшей при расположении конденсаторной батареи в середине линии электропередачи. В этом случае

$$k = \frac{x_c}{2z \operatorname{tg} \frac{al}{2}}. \quad (5)$$

При установке конденсаторной батареи в начале или в конце линии:

$$k = \frac{x_c}{z \operatorname{tg} al}. \quad (6)$$

Для участков линии электропередачи малой и средней протяженности  $2 \operatorname{tg} \frac{al}{2} \approx al$ . В этом случае

$$k = \frac{x_c}{zal}, \quad (7)$$

т. е. конденсаторная батарея компенсирует индуктивность линии протяженностью  $kl$ .

По мере возрастания длины линии погрешность расчета по формуле (7) увеличивается, а именно: при значениях  $l$  250, 500 и 1000 км соответственно получаются погрешности 1, 9 и 19%.

**Зависимость параметров электропередачи от местоположения конденсаторных батарей и степени компенсации.** Конденсаторы продольной компенсации могут быть установлены вблизи одного из концов линии электропередачи (рис. 1, а) или в середине электропередачи (рис. 1, б). При

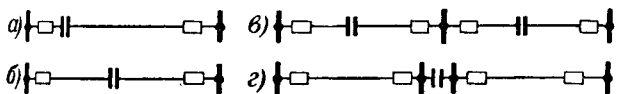


Рис. 1. Варианты расположения конденсаторов продольной компенсации.

наличии смежных участков, например при связанном варианте электропередачи с переключательными пунктами, конденсаторные батареи могут располагаться между шинами переключательных пунктов (рис. 1, з), в середине каждого участка (рис. 1, в) или вблизи одного из концов.

Выше было показано, что при прочих равных условиях степень компенсации получается наибольшей при расположении конденсаторной батареи в середине электропередачи. Иначе говоря, при одной и той же величине сопротивлений конденсаторных батарей вариант рис. 1, б обеспечивает большую компенсацию индуктивности линии, чем вариант рис. 1, а.

При одинаковой же степени компенсации вариант рис. 1, б требует применения конденсаторной батареи с меньшим емкостным сопротивлением  $x_c$ , чем вариант рис. 1, а.

На основании (2) и (3) зависимость параметра  $A_{12}$  от коэффициента  $k$  определяется формулой

$$A_{12} = A'_{11}A''_{12} + A'_{12}A''_{22} - kA'_{11}A''_{22}\left(\frac{A'_{12}}{A'_{11}} + \frac{A'_{12}}{A'_{22}}\right).$$

С учетом того, что

$$\left. \begin{aligned} A'_{11} &= A'_{22} = \cos al', & A''_{11} &= A''_{22} = \cos al'', \\ A'_{12} &= jz \sin al', & A''_{12} &= jz \sin al'', \\ A'_{21} &= j \frac{1}{z} \sin al', & A''_{21} &= j \frac{1}{z} \sin al'', \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

получаем:

$$A_{12} = jz(1 - k) \sin al. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), функциональная зависимость  $A_{12}$  от коэффициента  $k$  неизменна при любом местоположении конденсаторной батареи в пределах данной электропередачи.

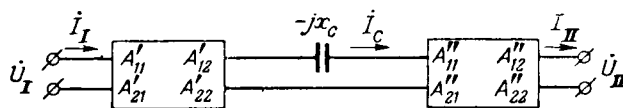


Рис. 2. Эквивалентная схема компенсированной линии электропередачи.

По мере приближения величины коэффициента  $k$  к единице  $A_{12}$  при отсутствии активных потерь стремится к нулю и напряжение  $\dot{U}_{II}$  приемного конца электропередачи приближается к напряжению  $\dot{U}_I$  отправного конца.

С ростом коэффициента  $k$  при неизменности векторов напряжений на концах электропередачи возрастают токи, протекающие по линии.

Положим, что конденсаторная батарея делит линию электропередачи на два участка (рис. 2), характеризуемых параметрами

$$A'_{11}, A'_{12}, A'_{21}, A'_{22} \text{ и } A''_{11}, A''_{12}, A''_{21}, A''_{22}.$$

Ток, протекающий через конденсаторную батарею, может быть найден на основе теории четырехполюсника по формуле:

$$\begin{aligned} i_c &= A'_{21}\dot{U}_{II} + A'_{22}i_{II} = A'_{21}\dot{U}_I + A'_{22}\frac{\dot{U}_I - A_{11}\dot{U}_{II}}{A_{12}} = \\ &= \frac{1}{A_{12}}[A'_{22}\dot{U}_I + (A'_{21}A_{12} - A'_{22}A_{11})\dot{U}_{II}]. \end{aligned}$$

Здесь  $A_{11}, A_{12}$  — параметры результирующего четырехполюсника, замещающего всю электропередачу.

На основании (1) и (3)

$$A_{11} = A'_{11}A''_{11} + A'_{12}A''_{21} - kA'_{11}A''_{21}\left(\frac{A'_{12}}{A'_{11}} + \frac{A'_{12}}{A'_{22}}\right),$$

откуда с учетом (8) получаем:

$$A_{11} = \cos al + k \cos al' \cdot \sin al'' (\operatorname{tg} al' + \operatorname{tg} al''). \quad (10)$$

Пользуясь соотношениями (8), (9) и (10) после ряда преобразований, получаем:

$$I_c = \frac{\cos \alpha l' \dot{U}_I - \cos \alpha l'' \dot{U}_{II}}{jz(1-k) \sin \alpha l}. \quad (11)$$

При расположении конденсаторов в середине линии ( $l' = l'' = 0,5l$ )

$$I_c = \frac{\dot{U}_I - \dot{U}_{II}}{j2z(1-k) \sin \frac{\alpha l}{2}}. \quad (12)$$

Напряжение на зажимах конденсаторной батареи равно произведению тока  $I_c$  на сопротивление батареи, т. е.

$$\dot{U}_c = -jx_c \cdot I_c,$$

откуда

$$\dot{U}_c = -\frac{k(\operatorname{tg} \alpha l' + \operatorname{tg} \alpha l'')}{(1-k) \sin \alpha l} (\cos \alpha l'' \dot{U}_I - \cos \alpha l' \dot{U}_{II}). \quad (13)$$

При  $l' = l'' = 0,5l$

$$\dot{U}_c = -\frac{k}{1-k} \frac{\dot{U}_I - \dot{U}_{II}}{\cos \frac{\alpha l}{2}}. \quad (14)$$

Естественно, что при одинаковой степени компенсации падение напряжения на зажимах каждой конденсаторной батареи в варианте с двумя батареями (рис. 1,б) меньше, чем в варианте с одной батареей (рис. 1,з).

Наличие продольной компенсации увеличивает токи короткого замыкания в системе. Наибольшего увеличения токов короткого замыкания следует ожидать при размещении конденсаторов продольной компенсации на отправном или приемном конце электропередачи. В этом случае емкость конденсаторов может при известных условиях скомпенсировать индуктивность системы и участка линии электропередачи от шин до места короткого замыкания, что повлечет за собой чрезмерное возрастание тока короткого замыкания.

С точки зрения возможного ограничения тока короткого замыкания при наличии продольной компенсации наиболее выгодным является размещение конденсаторов продольной компенсации в середине участков электропередачи (рис. 1,б и 1,в) или между шинами переключательного пункта (рис. 1,з), причем во избежание перекомпенсации индуктивности половины каждого из участков степень компенсации не должна превышать  $k = 0,5$ .

Поведение различных типов реле при коротких замыканиях в зависимости от местоположения конденсаторных батарей и степени компенсации. Анализ работы реле произведен применительно к указанным выше основным вариантам расположения конденсаторов продольной компенсации: 1) на одном из концов электропередачи (рис. 1,а), 2) в середине участка (рис. 1,б и 1,в) и 3) между шинами переключательного пункта (рис. 1,з).

Конденсаторная батарея расположена на одном из концов элек-

тропередачи (рис. 1,а). Предполагается, что защита линии охватывает весь участок, включая конденсаторную батарею, т. е. защита ближайшего к конденсаторной батарее конца установлена между шинами и батареей. При таких условиях в случае короткого замыкания на линии электропередачи вблизи конденсаторной батареи сопротивление между местом установки защиты и местом короткого замыкания будет иметь емкостный характер.

На линиях, на которых практическая возможность возникновения трехфазных коротких замыканий не исключена, при указанном виде повреждения неправильно будут действовать органы направления мощности, включенные на полные напряжения и токи (например реле, включенные по 90°-ной схеме). Объясняется это тем, что фаза остаточного напряжения на зажимах реле относительно тока в указанном случае противоположна обычной; поэтому реле направления мощности отказывает в действии<sup>1</sup>.

По той же причине возможен отказ в действии направленных дистанционных реле при коротких замыканиях на линии — междуфазовых и замыканиях на землю. Это обстоятельство исключает возможность применения направленных дистанционных реле в случае варианта рис. 1,а.

Если при коротком замыкании вблизи конденсаторов емкостное сопротивление последних достаточно велико для перекомпенсации индуктивности участка в сторону питающей системы, то применение дифференциально-фазных защит затруднено: ток короткого замыкания в перекомпенсированном участке получается опережающим, а на противоположном конце поврежденной линии — отстающим (дифференциально-фазная защита отказывает в действии). Такое положение наиболее вероятно в схеме рис. 1,а. В остальных случаях оно может иметь место при степени компенсации, большей  $k = 0,5$ .

Следует заметить, что если конденсаторы продольной компенсации, послужившие причиной отказа релейной защиты, окажутся в результате повышения напряжения на их зажимах зашунтированными защитным разрядником, релейная защита подействует правильно.

В случае если при связанной схеме электропередачи возможно шунтирование конденсаторов продольной компенсации при коротких замыканиях на соседнем участке, то применение быстродействующей поперечной защиты параллельных линий затруднено.

Действительно, при внешнем коротком замыкании могут оказаться зашунтированными конденсаторы только одной из параллельных цепей, так как при напряжении на разрядниках, близком к пробивному, искровые промежутки разрядников на параллельных цепях могут пробиваться не одновременно. Шунтирование конденсаторов

<sup>1</sup> Неправильные действия органов направления мощности обратной и нулевой последовательностей при коротком замыкании, в схеме рис. 1,а, практически исключаются благодаря индуктивному характеру сопротивлений от места установки реле до нулевых точек генераторов или силовых трансформаторов.

одной из цепей неизбежно вызовет перераспределение токов по параллельным цепям, результатом чего может явиться пробой искрового промежутка разрядника второй параллельной цепи. После ликвидации короткого замыкания конденсаторы будут дешунтироваться, причем также возможна некоторая неодновременность дешунтирования. Быстродействующая поперечная защита параллельных линий может при этом действовать неправильно.

Разрядники на установках продольной компенсации должны быть отстроены от токов качаний при отсутствии короткого замыкания. Если же при отсутствии короткого замыкания конденсаторы в одной из фаз окажутся зашунтированными, то это может повлечь за собой неправильное действие органов направления мощности обратной или нулевой последовательности в схемах токовой направленной или высокочастотной защиты.

Аналогичное положение может иметь место при внешних трехфазных короткого замыкания в системах, в которых практическая возможность возникновения трехфазных коротких замыканий не исключена. Как указывалось выше, для линий 400 кВ такой случай мало вероятен.

Вопрос о том, может ли направленная защита, снабженная органом направления мощности обратной (или нулевой) последовательности, действовать неправильно в случае шунтирования конденсаторов при отсутствии несимметричного короткого замыкания, решается в каждом конкретном случае отдельно в зависимости от схемы и параметров защиты и системы. Что касается шунтирования конденсаторов продольной компенсации при несимметричных коротких замыканиях, то оно, видимо, не будет приводить к неправильной работе органов направления мощности обратной последовательности.

При проектировании направленных защит учитывается также режим работы линии с отключенной одной фазой (в цикле ОАПВ), когда знаки мощностей обратной (и нулевой) последовательности на обоих концах линий одинаковы и таковы, что реле направления мощности обратной (и нулевой) последовательности имеют тенденцию действовать на отключение.

Направленная высокочастотная защита может быть допущена к применению на линиях с продольной емкостной компенсацией по варианту рис. 1,а только в том случае, если она отстроена (с помощью пускового органа или иным путем) от несимметричных режимов, не сопровождаемых короткими замыканиями в зоне.

Конденсаторная батарея расположена в середине участка (рис. 1,б и 1,в). При этом варианте правильная работа основных видов защиты — токовых отсечек и направленных защит (токовых, дистанционных, высокочастотных) — обеспечивается при степени компенсации, не превышающей  $k = 0,5$ .

При степени компенсации, большей  $k = 0,5$ , возможны отказы защит в действии по причинам, указанным выше.

В варианте рис. 1,б и 1,в остается также возможность неправильной работы быстродействующей поперечной защиты параллельных линий и направленной высокочастотной защиты (с реле мощности обратной или нулевой последовательности) в случае шунтирования конденсаторов разрядником, при отсутствии короткого замыкания в зоне защиты. Поэтому соображения, приведенные выше в отношении работы этих защит в варианте рис. 1,а, остаются в силе и для вариантов рис. 1,б и 1,в.

Конденсаторная батарея расположена между шинами переключающего пункта (рис. 1,г). Существенным преимуществом данного варианта, с точки зрения релейной защиты, является независимость в этом случае действия как направленной и дифференциально-фазной высокочастотных защит, так и поперечной защиты параллельных линий от работы разрядников, поскольку конденсаторы продольной компенсации в варианте рис. 1,г располагаются вне зон действия этих защит. При этом общеизвестный недостаток поперечных защит (например, балансной токовой), заключающийся в возможности неправильного действия при обрыве провода с односторонним заземлением, практически исключается в случае применения расщепленных проводов, так как обрыв одного из проводов с падением его на землю не вызывает неправильного действия поперечной защиты.

Поперечная защита параллельных линий с продольной емкостной компенсацией может быть выполнена на принципе сравнения токов фаз или токов обратной (или нулевой) последовательности. Балансная токовая защита со сравнением полных токов фаз имеет то преимущество, что она защищает от всех видов короткого замыкания и не требует применения специальных избирательных органов для выбора поврежденной фазы при однофазных коротких замыканиях.

Недостаток варианта рис. 1,г с точки зрения релейной защиты состоит в том, что значительно сокращаются первая зона дистанционной защиты и зона действия токовых отсечек по концам электропередачи; при степени компенсации, равной или большей  $k = 0,5$ , указанные зоны сокращаются до нуля. Происходит это вследствие того, что зону действия токовых отсечек и дистанционных реле во избежание выхода их на следующий, неповрежденный участок электропередачи приходится в варианте рис. 1,г рассчитывать в предположении, что установка продольной компенсации не зашунтирована.

Шунтирование конденсаторов разрядниками при коротком замыкании улучшило бы условия работы защиты. Однако ввиду быстродействия последней и вероятности того, что при малых токах короткого замыкания конденсаторы останутся не зашунтированными, положительный эффект от шунтирования конденсаторов разрядниками в данном случае учитываться не может.



Направленные дистанционные реле, установленные на переключательном пункте, могут действовать неправильно при коротких замыканиях на соседнем участке (вследствие емкостного характера сопротивления цепи от места установки реле до точки короткого замыкания).

Что касается органов направления мощности обратной (или нулевой) последовательности, то неправильное действие их в схеме рис. 1,2, возможно в тех случаях, когда сопротивление участка между местом установки защиты и нулевой точкой генераторов (и соответственно, нулевой точкой силовых трансформаторов) имеет емкостный характер. Такое явление, могущее иметь место в варианте рис. 1,2 при степени компенсации  $k > 0,5$ , приводит к отказу защиты в действии на поврежденном участке.

Рассмотрение вышеуказанных вариантов показывает, что более благоприятные условия для работы защиты линий с продольной емкостной компенсацией получаются при степени компенсации, не превышающей  $k = 0,5$ , и расположении конденсаторов в середине участков или между шинами переключательного пункта.

Сказанное иллюстрируется таблицей, в которой плюс обозначает применимость для данного варианта размещения конденсаторов того или иного вида защиты, а минус — неприменимость ее для данного варианта. Таблица составлена в предположении, что степень компенсации не превышает  $k = 0,5$ . В тех случаях, когда работа направленной высокочастотной защиты (с органом мощности обратной последовательности) и дифференциально-фазной высокочастотной защиты зависит от индивидуальных особенностей выполнения этих защит и конкретных параметров электропередачи, вопрос о применимости этих защит оставлен в таблице открытым.

Виды защиты	Варианты размещения конденсаторов при связанной схеме		
	рис. 1,а	рис. 1,б	рис. 1,г
Токковые отсечки . . . . .	—	+	—
Направленная дистанционная защита . . . . .	—	+	—
Поперечная балансная токовая защита . . . . .	—	—	+
Направленная высокочастотная защита (мощности обратной последовательности) . . . . .			+
Направленная дистанционно-высокочастотная защита . . . . .	—	+	—
Дифференциально-фазная высокочастотная защита . . . . .	—		+

**Методика ориентировочного выбора зон действия дистанционных реле при наличии продольной емкостной компенсации.** Поскольку дистанционные реле могут входить в качестве составных элементов высокочастотных защит (пусковые органы, избиратели фаз и т. д.), а также представлять резервную защиту в допол-

нение к основной — высокочастотной, то методика выбора зон действия дистанционных реле при наличии продольной емкостной компенсации представляет самостоятельный интерес.

Методика выбора первой, второй и третьей зон дистанционных реле рассмотрена ниже применительно к двухцепной электропередаче, работающей по связанной схеме (с несколькими переключательными пунктами). Пусть  $l_1$  и  $l_2$  обозначают длину двух смежных участков электропередачи. В середине каждого участка установлены конденсаторы продольной компенсации с одинаковой степенью компенсации.

Полагая, что длина каждого участка не превышает примерно 300 км, можно на основании формулы (7) записать:

$$k = \frac{x'_c}{z l_1} = \frac{x''_c}{z l_2},$$

где  $x'_c$  и  $x''_c$  — емкостные сопротивления конденсаторных батарей на участках  $l_1$  и  $l_2$ .

Первая зона дистанционного реле участка  $l_1$  выбирается, исходя из короткого замыкания в конце данного участка, в предположении, что конденсаторная батарея на этом участке не зашунтирована разрядником. В этом случае результирующее реактивное сопротивление участка  $l_1$  составляет

$$z a l_1 - x'_c = z a l_1 (1 - k).$$

Вводя в расчет коэффициент надежности  $m_1 < 1$ , получаем сопротивление первой зоны участка  $l_1$ :

$$z_1' = m_1 z a l_1 (1 - k). \quad (15)$$

Вторая зона дистанционного реле участка  $l_1$  выбирается, исходя из короткого замыкания в конце первой зоны участка  $l_2$ . При этом предполагается, что конденсаторная батарея первого участка не зашунтирована. В этом случае сопротивление на зажимах дистанционного реле в начале участка  $l_1$  составляет

$$z a l_1 (1 - k) + n_1 m_1 z a l_2 (1 - k) = z a (l_1 + n_1 m_1 l_2) (1 - k),$$

где  $n_1$  — коэффициент, учитывающий наличие параллельной цепи.

Вводя в расчет коэффициент надежности  $m_2 < 1$ , получаем сопротивление второй зоны участка  $l_1$ :

$$z_{11}' = m_2 z a (l_1 + n_1 m_1 l_2) (1 - k). \quad (16)$$

Предельная степень компенсации  $k$ , при которой вторая зона не распространяется на смежный участок электропередачи (при зашунтированной конденсаторной батарее), находится из условия:

$$m_2 (l_1 + n_1 m_1 l_2) (1 - k) = l_1,$$

откуда

$$k = 1 - \frac{l_1}{m_2 (l_2 + n_1 m_1 l_2)}.$$

При  $l_1 = l_2$ ,  $m_1 = m_2 = 0,8$ ,  $n_1 = 2$  получаем  $k = 0,5$ .

Третья зона дистанционного реле участка  $l_1$  рассчитывается, исходя из короткого замыкания в конце второй зоны участка  $l_2$ , по формуле:

$$z'_{II} = m_3 [za l_1 (1 - k) + n_2 z''_{II}], \quad (17)$$

где  $m_3 < 1$  — коэффициент надежности;  $n_2$  — коэффициент, учитывающий параллельную цепь;  $z''_{II}$  — сопротивление второй зоны дистанционного реле участка  $l_2$ .

**Работа защиты при пофазном шунтировании конденсаторов продольной компенсации в поврежденных фазах.** Как уже указывалось выше, при коротких замыканиях на линиях электропередачи, имеющих продольную компенсацию, в случае, когда падение напряжения в конденсаторах продольной компенсации достигает определенной величины, конденсаторы автоматически шунтируются защитными разрядниками.

В связи с пофазной работой разрядников при двухфазных коротких замыканиях конденсаторы продольной компенсации могут шунтироваться либо в обеих поврежденных фазах, либо в одной из них. При однофазном замыкании на землю приходится ожидать шунтирования только в одной поврежденной фазе.

Комплексные схемы замещения для указанных случаев могут быть получены, исходя из общих положений метода симметричных составляющих, в применении к несимметричным цепям [Л.4].

На рис. 3,а схематично изображен случай короткого замыкания на компенсированной линии; ради общности рассмотрения задачи предположено, что место короткого замыкания не совпадает с местом установки конденсаторов продольной компенсации.

В целях упрощения рассуждений активное сопротивление, включаемое последовательно с искровым промежутком защитного разрядника и служащее для ограничения разрядного тока и придания процессу апериодического характера, здесь не учитывается. Возникновение апериодических токов и гармонических составляющих с частотами, отличными от основной, здесь также не учитывается.

Рассмотрим случай двухфазного замыкания (фаз В и С). В случае шунтирования конденсаторов продольной компенсации в обеих поврежденных фазах комплексная схема замещения соответствует случаю введения в неповрежденную фазу А емкостного сопротивления  $-jx_c$  при отсутствии конденсаторов продольной компенсации в двух других фазах (в месте шунтирования). Падение напряжения в указанном выше сопротивлении от тока фазы А, равное  $-jx_c I_A$ , может быть разложено на три симметричные составляющие, равные  $-j \frac{x_c}{3} I_A$ . Это в свою очередь может быть иммитировано введением в комплексную схему замещения емкостного сопротивления  $-j \frac{x_c}{3}$ , обтекаемого суммой токов всех трех последовательностей. В соответствии с этим на рис. 3,б представлена интересующая нас часть

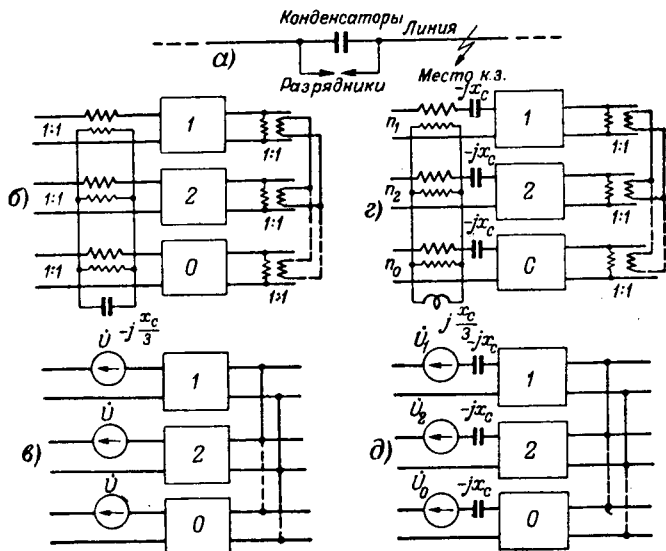


Рис. 3. Комплексные схемы замещения для случаев пофазного шунтирования конденсаторов продольной компенсации при двухфазных коротких замыканиях.

а — расчетная схема; б, в — конденсаторы шунтированы в обеих поврежденных фазах; г, д — конденсаторы шунтированы в одной из поврежденных фаз.

комплексной схемы замещения для случая двухфазного короткого замыкания, сопровождаемого шунтированием конденсаторов в поврежденных фазах В и С. Здесь четырехполусники 1, 2 и 0 замещают участок электропередачи от места шунтирования конденсаторов до места короткого замыкания в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей. Соединение, указанное пунктиром, относится к случаю двухфазного замыкания на землю.

Все промежуточные трансформаторы в схеме рис. 3,б имеют коэффициент трансформации 1:1 и не изменяют фазы. Заменив в схеме рис. 3,б падения напряжений в сопротивлении  $-j \frac{x_c}{3}$  экви-

валентными источниками  $\dot{U} = -j \frac{x_c}{3} \dot{I}_A$ , действующими в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей в направлении, противоположном току  $\dot{I}_A$ , получаем схему рис. 3,в.

В случае шунтирования конденсаторов продольной компенсации только в одной из поврежденных фаз, например в фазе В, комплексная схема замещения может быть получена в предположении, что последовательно с конденсаторной батареей фазы В введено индуктивное сопротивление  $jx_c$  (т. е. равное по величине сопротивлению конденсаторной батареи, но обратное по знаку). Падение напряжения в этом сопротивлении от тока фазы В, равное  $jx_c I_B$ , может быть разложено на три симметричные составляющие, равные  $j \frac{x_c}{3} I_B$ . Это в свою очередь может быть представлено путем введения в комплексную схему замещения (рис. 3,г) индуктивного сопротивления  $j \frac{x_c}{3}$ , обтекаемого суммой токов  $a^2 \dot{I}_1$ ,  $a \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_0$ .

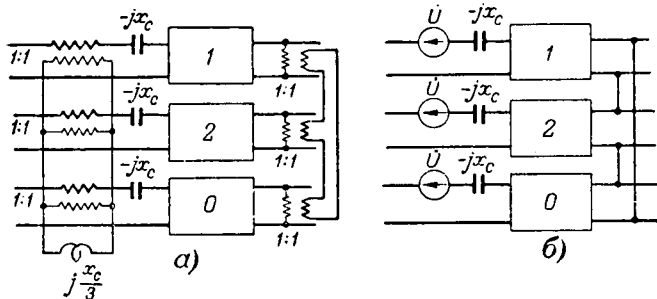


Рис. 4. Комплексные схемы замещения для случаев пофазного шунтирования конденсаторов продольной компенсации при однофазных замыканиях на землю (конденсаторы шунтированы в поврежденной фазе).

Поскольку комплексные схемы замещения изображаются применительно к фазе  $A$ , то промежуточные трансформаторы, к которым приключается сопротивление  $j \frac{x_c}{3}$ , должны иметь коэффициенты трансформации

$$n_1 = 1:a^2, \quad n_2 = 1:a, \quad n_0 = 1:1$$

(здесь  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $a^2 = e^{j240^\circ}$ ).

Это равносильно тому, что в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 3, д) в направлении, противоположном току  $I_B$ , действуют источники э. д. с.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= ja \frac{x_c}{3} I_B, \quad \dot{U}_2 = ja^2 \frac{x_c}{3} I_B, \\ \dot{U}_0 &= j \frac{x_c}{3} I_B. \end{aligned}$$

Аналогичным образом в случае шунтирования конденсаторов продольной компенсации только в фазе  $C$ , коэффициенты трансформации в схеме рис. 3, г должны иметь значения  $n_1 = 1:a$ ,  $n_2 = 1:a^2$  и  $n_0 = 1:1$ . Соответственно, в схеме рис. 3, д будут действовать источники э. д. с.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= ja^2 \frac{x_c}{3} I_B, \quad \dot{U}_2 = ja \frac{x_c}{3} I_B, \\ \dot{U}_0 &= j \frac{x_c}{3} I_B. \end{aligned}$$

Переходя к рассмотрению случая однофазного замыкания на землю (фазы  $A$ ), можно, пользуясь рассуждениями, аналогичными предыдущим, получить комплексную схему замещения применительно к случаю шунтирования конденсаторной батареи в поврежденной фазе (рис. 4, а и б). При этом коэффициенты трансформации всех промежуточных трансформаторов в схеме рис. 4, а равны 1:1 и, соответственно, продольные э. д. с. в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 4, б) равны между собой.

Исследование работы релейной защиты при пофазном шунтировании конденсаторов продольной компенсации может быть произведено на основе комплексных схем замещения рис. 3, б, 3, г

и 4, а с применением метода расчета, предложенного В. А. Сатаровым [Л. 5], использующего теорию активного четырехполюсника.

Анализируя работу реле, включенных на разность токов фаз  $B$  и  $C$ , наиболее удобно пользоваться комплексными схемами замещения рис. 3, и 4, б в предположении равенства схем прямой и обратной последовательностей. В этом случае продольные э. д. с.  $\dot{U}$  не оказывают влияния на разность токов прямой и обратной последовательностей и, следовательно, не влияют на разность токов фаз  $B$  и  $C$ , поскольку

$$I_B - I_C = (a^2 - a)(I_1 - I_2) = -j\sqrt{3}(I_1 - I_2).$$

Поэтому в случае шунтирования конденсаторов продольной компенсации в обеих поврежденных фазах при двухфазном коротком замыкании дистанционные реле, включенные на линейное напряжение и разность токов поврежденных фаз, действуют так же, как и при отсутствии конденсаторов продольной компенсации.

В случае шунтирования конденсаторной батареи только в фазе  $B$  (при двухфазном коротком  $BC$ ) продольные э. д. с., возникающие вследствие шунтирования, не влияют на работу реле фаз  $AB$ . Аналогично в случае шунтирования конденсаторной батареи в фазе  $C$  (при том же виде короткого замыкания) продольные э. д. с. не оказывают влияния на работу реле фаз  $CA$ .

То же самое можно сказать и в отношении реле фаз  $BC$  в случае однофазного замыкания на землю (фазы  $A$ ), сопровождаемого шунтированием конденсаторной батареи в поврежденной фазе. Это видно из схемы рис. 4, б, в которой при равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей продольные э. д. с. не изменяют разности токов  $I_1 - I_2$ .

Вопросам анализа работы дистанционных реле при различных режимах электропередачи посвящена и прежняя статья автора [Л. 6], в которой рассмотрена также методика исследования работы дистанционных реле применительно к линиям большой протяженности.

Данные, приведенные в настоящей работе, являются ориентировочными, так как они не учитывают переходных процессов в первичных и вторичных цепях и нелинейности характеристик отдельных элементов (реакторов поперечной компенсации, трансформаторов тока и т. д.). Аналитический метод исследования влияния этих факторов на работу релейной защиты компенсированных линий весьма затруднителен. Поэтому уточнение этого вопроса производится на практике применительно к каждому конкретному случаю отдельно с помощью методов физического моделирования и последующей экспериментальной проверки.

#### Литература

1. С. С. Рокотян, Е. М. Зборовский и В. Т. Ренне. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи (обзор). Электричество, № 3, 1951.

2. С. С. Рокотян. Новая установка продольной емкостной компенсации линии передачи. *Электричество*, № 7, 1952.

3. А. В. Миролюбов, С. С. Рокотян. Линии электропередачи 400 кВ Куйбышев—Москва. *Электричество*, № 7, 1952.

4. Н. И. Соколов. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях. *Электричество*, № 8, 1949.

5. В. А. Сатаров. Расчет неполнофазных режимов электрических систем на основе теории активного четырехполосника. Третья научно-техническая конференция ВЗЭИ 1951—1952 гг. Издание Всесоюзного заочного энергетического института, 1952.

6. Г. И. Атабеков. Графоаналитический метод исследования работы дистанционных реле, *Электричество*, № 2, 1952.

7. G. Jancke, K. F. Akerstrom. The Series Capacitor in Sweden, *El. Eng.* № 3, 1952.

8. E. L. Harder, J. E. Barkle, R. W. Ferguson. Series Capacitors During Faults and Reclosing. *AIEE Trans.*, v. 70, p. II, стр. 1627—1642, 1951.

9. A. A. Johnson, J. E. Barkle, D. J. Proveysil. Fundamental Effects of Series Capacitors in High Voltage Transmission Lines. *AIEE Tr.* v. 70, p. I, стр. 526—536, 1951.

[26. 3. 1953]



## О поэтапном построении городских распределительных электросетей

Кандидат техн. наук П. Ф. ГОГИЧАИШВИЛИ

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

Неравномерность роста потребления электроэнергии на территории города благоприятствует осуществлению поэтапного построения городских распределительных электросетей, поскольку создается возможность самому эксплуатационному персоналу вводить дополнительные трансформаторные мощности на территории города в разное время за длительный срок амортизации сети.

В работе, выполненной в Академии коммунального хозяйства РСФСР, вместо обычного построения городской электрической сети по перспективным нагрузкам на так называемый «расчетный срок» [Л. 1] было намечено как раз такое решение — поэтапное развитие, в основу которого положено сооружение сетей и сетевых подстанций на начальные (существующие) нагрузки с увеличением пропускной способности сети по этапам-частям расчетного периода. При этом сеть низкого напряжения сооружается однородной или частично однородной по сечению, благодаря чему возможно беспрепятственное добавление сетевых трансформаторных подстанций (ТП) по мере роста нагрузок даже за пределами расчетного срока вплоть до физической амортизации всей сети. Поэтапному вводу ТП могут способствовать магистральные системы сетей низкого напряжения, предложенные И. М. Сиротой [Л. 2] и И. С. Бесмертным [Л. 3].

Число подстанций при поэтапном построении выбирается с расчетом покрытия в сети низкого напряжения нагрузок первого этапа. В последующих этапах смонтированная сеть низкого напряжения полностью сохраняется, а число подстанций постепенно в соответствии с ростом нагрузок увеличивается при соблюдении условий экономической плотности тока или допускаемой потери напряжения.

Рассмотрены преимущества и недостатки поэтапного сооружения городских распределительных электросетей. Статья печатается в порядке обсуждения.

Потребное число этапов в течение амортизационного срока службы сети определяется конкретными условиями: начальной нагрузкой, темпом ее роста, экономической мощностью сетевой подстанции и т. п. Однако слишком большое число этапов за амортизационный срок не является желательным. Пределом служит наименьшая мощность сетевой подстанции; эта мощность определяется нижней границей экономической зоны.

На рис. 1 приведены пропускные способности сети для обычного и поэтапного (для пяти этапов) построения. Заштрихованные площадки

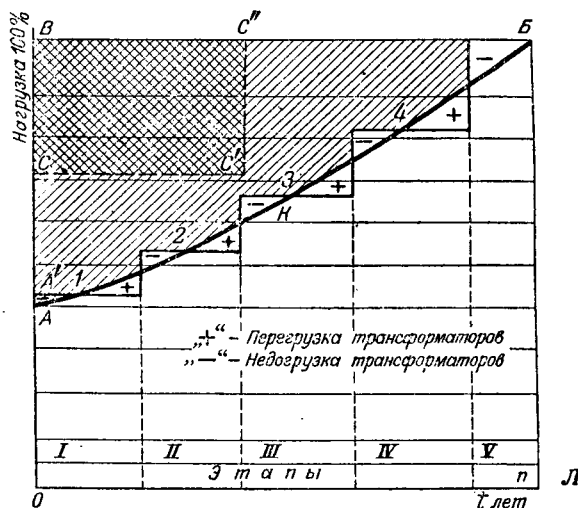


Рис. 1. Пропускная способность распределительной сети для обычного и поэтапного построения.

А—В—кривая роста нагрузки; ОА, АВ—начальная и конечная нагрузка; ВВ—пропускная способность сети при обычном построении; СС'В—то же, с выделением очереди; АВ—пропускная способность сети при поэтапном построении (ступенчатая линия); ОАКВЛ—электроэнергия, переданная сетью за время  $t$  лет.

означают излишки пропускной способности сети для обычного построения при выделении и без выделения первой очереди в течение «расчетного срока». Знаки «—» и «+» в контурах соответствуют недогрузкам и допускаемым перегрузкам трансформаторов. Вводимая подстанционная мощность по этапам возрастает по ломаной линии.

Из рис. 1 можно видеть, что при равных условиях число сетевых подстанций и связанные с ними расходы значительно сокращаются для поэтапного ввода мощности и особенно в первых этапах (см. заштриховку).

В противоположность сетям низкого напряжения сети высокого напряжения могут сооружаться как обычно и на перспективные нагрузки. Это не приведет к значительным перерасходам, так как протяженность (и стоимость) сетей высокого напряжения слабо зависит от числа сетевых подстанций. Сооружение сети высокого напряжения на перспективные нагрузки облегчает ввод ТП в последующих этапах.

Однородные, также и частично однородные, сети низкого напряжения, могущие работать по замкнутым схемам со всеми их преимуществами, значительно упрощают проектирование, монтаж и эксплуатацию распределительных сетей, а также способствуют их автоматизации и возможности отключения свободной трансформаторной мощности.

На рис. 2—4 приведены результаты технико-экономического анализа сравнения обычного и поэтапного сооружения сети в конкретном районе. Данные района: площадь 1,2 км<sup>2</sup>; число кварталов 56, экономическая мощность столбовых подстанций 50 кВА; потери в сети низкого напряжения  $\Delta V_{\max} = 4\%$ . На рис. 2 показано для одного из участков обычное построение сети 380/220 В (Гипрокоммунэнерго). Проектная мощность «расчетного срока» района  $P = 682$  кВт при средней плотности нагрузки  $D = 36$  кВт/км. Провода сети низкого напряжения Ж—4—5—35, А—16—

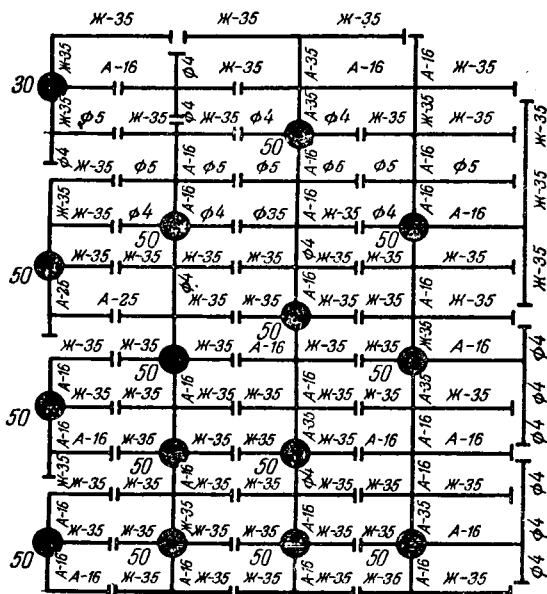
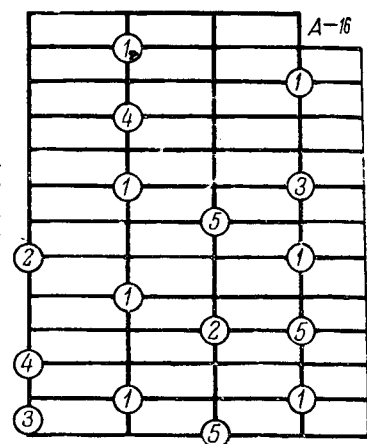


Рис. 2. Схема обычного сооружения сети 380/220 В.

Рис. 3. Поэтапное сооружение сети 380/220 В (цифры в кружках обозначают этапы ввода ТП).



25—35. Расход стали в сети низкого напряжения 13,5 т, алюминия 0,88 т (стоимость проводникового металла 49,8 тыс. руб.). Число сетевых подстанций — 15.

На рис. 3 приведена сеть 380/220 В, выполненная проводами одного сечения 4 (А—16) для поэтапного ввода ТП. Вес потребного алюминиевого провода равен 3,3 т. В течение амортизационного периода эта сеть сохраняется, изменяется только ее конфигурация по мере добавления ТП при росте нагрузок (и сохранении  $\Delta V_{\max} = 4\%$ ).

В табл. 1 приведены число потребных ТП и капитальные затраты обычного и поэтапного построения (соответственно рис. 2 и 3, при ежегодном росте нагрузок в 10%).

Таблица 1

Этапы	Нагрузка, кВт	Построение			
		обычное		поэтапное	
		Число ТП, шт.	Капитальные затраты, тыс. руб.	Число ТП, шт.	Капитальные затраты, тыс. руб.
I	290	10/15*	118/177	7	80,5
II	340	10/15	118/177	9	102,5
III	440	15	177	11	129,2
IV	550	15	177	13	154,4
V	682	15	170	16	195,5

\*Примечание. Числитель учитывает возможную очередность.

Из табл. 1 видно, что при этапном вводе число ТП и затраты на них значительно сокращаются. Протяженность воздушной сети 6 км (А—3×35) и ее конфигурация для обычного и поэтапного способа сооружения сети получаются одинаковыми,  $L = 4,95$  км.

На рис. 4 изображены для сопоставления графики пропускных способностей и стоимостей передачи кВтч за 10-летний срок для обычного и поэтапного построения.

Здесь же приведена стоимость передачи 1 кВтч (кривая Г) для однофазной трехпроводной сети с однофазными столбовыми ТП (для сети 2××220 В сечение проводов А—2×25+1×16 при одинаковой конфигурации с трехфазной сетью).

Графики показывают, что поэтапное построение обеспечивает, особенно в начале эксплуатации, значительное снижение стоимости передачи 1 квтч главным образом за счет уменьшения числа сетевых подстанций. Только в последнем этапе имеет место некоторое удорожание передачи энергии. Однако за весь период с учетом возвратных сумм экономия для этапного построения в среднем составит 20—25 %.

При плотности нагрузки  $D = 60 \text{ квт/км}$  сечение алюминиевых проводов сети низкого напряжения будет больше  $16 \text{ мм}^2$ ; поэтому такую сеть желательно строить частично однородной, чтобы выделить менее нагруженные ответвления.

Эффективность поэтапного сооружения сети зависит в основном от типа сетевой подстанции, плотности и темпа роста нагрузок.

Закрытые сетевые подстанции в 3—4 раза дороже открытых (мачтовых) подстанций; поэтому для первых этапное построение более эффективно, поскольку оно сводится, в основном, к сокращению числа сетевых подстанций в течение длительного срока. По этой же причине эффективность поэтапного построения растет с увеличением плотности и темпа роста нагрузок.

Для обобщения результатов исследования поэтапного построения удобно применить коэффициент ввода подстанции, представляющий собой отношение необходимого числа ТП при этапном и обычном построении для одного и того же города (района).

Эффективность поэтапного сооружения распределительных сетей, например для города с территорией (селитебной) в  $12 \text{ км}^2$  при потребляемой мощности  $8 \text{ мвт}$ , мощности закрытых подстанций по  $100 \text{ ква}$  и стоимости их по 45 000 тыс. руб. видна из табл. 2.

Таблица 2

Этапы	Коэффициенты ввода	Число закрытых ТП (100 ква)		Экономия при поэтапном построении	
		Построение		ТП	стоимость, млн. руб.
		обычное	поэтапное		
I	0,5...0,7	80	40...56	40...24	1,8...1,08
II	0,7...0,8	80	56...64	24...16	0,08...0,72
III	0,8...0,9	80	64...72	16...8	0,72...0,36
IV	0,9...1	80	72...80	8...0	0,36...0
V	1...1,05	80	80...84	0...(-4)	0...(-0,18)

Поэтапное построение обеспечивает более позднюю установку (даже для одного города) значительного числа ТП и связанное с ним более целесообразное расходование денежных и материальных средств.

При этом трудности в определении перспективных данных исключаются, а расчетные нагрузки, лежащие в основе проекта сети города при поэтапном построении, значительно приближаются к действительности.

Однородность сети низкого напряжения, по крайней мере по основным магистралям, позволяет осуществить работу сети по частично замкнутым схемам со всеми ее преимуществами.

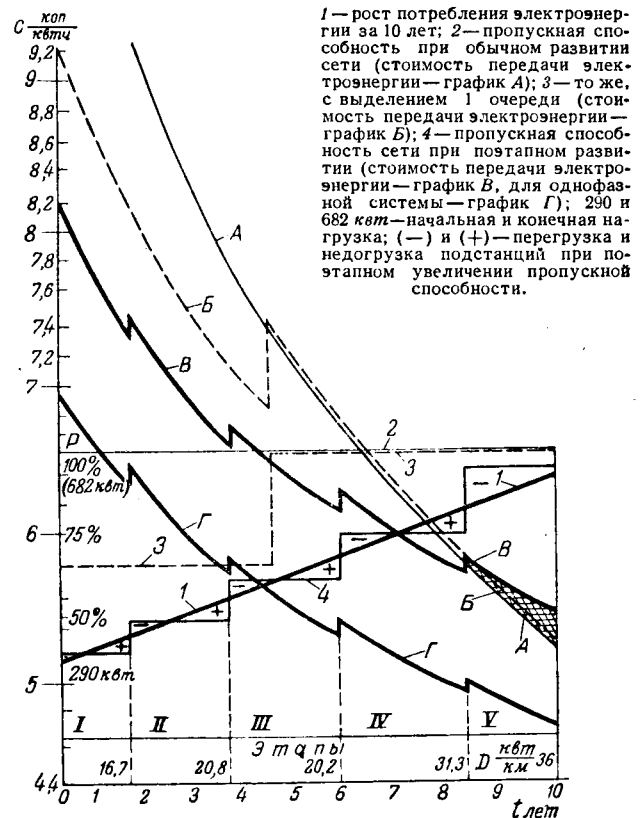


Рис. 4. Пропускная способность сети и стоимость передачи электроэнергии при обычном и поэтапном сооружении.

Простое повышение пропускной способности сети уже за пределами нагрузок «расчетного срока» при поэтапном построении сохраняется; при обычном же построении нормальное электроснабжение города требует полной реконструкции сети или связано с ее работой в условиях недопустимо больших потерь напряжения и мощности.

Недостатком поэтапного построения является некоторое возрастание числа сетевых подстанций и соответственно стоимости распределения электроэнергии по достижении нагрузок «расчетного срока» (см. заштрихованную площадку на рис. 4).

Основным преимуществом поэтапного развития пропускной способности городских распределительных электросетей является значительное сокращение числа ТП и соответственно этому сокращение капиталовложений на первых этапах, что снижает на 20—25 % стоимость распределения энергии.

Поэтапное построение не требует особых мероприятий или нового типа оборудования.

#### Литература

1. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.
2. И. М. Сирота. Выбор основных параметров сетей низкого напряжения. Электричество, № 15, 1937.
3. И. С. Бессмертный. Магистральные системы городских низковольтных электросетей. Электричество, № 7, 1938.
4. П. Ф. Гогичаишвили. Распределение электроэнергии в городских районах малоэтажной застройки. Диссертация. Академия коммунального хозяйства им. Памфилова, 1951.

# Запись частоты для определения частотных динамических характеристик энергосистем

Кандидат техн. наук А. Г. МОСКАЛЕВ

ЦНИЭЛ МЭСЭП

Частотные динамические характеристики энергосистем имеют огромное значение для правильного конструирования, настройки и эксплуатации регуляторов частоты, устройств синхронизации генераторов, автоматической аварийной разгрузки по частоте и других видов автоматики. Известные приборы и методы записи частоты не обеспечивают получения правильной картины изменения частоты в энергосистеме во времени. Большинство из них позволяют только судить о граничных значениях частоты, но не позволяют с достаточной степенью точности установить изменение частоты в переходном процессе. Это происходит в силу несовершенства или метода или измерительного прибора.

В связи с широким внедрением частотных автоматических устройств возникла необходимость в более точной и объективной записи частоты в переходных процессах. В 1948 г. был разработан прибор, названный устройством регистрации частоты (УРЧ). Опытная партия устройств была изготовлена и передана в ряд энергосистем.

Ниже приводится краткое описание нового прибора для записи частотных характеристик энергосистем.

Напряжение сети, частотную характеристику которой надо записать, подводят к прибору. На выходе прибора появляется выпрямленное напряжение, знак которого зависит от знака отклонения частоты. Величина напряжения на выходе прибора пропорциональна отклонению частоты.

Рассмотрен принцип действия устройства регистрации частоты посредством записи с помощью осциллографа.

Напряжение на выходе с помощью осциллографа записывается на бумаге. Диапазон прибора

$(0,9...1,1)f_{ном}$ . Меняя чувствительность вибратора осциллографа, можно записывать отклонения частоты с точностью до 0,01 гц.

В основу устройства регистрации частоты положена дифференциальная фазочувствительная схема (рис. 1), состоящая из входного трансформатора  $T_1$ , двух разделительных трансформаторов  $T_2$  и  $T_3$ , твердых выпрямителей  $B_1$  и  $B_2$ , частотного полосного фильтра ( $C_1, C_2, L_2$ ) и нагрузочного сопротивления  $r$ . Для сглаживания выпрямленного напряжения на выходе устройства поставлен емкостно-омический фильтр ( $r_1, r_2, r_3, C_3, C_4, C_5$  и  $C_6$ ). Действие устройства основано на использовании свойства частотного фильтра менять величину и фазу напряжения на выходе по отношению к напряжению на входе при изменении частоты.

В устройстве применено Г-образное полувзвешенное упрощенного трехэлементного частотного полосного фильтра с полосой пропускания, определяемой частотами среза  $f_1, f_2$ .

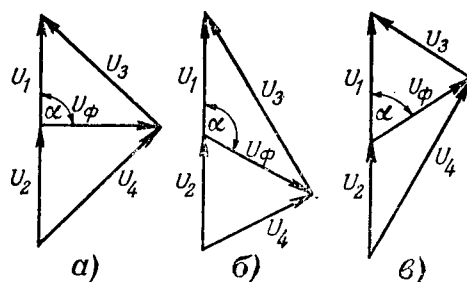


Рис. 2. Получаемые векторные диаграммы.  
а — при номинальной частоте; б — при частоте ниже номинальной; в — при частоте выше номинальной.

Частотный фильтр настраивается таким образом, чтобы при номинальной частоте сдвиг фаз между напряжением входа и выхода был равен  $90^\circ$ . Так как ориентирующие напряжения  $U_1$  и  $U_2$  равны между собой (рис. 2), то при номинальной частоте напряжения на выходе фазочувствительной схемы  $U_3$  и  $U_4$  равны по величине, а следовательно, напряжение на выходе устройства будет равно нулю.

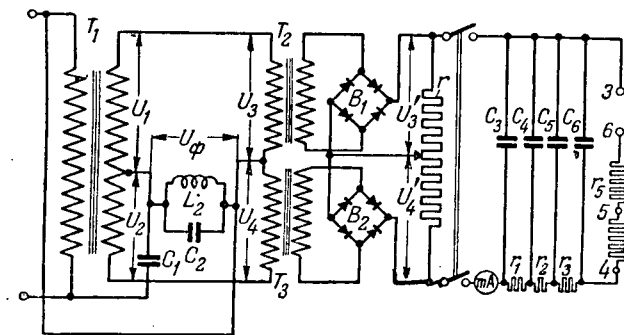


Рис. 1. Принципиальная схема устройства.

При частоте сети ниже номинальной угол сдвига фаз  $\alpha$  (рис. 2) будет увеличиваться, напряжение  $U_4$  — уменьшаться, а  $U_3$  — увеличиваться. Напряжение на выходе устройства будет отлично от нуля:

$$U_{\text{вых}} = U'_3 - U'_4 = \Delta U.$$

При частоте сети выше номинальной, напряжение на выходе будет также отлично от нуля, но противоположно по знаку:

$$U_{\text{вых}} = U'_3 - U'_4 = -\Delta U.$$

За полосой пропускания фильтра  $f_1 < f < f_2$  угол сдвига фаз  $\alpha$  остается неизменным и равным 0 или  $\pi$ , а напряжение на выходе фильтра будет резко понижаться. В этом случае напряжение на выходе устройства будет стремиться к нулю. Поэтому при отклонении частоты за пределы полосы пропускания никакой опасности для вибратора осциллографа не возникнет. Ширина полосы фильтра может быть принята любой в зависимости от диапазона измерений.

Параметры элементов частотного полосного фильтра зависят от нагрузочного сопротивления  $r$  и рабочей зоны устройства  $f_1 < f < f_2$ . Они определяются по формулам:

$$C_1 = \frac{f_1 + f_2}{8\pi f_1 f_2 r}, \quad C_2 = \frac{f_1}{4\pi f_2 (f_2 - f_1) r},$$

$$L_2 = \frac{(f_2 - f_1) r}{\pi f_1 f_2}.$$

Если воспользоваться известными соотношениями для частотного полосного фильтра, то выражение для характеристики устройства может быть представлено так<sup>1</sup>:

$$U_{\text{вых}} = 2U \left[ \sqrt{\frac{(2f^2 f_1^2 - f^2 f_n^2 - f_1^2 f_n^2)}{2f^2 f_n^2 (f_1^2 - f_n^2)}} - \sqrt{\frac{f_n^4 (f_1^2 - f_n^2)}{2f^2 f_1^2 (f_1^2 - f_n^2)}} \right].$$

Основная характеристика устройства, дающая зависимость напряжения на выходе от частоты, приведена на рис. 3. Значительные расхождения реальной характеристики с характеристикой при идеальном фильтре объясняются наличием потерь в дросселе и тем, что в реальном фильтре при изменении частоты нагрузка остается неизменной.

<sup>1</sup> Это выражение справедливо для идеального фильтра.

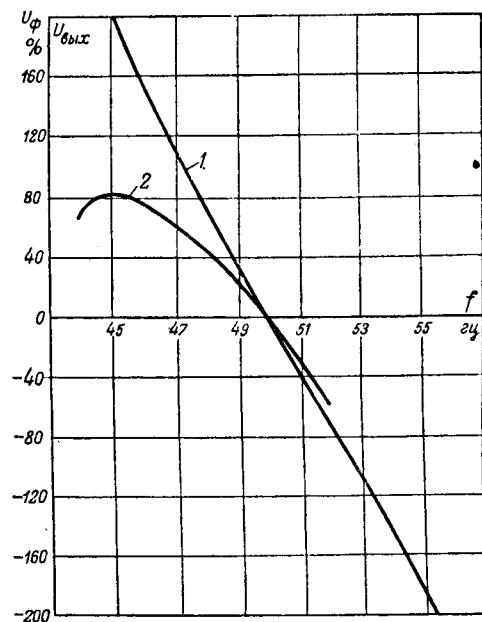


Рис. 3. Основные характеристики приборов. 1 — расчетная, при идеальном фильтре; 2 — реальная.

Для устранения влияния колебаний напряжения на работу устройства последнее может включаться через стабилизатор напряжения, например типа ЭПА-15. В диапазоне напряжений 50...130 в погрешность, определенная по ГОСТ, составляет 0,5...1,0%. Наибольшая погрешность относится к одновременному глубокому снижению частоты и напряжения. При колебаниях температуры в пределах от  $+10$  до  $+40^\circ\text{C}$  погрешность устройства не превышает 0,5%. Согласно опытам время нарастания напряжения на выходе при включении под напряжение составляет 0,06...0,1 сек. Некоторым недостатком устройства является нелинейность характеристики.

Пятилетний опыт эксплуатации приборов показал их преимущества перед другими приборами, предназначенными для той же цели.

#### Литература

1. Л. Д. Стернинсон. Характеристики энергосистемы как объекта автоматического регулирования частоты. Электрические станции, № 1, 1949.
2. И. М. Маркович, С. А. Савалов. Экспериментальное определение параметров электрической системы, влияющих на процесс автоматического регулирования частоты и мощности. Электричество, № 8, 1948.
3. А. Г. Москалев. Автоматическое регулирование частоты в энергосистемах. Госэнергоиздат, 1952.

[11. 7. 1952]





# Применение электроники в промышленности<sup>1</sup>

Доктор техн. наук, проф. И. Л. КАГАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Электроника в системах управления сварочными машинами и электровибраторами. Реле (регулятор) чередования сварочных операций и их длительности. В системах управления режимами контактной сварки функции электронных и ионных устройств сводятся к дозировке мощности, подводимой к месту сварки, к установлению длительности подвода мощности, а также к нормированию выдержки времени ряда других вспомогательных операций.

В простейших типах сварочных машин, где сварка производится переменным током неизменной величины, а подводимая к месту сварки мощность нормируется длительностью пропуска тока, измеряемой числом периодов промышленной частоты, первичная обмотка сварочного трансформатора на время токопрохождения включается обычно с помощью электромагнитного контактора.

В этом случае функции управления режимом сварки сводятся к нормированию времени замкнутого состояния контактора, а также длительности ряда других вспомогательных операций, к которым, прежде всего, относится нормирование времени, необходимого для сжатия деталей до пропуска сварочного тока (время сжатия), и времени выдержки свариваемых деталей в сжатом состоянии после пропуска сварочного тока для доводки процесса упрочнения металла (время проковки).

В простейших схемах применяется серийно выпускаемое электронное реле времени (регулятор операций) типа РВЭ-7-1А. Реле состоит из ряда однотипных звеньев. Схема одного из них приведена на рис. 1.

Функции звена сводятся к тому, чтобы обеспечить определенную выдержку времени между моментом замыкания с помощью кнопки  $K$  (точнее, с помощью контакта вспомогательного реле) катодного участка цепи лампы  $L$  и моментом срабатывания реле  $P$ , входящем в анодную цепь лампы (шунтирующая реле емкость  $C$  сглаживает ток).

Требуемая выдержка времени достигается путем разряда конденсатора  $C_1$  на сопротивление  $R_1$ ; при отрицательном напряжении на кон-

денсаторе, большем по абсолютной величине, чем напряжение отсечки, лампа заперта. До момента замыкания кнопки  $K$  конденсатор  $C_1$  заряжен. Зарядный контур образует источник переменного напряжения (верхняя часть вторичной обмотки трансформатора  $Tr$  и верхняя часть потенциометра  $R_2$ ), промежуток сетка—катод лампы, емкость  $C_1$  и сопротивление  $R_3$ . Сопротивление  $R_1$ , шунтирующее емкость  $C_1$ , мало влияет на время заряда, так как оно достаточно велико.

Описываются электронные и ионные устройства, нашедшие применение в различных областях промышленной электроники: в области силового электропривода и в системах следящего привода (описано в журнале «Электричество», № 7, с. г.), в системах управления сварочными режимами, а также в системах микроконтроля и сортировки размеров изделий. Описанные устройства иллюстрируют те задачи, которые решаются средствами электроники, методы решения этих задач и структуру типовых электронных узлов.

денсаторе, большем по абсолютной величине, чем напряжение отсечки, лампа заперта. До момента замыкания кнопки  $K$  конденсатор  $C_1$  заряжен. Зарядный контур образует источник переменного напряжения (верхняя часть вторичной обмотки трансформатора  $Tr$  и верхняя часть потенциометра  $R_2$ ), промежуток сетка—катод лампы, емкость  $C_1$  и сопротивление  $R_3$ . Сопротивление  $R_1$ , шунтирующее емкость  $C_1$ , мало влияет на время заряда, так как оно достаточно велико.

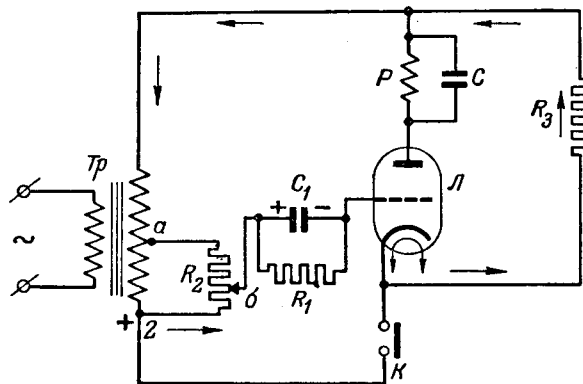


Рис. 1. Схема типового узла электронного реле времени, регулирующего последовательность сварочных операций.  $L$ —лампа;  $Tr$ —трансформатор;  $R_2$ —потенциометр;  $C_1$ —емкость;  $R_1$ —разрядное сопротивление;  $K$ —контакт реле другого звена схемы;  $P$ —реле;  $C$ —шунтирующая емкость для сглаживания тока.

Постоянная времени зарядной цепи настолько невелика, что для заряда конденсатора до максимального значения напряжения достаточно несколько периодов переменного тока.

Заряд прекращается после замыкания кнопки  $K$ , так как конденсатор и промежуток сетка—катод шунтируются нижним участком цепи.

Разряд конденсатора  $C_1$  на сопротивление  $R_1$  длится до тех пор, пока напряжение на  $C_1$  не достигает такого минимума, при котором разность потенциалов между сеткой и катодом не становится равной напряжению отсечки. С наступлением такого момента лампа начинает пропускать ток, возрастающий до тока срабатывания реле.

В реле последовательности операций типа РВЭ-7-1А входят (рис. 2): четыре одинаковые секции, аналогичные описанным на рис. 1, а также трансформатор  $Tr$  питания схемы реле пере-

<sup>1</sup> Начало см. Электричество, № 7, 1953.

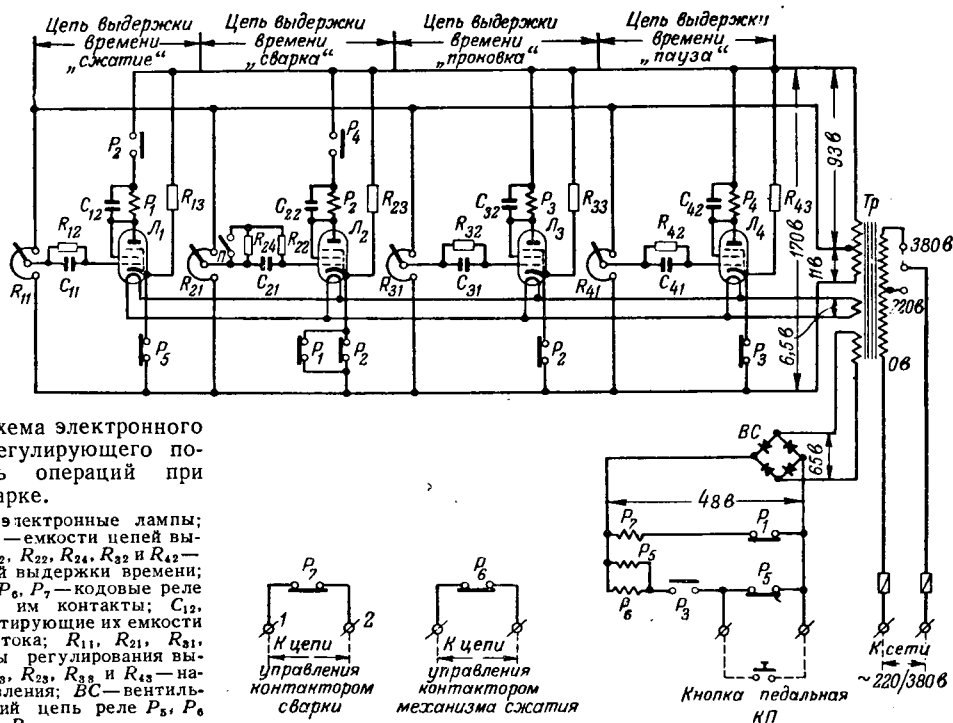


Рис. 2. Полная схема электронного реле времени, регулирующего последовательность операций при сварке.

$L_1, L_2, L_3$  и  $L_4$  — электронные лампы;  $C_{11}, C_{21}, C_{31}$  и  $C_{41}$  — емкости цепей выдержки времени;  $R_{12}, R_{22}, R_{32}$  и  $R_{42}$  — сопротивление цепей выдержки времени;  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$  — кодовые реле и соответствующие им контакты;  $C_{12}, C_{22}, C_{32}$  и  $C_{42}$  — шунтирующие их емкости для сглаживания тока;  $R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}$  — потенциометры регулирования выдержки времени;  $R_{13}, R_{23}, R_{33}$  и  $R_{43}$  — нагрузочные сопротивления;  $BC$  — вентильный мост, питающий цепь реле  $P_5, P_6$  и  $P_7$ .

менным током и вентильный мост  $BC$ , питающий цепь промежуточных реле  $P_5, P_6$  и  $P_7$ .

С помощью своих контактов реле  $P_5$  и  $P_7$  включают цепи двух контакторов. Один контактор замыкает силовую цепь электропневматического клапана механизма, сжимающего свариваемые детали, а второй замыкает первичную обмотку сварочного трансформатора. В более ответственных устройствах вместо электромагнитного контактора используются игнитроны.

К началу работы реле контакты  $P_1, P_2, P_3$  и  $P_5$  в катодных участках цепей ламп разомкнуты и все конденсаторы выдержки времени  $C_{11}, C_{21}, C_{31}$  и  $C_{41}$  заряжены.

Контакт  $P_5$  в катодном участке цепи лампы первой секции, контролирующей время сжатия, замыкается с помощью реле  $P_5$ , вводимого в действие от педальной кнопки  $КП$  (рис. 2) на сварочной машине. Действие педали после срабатывания реле  $P_5$  блокируется вторым контактом  $P_5$ , включенным параллельно  $КП$ , что обеспечивает независимость работы реле  $P_5$  от длительности нажатия педальной кнопки  $КП$ . Одновременно с реле  $P_5$  оживляется ток и реле  $P_6$ , открывающее электропневматический клапан механизма сжатия. Сжатие нарастает до тех пор, пока не срабатывает реле  $P_1$ , замыкающее одним из своих контактов цепь реле  $P_7$ , управляющее контактором сварочного тока, а другим контактом — катодную цепь лампы второй секции, контролирующей выдержку времени сварочного тока.

Сварочный ток проходит до тех пор, пока не срабатывает реле  $P_2$ , размыкающее своим контактом в первой секции цепь реле  $P_1$  и связанную с ним цепь сварочного тока. Одновременно реле  $P_2$  одним из своих контактов блокирует во второй секции действие контакта  $P_1$ , а другим кон-

тактом в третьей секции вводит в действие цепь выдержки времени «проковка». Проковка заканчивается при срабатывании реле  $P_3$ , разрывающего своим контактом цепь реле  $P_6$ , управляющее контактором электропневматического вентиля сжатия.

Обесточивание реле  $P_6$  приводит к прекращению сжатия свариваемых деталей, а обесточивание реле  $P_5$  приводит к разрыву катодной цепи лампы  $L_1$ , что необходимо для возобновления режима заряда конденсатора  $C_{11}$ . Заряд конденсаторов, расположенных в других секциях схемы, возобновляется после срабатывания реле  $P_4$ . Включение этого реле приводит к разрыву цепи реле  $P_2$ , открывающего контакты в катодных участках ламп второй и третьей секций, а через реле  $P_3$  — и в катодном участке четвертой секции схемы. Выдержка времени в отдельных секциях регулируется с помощью реостатов  $R_{11}, R_{21}, R_{31}$  и  $R_{41}$  (рис. 2), изменяющих постоянные времени зарядных цепей конденсаторов. Во второй секции с помощью ключа  $П$ , шунтирующего сопротивление  $R_{24}$ , достигается, кроме того, введение дополнительного диапазона регулирования времени сварки.

**Прерыватели (регуляторы) точечной и шовной сварок с игнитронами.** При управлении режимами точечной и шовной сварок, когда требуется не только широкая регулировка весьма малых времен сварки вплоть до небольших долей периода, но также широкая регулировка действующего значения сварочного тока, сварочные трансформаторы включаются обычно в цепь питания через игнитроны. Схема игнитронного узла, одинаковая как для прерывателей (регуляторов) точечной, так и шовной сварок, приведена на рис. 3.



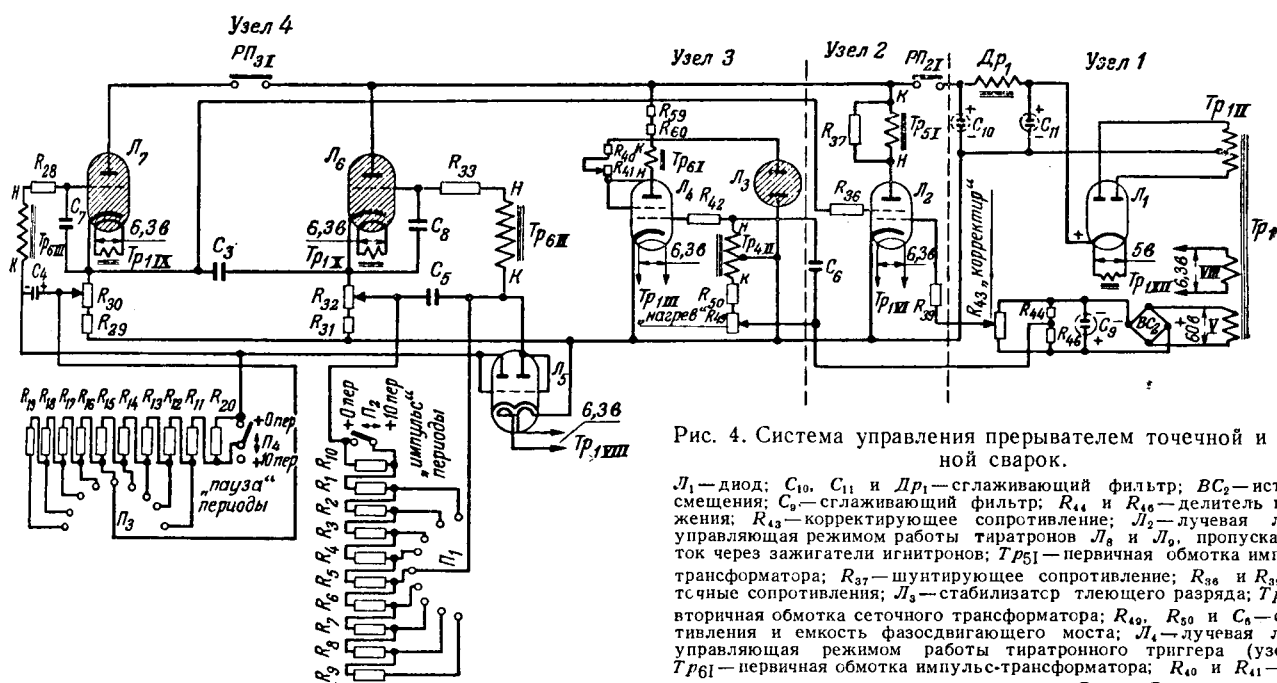


Рис. 4. Система управления прерывателем точечной и шовной сварки.

$L_1$ —диод;  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  и  $L_{P1}$ —сглаживающий фильтр;  $BC_2$ —источник смещения;  $C_9$ —сглаживающий фильтр;  $R_{44}$  и  $R_{45}$ —делитель напряжения;  $R_{43}$ —корректирующее сопротивление;  $L_2$ —лучевая лампа, управляющая режимом работы тиристорных  $L_6$  и  $L_7$ , пропускающих ток через зажигающие игнитроны;  $TP_{51}$ —первичная обмотка импульс-трансформатора;  $R_{37}$ —шунтирующее сопротивление;  $R_{36}$  и  $R_{39}$ —сеточные сопротивления;  $L_3$ —стабилизатор тлеющего разряда;  $TP_{41}$ —вторичная обмотка сеточного трансформатора;  $R_{40}$ ,  $R_{41}$  и  $C_8$ —сопротивления и емкость фазосдвигающего моста;  $L_4$ —лучевая лампа, управляющая режимом работы тиристорного триггера (узел 4);  $TP_{61}$ —первичная обмотка импульс-трансформатора;  $R_{40}$  и  $R_{41}$ —шунтирующие его активные сопротивления;  $R_{39}$  и  $R_{40}$ —сопротивления анодной нагрузки;  $L_5$  и  $L_7$ —тиристоры триггера;  $C_3$ —комму-

тирующий конденсатор;  $TP_{61I}$  и  $TP_{61II}$ —вторичные обмотки синхронизирующего импульс-трансформатора;  $C_7$  и  $C_8$ —стабилизирующие емкости;  $C_4$  и  $C_5$ —емкости цепей выдержки времени;  $R_{28}$ ,  $R_{30}$ ,  $R_{31}$  и  $R_{32}$ —катодные сопротивления;  $L_6$ —зарядный диод;  $R_1$ — $R_{20}$ —набор разрядных сопротивлений;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и  $L_4$ —переключатели.

вом\*). С помощью потенциометра  $R_{43}$  регулируется смещение в цепи сетки лампы  $L_2$ , что сказывается на ширине импульса анодного тока в пределах его изменения в диапазоне около  $180^\circ$ . Этим обеспечивается выравнивание токов игнитронов (цепь коррекции), исключающее появление постоянного потока намагничивания в сердечнике сварочного трансформатора.

Узел 4 представляет собой триггер на тиристорах и предназначен для регулирования времени сварки и паузы путем изменения напряжения экранирующей сетки  $L_2$  с положительного на нулевое.

Положительное напряжение сообщается сетке лампы  $L_2$  тогда, когда горит тиристор  $L_7$ , вызывающий положительное падение напряжения на сопротивлениях  $R_{30}$  и  $R_{29}$ . Это напряжение спадает до нуля тогда, когда загорается тиристор  $L_6$  и гасится тиристор  $L_7$ . Гашение одного из тиристоров при зажигании другого обусловлено действием конденсатора  $C_3$ , включенного между катодами приборов.

Через катодное сопротивление в цепи горящего тиристора и диод  $L_5$  конденсатор  $C_3$  заряжается с положительной полярностью на обкладке, связанной с катодом горящего прибора. В момент зажигания дуги в другом тиристоре образуется замкнутый контур из двух горящих тиристоров и разрядный ток конденсатора, являясь встречным током, гасит дугу в ранее работавшем приборе и поддерживает ее в тиристоре, вновь вступившем в работу.

Длительность пребывания тиристора в запертом состоянии определяется временем разряда конденсатора ( $C_4$  у тиристора  $L_7$  и  $C_5$  у тиристора  $L_6$ ) на набор сопротивлений в цепи сетки. Набором сопротивлений в сеточной цепи тиристора

на  $L_6$  (производимого с помощью многоконтактного переключателя  $\Pi_1$  и двухконтактного переключателя  $\Pi_2$ ) регулируется время сварки, так как при негорении тиристора  $L_6$  (и горении тиристора  $L_7$ ) на экранирующую сетку лампы  $L_2$  подается положительное напряжение. Набором сопротивлений в цепи сетки тиристора  $L_7$  с помощью переключателей  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$  регулируется время паузы между сварками, так как при негорении тиристора  $L_7$  напряжение, подаваемое на экранирующую сетку лампы  $L_2$ , равно нулю.

Для синхронизации моментов включения тиристорных  $L_6$  и  $L_7$  с нулевыми значениями напряжения питания игнитронов, в сеточные цепи  $L_6$  и  $L_7$  введены вторичные обмотки  $TP_{61I}$  и  $TP_{61II}$  импульс-трансформатора, первичная обмотка которого входит в анодную цепь лампы  $L_4$  (узел 3 на рис. 4). С помощью лампы  $L_4$  формируются прямоугольные импульсы тока в сопротивлениях  $R_{40}$  и  $R_{41}$  и острые импульсы напряжения в обмотках  $TP_{61I}$  и  $TP_{61II}$ . Экранирующая сетка у лампы  $L_4$  присоединена непосредственно к аноду.

Для стабилизации режима работы лампы  $L_4$  используется стабилизатор  $L_3$ .

Схема управления режимом точечной сварки отличается от приведенной на рис. 4 только тем, что тиристор  $L_7$  имеет другую сеточную схему (рис. 5). Здесь не требуется автоматическая регулировка длительности паузы и сеточная цепь тиристора  $L_7$  нормально заперта отрицательным напряжением, получаемым от вентильного моста  $BC_3$ .

Напряжение на конденсаторе  $C_1$  в этом режиме равно нулю, так как через замкнутый контакт  $PP_{1II}$  к конденсатору присоединено разрядное сопротивление  $R_{27}$ .

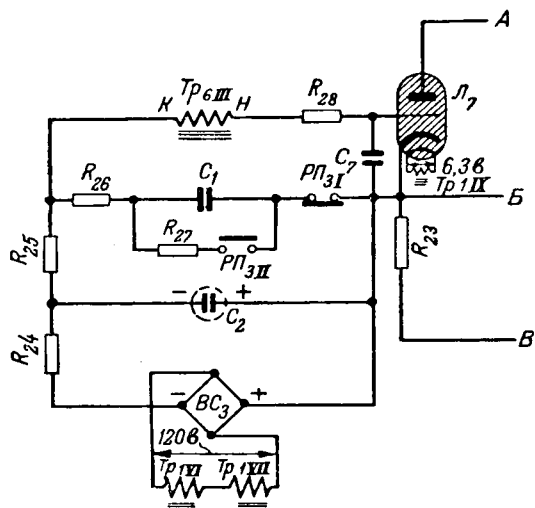


Рис. 5. Схема сеточной цепи у тиратрона  $L_7$  в прерывателе точечной сварки;

$L_7$  — тиратрон триггера;  $C_1$  — стабилизирующая емкость;  $R_{29}$  — катодное сопротивление;  $R_{28}$  — сеточное сопротивление;  $Tr_{III}$  — вторичная обмотка сетевого трансформатора;  $R_{24}$ ,  $R_{25}$  — сопротивления в цепи сетки;  $R_{26}$  — зарядное сопротивление;  $R_{27}$  — разрядное сопротивление;  $C_1$  — емкость цепи выдержки времени;  $BC_3$  — источник запирающего напряжения;  $C_2$  — электролитический конденсатор, выполняющий роль фильтра.

При нажатии сварщиком педальной кнопки замыкается контакт  $РП_{31}$  (а  $РП_{31}$  размыкается) и возникает зарядный контур с положительным падением напряжения на сопротивлениях  $R_{24}$  и  $R_{25}$ . Результирующее отрицательное напряжение в сеточной цепи тиратрона  $L_7$  при этом настолько ослабляется, что положительный импульс в обмотке  $Tr_{III}$  превышает напряжение смещения и тиратрон  $L_7$  зажигается. Тиратрон горит до тех пор, пока конденсатор  $C_2$  не разрядится на набор сопротивлений в цепи сетки тиратрона  $L_6$ . Времени горения тиратрона  $L_7$  соответствует длительность сварочного тока. Регулировка величины и длительности прохождения тока производится так же, как и в рассмотренной ранее схеме.

**Электровибраторы.** Механизация производства строительных материалов привела к широкому применению электровибраторов, функции которых сводятся к созданию вибраций у трамбовочных молотков и у платформ, распределяющих вязкую массу по приемным блокам. Возбуждение вибраций достигается здесь с помощью электромагнитов, обтекаемых однополупериодным током промышленной частоты.

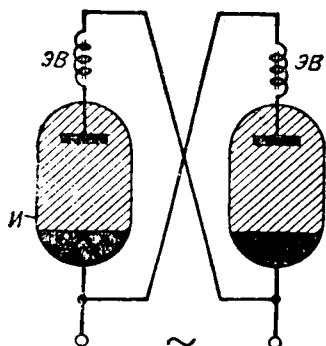


Рис. 6. Схема игнитронного узла в электровибраторах.  
И — игнитроны; ЭВ — электровибраторы.

Узел включения электровибраторов приведен на рис. 6. Здесь также используются игнитроны, в катодные или анодные цепи которых включены электровибраторы (ЭВ). Через каждый вибратор проходит однополупериодный ток, в то время как из сети переменного тока благодаря

попарному включению вибраторов потребляется переменный ток. Управление вибраторами проводится по схеме, аналогичной приведенной на рис. 4, с исключением узлов 3 и 4, так как здесь не требуется создавать процессы такой же цикличности, как при управлении сваркой.

**Электроника в системе микроконтроля и сортировки размеров изделий.** Из чрезвычайно разнообразных по назначению и принципу действия электронных устройств, применяемых в промышленности для автоматического контроля качества продукции, рассмотрим здесь лишь электронное устройство, предназначенное для микроизмерения и сортировки размеров подшипниковых роликов, разработанное во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина А. И. Бояровым и примененное в автомате, созданном на одном из союзных заводов.

Описываемое устройство контролирует размер роликов с точностью до одного микрона<sup>2</sup> и направляет измеренный ролик в соответствующий по сорту приемный бункер.

В электрической схеме устройства (рис. 7, 8) выделены пунктирными линиями отдельные ее узлы. Рис. 7 содержит схемы: 1) измерительного узла и 2) преобразовательно-усилительного блока с узлами 2—5, а рис. 8 содержит схемы: 3) блока управления с узлами 6 и 7 и 4) релейно-исполнительную систему (узел 8), управляющую заслонками бункеров. Сопряжение составных частей схемы, приведенных на рис. 7 и 8, проходит по точкам А, Б и В. Действие отдельных узлов схемы рис. 7 поясняется диаграммами напряжения, расположенными ниже схемы.

Измерительный узел схемы 1 содержит два активно-индуктивных моста, у которых в качестве двух плеч используются секции вторичных обмоток питающих трансформаторов  $T_2$  и  $T_3$  (нулевая точка которых заземлена), а в качестве двух других плеч используются в верхнем мосте активное сопротивление  $R_1$  и индуктивность  $L_1$ , а в нижнем мосте набор активных сопротивлений  $R_2$ ,  $R'_2$  и т. д. и индуктивность  $L_2$ .

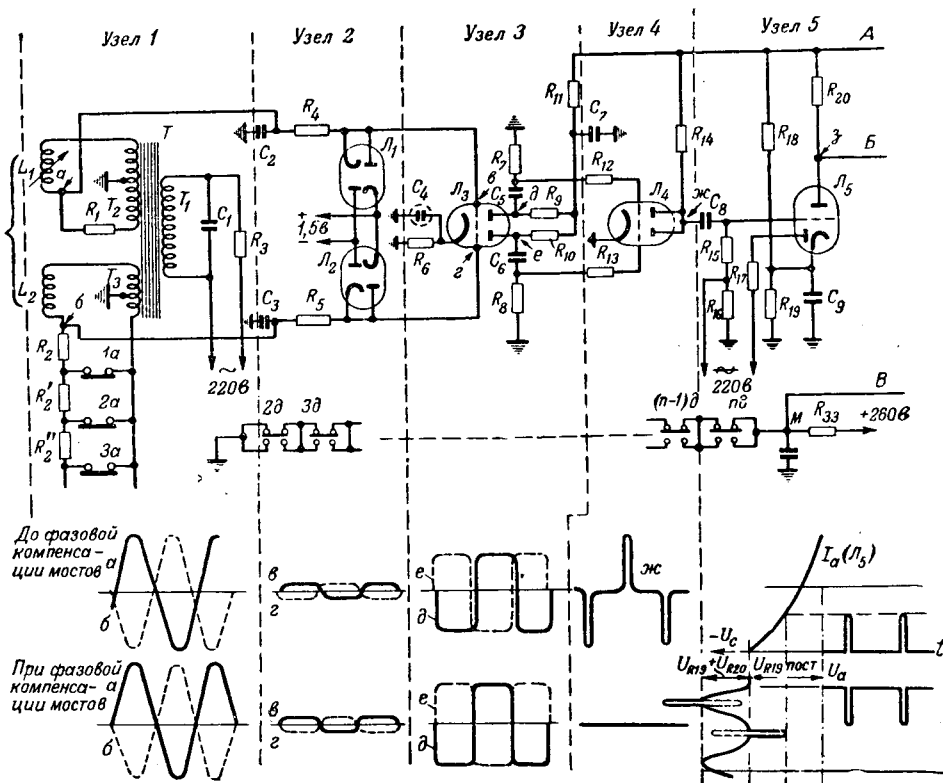
Индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  создаются датчиками, преобразующими линейные размеры в пропорциональные им значения индуктивностей. При изменении любого из плеч моста  $R$  либо  $L$ , фаза выходного напряжения — напряжение между нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и точкой соединения активного и реактивного сопротивлений (а в одном мосте и б в другом) — меняется.

В схеме используются два фазирующих моста с встречными выходными напряжениями с целью применения для измерения метода компенсации. Измеряемый ролик вводится в датчик верхней измерительной системы и в зависимости от измеряемого диаметра индуктивность  $L_1$ , как и соответствующая ему фаза выходного напряжения моста, принимают вполне определенные значения.

<sup>2</sup> С измерением диаметра на двух уровнях по высоте с тем, чтобы производить сортировку не только по диаметру, но и по конусности.

Рис. 7. Схема измерительного и преобразовательно-усилительного узлов в автомате сортировки роликов.

$T_1$  и  $T_2$  — вторичные обмотки фазосдвигающих мостов;  $L_1$  — индуктивность измерительного датчика;  $L_2$  — индуктивность эталонного датчика;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — набор сопротивлений для компенсации напряжения у измерительных мостов;  $1a, 2a, 3a$  и т. д. — контакты выходных исполнительных реле;  $T_1$  — первичная обмотка трансформатора питания мостов;  $C_1$  — шунтирующая емкость, пропускающая реактивный ток трансформатора и стабилизирующая вместе с  $R_4$  напряжение на трансформаторе;  $L_1$  и  $L_2$  — диодные ограничители;  $C_2$  и  $C_3$  — емкости в диагоналях измерительных мостов;  $R_1$  и  $R_2$  — ограничительные сопротивления;  $L_3$  — усилительная лампа;  $R_6$  и  $C_4$  — звено автоматического смещения;  $C_5$  и  $C_6$  — емкости цепей связи;  $R_7$  и  $R_8$  — сопротивления цепей связи;  $R_9$  и  $R_{10}$  — анодное сопротивление;  $R_{11}$  и  $C_7$  — развязывающий фильтр;  $L_4$  — суммирующая лампа;  $R_{12}$  в  $R_{14}$  — сеточные сопротивления;  $R_{15}$  — сопротивление анодной нагрузки;  $C_8$  — емкость связи;  $R_{16}, R_{17}, R_{18}, R_{19}$  — сопротивления смещения;  $C_9$  — емкость звена автоматического смещения;  $L_5$  — лампа отбора импульсов нужной полярности;  $R_{20}$  — нагрузочное сопротивление в цепи анода лампы  $L_5$ . Цепь В с контактами 2а, 3а и т. д. выполняет функцию возврата триггера узла 6 (рис. 8) в исходное положение.



На диаграммах рис. 7 выходное напряжение верхнего моста обозначено сплошной, а нижнего моста — пунктирной синусоидой. До фазовой компенсации мостов выходное напряжение верхнего моста отстает от напряжения нижнего моста на угол, меньший чем  $180^\circ$  (верхняя группа диаграмм). Автоматическим набором сопротивлений с помощью системы контактов  $1a, 2a, 3a$  и т. д. (рис. 7), управляемых с выхода схемы, меняется значение падения напряжения на активном сопротивлении в нижнем мосте, содержащем эталонный датчик с индуктивностью  $L_2$ , в связи с этим меняется и фаза выходного напряжения нижнего моста до тех пор, пока фазы выходных напряжений обоих мостов не совпадут, как это показывает нижняя группа диаграмм рис. 7.

Преобразовательно-усилительный блок схемы, состоящий из узлов 2, 3, 4 и 5, выполняет функцию преобразования фазового расхождения в определенный по знаку импульс напряжения, управляющий исполнительным звеном.

Узел 2, в состав которого входит два диодных ограничителя, срезает, как это видно из расположенных ниже узла 2 диаграмм, верхушки синусоид до некоторого остаточного значения (равного примерно  $1,5$  в). Этим достигается сравнение по фазе синусоид на наиболее крутом их участке, что повышает чувствительность схемы и делает независимым такое сравнение от возможных колебаний напряжения в питающей сети.

Узел 3 с двойным триодом  $L_3$  усиливает срезаемые основания синусоид, что повышает амплитуду и крутизну сравниваемых импульсов, как это видно из диаграмм.

В узле 4, содержащем также двойной триод

$L_4$ , импульсы напряжения, как это можно видеть по диаграммам, суммируются. В моменты, когда импульсы сеточного напряжения у лампы  $L_4$  противоположны по знаку, ток в анодном сопротивлении  $R_{14}$ , равно как и напряжение в точке  $жс$ , остаются неизменными, т. е. изменение выходного напряжения равно нулю. В интервалы же времени, когда напряжения в цепи сеток триода имеют один и тот же знак, на выходном сопротивлении появляются импульсы напряжения. Существенно отметить, что при переходе через сдвиг по углу в  $180^\circ$  (что возможно при последней степени компенсации) знак у импульсов меняется на обратный. Степень расхождения фаз выходных напряжений характеризуется шириной импульса.

Лампа  $L_5$  (диод-триод) в узле 5 реагирует только на положительные импульсы, поступающие в ее сеточную цепь до фазовой компенсации мостов. После фазовой компенсации лампа не реагирует ни на положительные, ни на отрицательные импульсы. Это достигается применением у лампы  $L_5$  комбинированного смещения, включающего постоянное напряжение, снимаемое с сопротивления  $R_{19}$  (входящего в делитель напряжения  $R_{18}-R_{19}$ ), и однополупериодное напряжение, возникающее на сопротивлениях  $R_{19}$  и  $R_{16}$  при выпрямлении переменного напряжения  $220$  в, подводимого через диод лампы и сопротивления  $R_{16}, R_{17}$  и  $R_{19}$ .

При суммарном напряжении смещения положительные импульсы, совпадающие с моментами нулевых значений однополупериодного напряжения, вызывают в лампе, как это видно из диаграмм, импульсы тока и соответствующие им

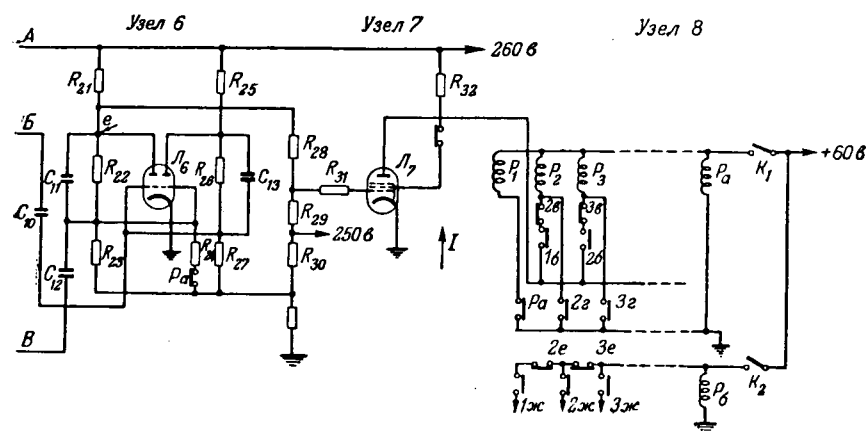


Рис. 8. Схема узла управления исполнительный системы в автомате сортировки роликов.

$L_6$  — триггерная лампа;  $R_{21}$  и  $R_{25}$  — анодные сопротивления триггера;  $C_{10}$  — емкость в цепи подачи рабочих импульсов;  $C_{12}$  — емкость в цепи подачи импульсов возврата триггера в исходное положение;  $R_{22}$  и  $R_{24}$  — сопротивления обратной связи;  $C_{11}$  и  $C_{13}$  — емкости, ускоряющие перебор триггера;  $R_{23}$  — входные сопротивления;  $R_{26}$ ,  $R_{27}$  и  $R_{28}$  — выходные сопротивления;  $R_{29}$  — сеточное сопротивление;  $L_7$  — исполнительная лампа;  $R_{32}$  — сопротивление в цепи экранирующей сетки лампы;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  — реле;  $1б$ ,  $2б$ ,  $3б$  и т. д.,  $2в$ ,  $3в$ ,  $2г$ ,  $3г$  и т. д.,  $1ж$ ,  $2ж$  и т. д.,  $2е$ ,  $3е$  и т. д. — контакты в цепи реле;  $P_4$  — реле предварительного включения исполнительных реле;  $P_6$  — реле, питание цепи;  $K_1$  и  $K_2$  — контакты, управляемые через кулачковый вал.

отрицательные импульсы напряжения на выходе лампы. Отрицательные же импульсы в цепи сетки отсекаются. Лампа  $L_5$  также не реагирует, если знак импульсов (пунктирные кривые) меняется на обратный при сдвиге фаз нижнего моста на угол, превышающий  $180^\circ$ . В результате на выходе лампы  $L_5$  появляются отрицательные по знаку импульсы напряжения до тех пор, пока не наступает фазовая компенсация выходных напряжений мостов либо некоторая перекомпенсация.

Схемы блока управления и исполнительной системы приведены на рис. 8. В первый блок входят: 1) триггер (узел 6) и 2) управляющая лампа (узел 7), а в исполнительную систему входит релейная цепочка (узел 8), управляющая заслонками бункеров.

До поступления отрицательного импульса с лампы  $L_5$  на сетку левого триода лампы  $L_6$  ток пропускает левый триод (нормальное состояние триггера). Выходной потенциал анода левой лампы, определяющий потенциал сетки управляющей лампы  $L_7$ , в этом случае мал, и поэтому лампа  $L_7$  заперта.

При замыкании в исполнительной системе контакта  $K_1$  с помощью кулачкового вала (контакт  $K_1$  остается замкнутым весь цикл измерений, длящийся около 0,7 сек) ток проходит через реле  $P_4$ , замыкающее своим контактом первое реле  $P_1$  релейной цепочки. Это реле имеет три контакта: 1) контакт  $1а$  в узле 1, которым оно вводит в действие первую секцию активного сопротивления компенсирующего моста  $R_2$ , 2) контакт  $1б$ , которым подготавливается к действию второе реле цепочки  $P_2$  и 3) контакт  $1ж$ , который подготавливает к действию цепь клапана электропневматического механизма, открывающего заслонку первого бункера. Фактическое открытие заслонки при замкнутом контакте  $1ж$  (и нормально замкнутом контакте  $2е$ ) происходит только после закрытия кулачковым валом другого контакта  $K_2$ , что имеет место после окончания полного цикла измерений, т. е. после открытия контакта  $K_1$ .

Если включение в компенсирующий мост первого сопротивления  $R_2$  не приводит к фазовой компенсации выходных напряжений измерительных мостов, то отрицательный импульс на выходе лампы  $L_5$  продолжает действовать, что приводит к срабатыванию реле  $P_2$ . Реле  $P_2$ , как и все последующие, имеют, кроме трех контактов, дей-

ствие которых аналогично описанным выше, еще четыре контакта: 1) контакты  $2в$  и  $2г$ , с помощью которых питание реле  $P_2$  снимается с лампы  $L_7$  и переводится на вспомогательный источник напряжения (+60 в), 2) контакт  $2е$ , отсоединяющий цепь электропневматического клапана заслонки первого бункера от источника питания, 3) контакт  $2ж$ , замыкающий цепь питания заслонки второго бункера и 4) переключательный контакт  $2д$  (в узле 2), разрывающий на время перехода с верхнего положения в нижнее цепь питания источника (+260 в), что создает отрицательный импульс на сетке правого триода лампы  $L_6$  и возврат, в силу этого, триггера в исходное положение. Таким путем триггер подготавливается для восприятия последующих импульсов напряжения и к введению в действие следующего реле. Срабатывание следующих реле идет до тех пор, пока не устанавливается компенсация (либо перекомпенсация) фаз выходных напряжений мостов. По окончании измерительного процесса замыкается с помощью кулачкового вала контакт  $K_2$ , в связи с чем оживляется ток цепи уже подготовленной к открытию заслонки, заслонка открывается и ролик попадает в соответствующую ему по сортировке группу.

**Предпосылки дальнейшего развития применений электроники.** Дальнейшее развитие электроники как одного из мощных средств совершенствования производства связано не только с охватом новых областей применения электроники, но и с повышением как качеств устройств, так и системы их обслуживания в эксплуатации.

Дальнейшее повышение качества устройств в большой мере связано с возможностями: 1) уменьшения допустимого диапазона разброса параметров электронных ламп; 2) повышения стабильности сеточных характеристик у тиратронов и повышения срока их службы, особенно у газонаполненных приборов; 3) введения в серийное производство расширенной номенклатуры безнасосных вентилях с ртутным катодом и 4) уменьшения удельных весов и повышения к. п. д. полупроводниковых вентилях путем повышения допускаемого ими обратного напряжения и понижения прямого падения напряжения.

Для улучшения обслуживания необходимо передать функции контроля и ухода за устройства-



ми инженерно-техническому персоналу, получившему специальную подготовку в области промышленной и энергетической электроники.

Инженерно-технический персонал должен не только хорошо знать рабочие процессы и характеристики широкой номенклатуры электронных, ионных и полупроводниковых приборов, но и глубоко изучить теорию работы и методы расчета выпрямительных, усилительных, генераторных и мощных преобразовательных систем, применяемых в промышленных и энергетических устройствах.

При такой многогранной подготовке инженерно-технический персонал не только обеспечит поддержание нормального режима работы действующих, разнотипных по своему характеру и назначению, устройств, но и сможет успешно вести работу по дальнейшему усовершенствованию

и оснащению предприятий новейшими типами электронных систем измерения, автоматического управления, регулирования и контроля, а также разнообразными системами преобразования тока.

При совместных усилиях заводов, производящих электронные, ионные и полупроводниковые приборы, в направлении расширения номенклатуры и повышения их качества, и предприятий, эксплуатирующих устройства, по обеспечению их высококвалифицированным обслуживанием, база для разнообразного применения электроники в нашей социалистической промышленности еще больше расширится и укрепитя, что будет содействовать быстрейшему развитию наиболее передовых способов производства.

[21. 4. 1953]



## Переходное падение напряжения и потери под щетками в машине постоянного тока при расстроенной коммутации

Кандидат техн. наук В. В. ФЕТИСОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

При больших перегрузках и в различных переходных режимах вследствие ряда причин: насыщения сердечников добавочных полюсов, демпфирующего действия вихревых токов на коммутирующий поток, влияния трансформаторной э. д. с., индуцируемой в короткозамкнутых секциях изменяющимся основным потоком, правильная коммутация машины нарушается. В этих случаях реактивная э. д. с. в коммутируемых секциях оказывается частично или полностью некомпенсированной и падение напряжения под щетками увеличивается. В литературе [Л. 1...5] этот вопрос освещен недостаточно. В данной статье делается попытка пополнить этот пробел.

**Определение переходного падения напряжения и переходных потерь на коллекторе.** Явление возрастания падения напряжения  $U_b$  в щеточном контакте при отклонении коммутации от прямолинейного закона можно обнаружить, рассматривая потенциальные щеточные кривые. В случае прямолинейной коммутации распределение потенциала, а также и тока под щеткой близко к равномерному (кривая 1, рис. 1), причем напряжение под набегающим краем равно напряжению под сбегающим краем. При расстройстве

На основе анализа энергетической стороны процесса коммутации получены зависимости переходного падения напряжения и переходных потерь на коллекторе для любого случая коммутации при различном типе обмотки якоря. Изложена методика экспериментального исследования переходного падения напряжения, пригодная для установившихся и неустойчивых режимов. Приведены результаты экспериментального исследования, подтверждающие правильность полученных теоретических зависимостей и указывающие на значительную роль переходного падения напряжения и переходных потерь при больших перегрузках и неустойчивых процессах.

коммутации вследствие влияния добавочного тока в коммутируемых секциях смещается ток к одному краю щетки — к сбегающему при замедленной коммутации и набегающему при ускоренной. Напряжение под этим краем заметно возрастает, а под другим уменьшается (кривые 2, 3, 4, 5, рис. 1).

Это приводит к увеличению потерь [Л. 1] и результирующего падения напряжения в щеточном контакте.

Рассматривая участок цепи якоря  $CBA'D'$  (рис. 1) от сбегающего края одной щетки до набегающего другой щетки, противоположной полярности, находим, что общее падение напряжения под щетками обеих полярностей равно сумме падений напряжения под сбегающим краем одной щетки и набегающим другой:

$$U_b = U_{b\text{сб}} + U_{b\text{нб}}. \quad (1)$$

В уравнение (1) напряжения  $U_{b\text{сб}}$  и  $U_{b\text{нб}}$ , определяемые из потенциальных щеточных кривых, представляют собой средние величины. В процессе коммутации эти напряжения пульсируют, принимая одинаковые значения при повороте якоря на одно зубцовое деление.



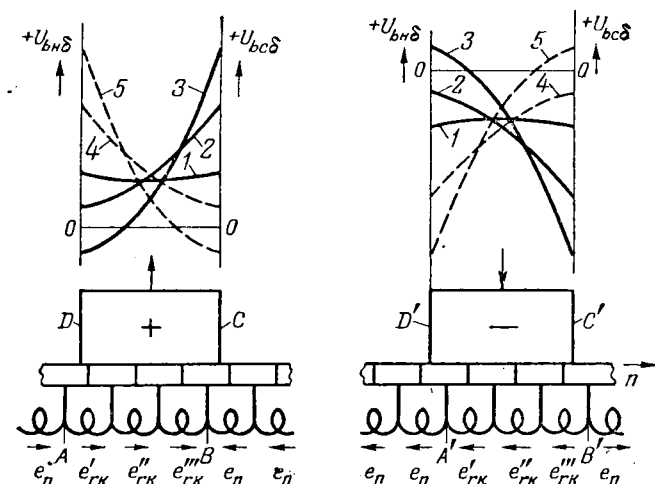


Рис. 1. Потенциальные щеточные кривые.

Для участка обмотки якоря, замыкаемого на коротко щеткой (контур  $ABCD$ , рис. 1), можно составить следующее уравнение

$$\Sigma e_{rk} = U_{bcb} - U_{bnb}. \quad (2)$$

$\Sigma e_{rk}$  также среднее значение суммы всех э. д. с., действующих в секциях, замкнутых на коротко щеткой при повороте якоря на одно зубцовое деление.

Из уравнений (1) и (2) находим следующее выражение для переходного падения напряжения:

$$U_b = \Sigma e_{rk} + 2U_{bnb}. \quad (3)$$

Для случая резко замедленной коммутации, когда напряжение под набегающим краем щетки меняет свой знак (кривая 3, рис. 1)

$$U_b = \Sigma e_{rk} - 2U_{bnb}. \quad (3a)$$

Для случая ускоренной коммутации (кривые 4 и 5, рис. 1)

$$U_b = \Sigma e_{rk} \pm 2U_{bnb}. \quad (3б)$$

При больших кратностях тока и в переходных режимах первое слагаемое  $\Sigma e_{rk}$  в правой части уравнений (3), (3a) и (3б) может достигать весьма больших значений, во много раз превосходящих второе слагаемое  $2U_{bnb}$  или  $2U_{bcb}$ , вызывая тем самым значительное возрастание падения напряжения под щетками  $U_b$ .

Более глубокий анализ вопроса определения переходного падения напряжения в щеточном контакте возможен на основе рассмотрения энергетической стороны процесса коммутации машины постоянного тока.

В процессе коммутации энергия магнитного поля рассеяния коммутируемой секции претерпевает следующие изменения. В начале коммутации, когда ток в секции, начиная со значения  $i_a$  (рис. 2) падает до нуля, энергия магнитного поля секции, равная в начальный момент  $W_{ms1} = \frac{1}{2} L i_a^2$ , также уменьшается до нуля. В конце

периода коммутации, когда ток в секции, протекая в обратном направлении, возрастает от нуля до значения  $-i_a$ , энергия  $W_{ms}$  также увеличивается и становится равной первоначальному запасу энергии  $W_{ms1}$ . Происходит как бы процесс разряда-заряда энергии магнитного поля коммутируемой секции.

В случае прямолинейной коммутации при наличии коммутирующего поля этот процесс разряда-заряда энергии секции не вызывает потерь в щеточном контакте, так как в первый интервал коммутации секция, двигаясь в коммутирующем поле, отдает свой запас энергии  $W_{ms1}$ , превращая его в механическую работу (рис. 2), а во второй интервал приобретает запас энергии  $W_{ms1}$ , работая в генераторном режиме. При прочих равных условиях потери в щеточном контакте в данном случае зависят лишь от протекающего через щетку тока и минимальны.

В случае непрямолинейной коммутации при ослабленном коммутирующем поле или при его

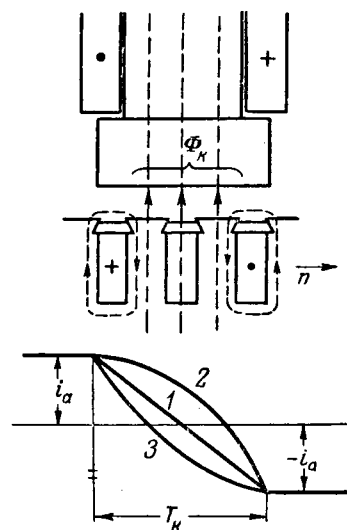


Рис. 2. Взаимодействие тока в короткозамкнутых секциях с коммутирующим потоком в зоне коммутации.

отсутствии процесс разряда-заряда энергией коммутируемой секции вызывает дополнительные потери в щеточном контакте, так как в процессе разряда энергия секции  $W_{ms1}$  частично или полностью выделяется в переходном сопротивлении щеточного контакта, а заряд энергией секции происходит за счет поступления энергии из цепи якоря, что также вызывает увеличение потерь в щеточном контакте. Если пренебречь переходным сопротивлением между щеткой и набегающей пластиной, можно, например, показать [уравнение (1,28), приложение], что в случае отсутствия коммутирующего поля потери в щеточном контакте равны учетверенному запасу энергии магнитного поля коммутирующей секции ( $4W_{ms1}$ ).

При прямолинейной коммутации энергия, отданная секцией при работе ее в двигательном режиме, равна энергии, полученной в генератор-

ном режиме, и поэтому коммутируемые секции не создают вращающего момента в коммутационной зоне. В случае непрямолинейной коммутации это соотношение энергий нарушается, поэтому в коммутационной зоне возникает дополнительный вращающий момент.

Исследование энергетических соотношений процесса коммутации, приведенное в приложении, позволяет вывести для средних значений потерь на коллекторе  $P_b$  и переходного падения напряжения  $U_b$  следующие формулы [уравнения (1,23) и (1,25), приложение], пригодные для любого типа обмотки (например, множественной петлевой и волновой) и в любом случае коммутации:

$$P_b = P_{bo} + P_{bd} = U_b I_a + \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} (e_k + e_t) idt, \quad (4)$$

$$U_b = \frac{P_{bo}}{I_a} = \frac{p}{a} k_\beta (E_r + E_k + E_t) + 2U_{\beta 1}. \quad (5)$$

Здесь  $P_{bo}$  и  $P_{bd}$  — основная и добавочная составляющие переходных потерь на коллекторе;  $p$  и  $a$  — число пар полюсов и число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  $e_k$ ,  $e_t$ ,  $i$  и  $T_k$  — мгновенные значения коммутирующей и трансформаторной э. д. с., тока в коммутируемой секции и период коммутации;  $k_\beta$  — коэффициент перекрытия щеткой коллекторных делений, равный отношению расчетной ширины щетки  $b_{bi}$ , определяемой по уравнению (1,26), к коллекторному делению  $\beta_k$ ;  $E_r$ ,  $E_k$  и  $E_t$  — средние значения реактивной, коммутирующей и трансформаторной э. д. с. В случае нормального коммутирующего поля э. д. с.  $E_k$  надо брать с отрицательным знаком, а в случае опрокинутого — с положительным. Знак э. д. с.  $E_t$  и  $e_t$  также может быть различным в зависимости от характера изменения основного потока машины (во многих случаях э. д. с.  $E_t$  и  $e_t$  можно пренебречь);  $U_{\beta 1}$  — среднее значение напряжения между щеткой и набегающей коллекторной пластиной. При опрокинутом коммутирующем поле напряжение  $U_{\beta 1}$  отрицательно. При больших кратностях тока в случае замедленной коммутации  $2U_{\beta 1}$  мало по сравнению с первым слагаемым уравнения (5).

Из уравнения (4) и (5) можно сделать следующие выводы:

1. В общем случае коммутации потери под щетками имеют две составляющие: основную  $P_{bo}$ , обусловленную рабочим током якоря  $I_a$ , протекающим через переходное сопротивление между щетками и коллектором, и добавочную  $P_{bd}$ , вызванную расстройством коммутации.

2. Переходное падение напряжения  $U_b$  зависит только от основных потерь  $P_{bo}$  и не зависит непосредственно от добавочной составляющей  $P_{bd}$ .

3. Знак добавочной составляющей потерь  $P_{bd}$  может быть как положительным, так и отрица-

тельным. В случае отсутствия трансформаторной э. д. с. знак составляющей  $P_{bd}$  зависит от знака дополнительного вращающего момента  $M_k$ , возникающего в коммутационной зоне вследствие взаимодействия добавочных коммутационных токов  $i_f$  с коммутирующим потоком и равно [уравнение (1,20), приложение]:

$$M_k = \frac{P_{bd}}{\omega} = \frac{2pk_\beta}{\omega T_k} \int_0^{T_k} e_k i_f dt. \quad (6)$$

При  $e_k = E_k = \text{const}$  за период коммутации момент [уравнение (1,20a), приложение]

$$M_k = \frac{p F_{km} E_k}{\omega}, \quad (6a)$$

где  $F_{km}$  — н. с. коммутационной реакции на пару полюсов.

Из уравнения (6), а также из рис. 2 видно, что в случае замедленной коммутации при ослабленном коммутирующем поле момент  $M_k$  оказывается движущим, а составляющая  $P_{bd}$  — отрицательной. Это означает, что часть мощности, доставляемой в коммутируемые секции из главной цепи машины, равная мощности  $P_{bd}$ , идет на создание дополнительного вращающего момента машины  $M_k$ .

В случае замедленной коммутации но при опрокинутом поле, и в случае ускоренной коммутации момент  $M_k$  — тормозной и составляющая  $P_{bd}$  положительна. Это означает, что часть движущего момента затрачивается на преодоление дополнительного тормозного момента  $M_k$ , доставляя в коммутационную зону электрическую мощность  $P_{bd}$ , расходуемую в виде дополнительных потерь в щеточном контакте.

4. В исходных уравнениях, служащих для вывода окончательных формул (4) и (5), сопротивление щеточных контактов между отдельными коллекторными пластинами и щетками учитывались в виде соответствующих падений напряжения, причем знание характера изменения этих сопротивлений и их природы не являлось для вывода необходимым. Поэтому полученные формулы (4) и (5) являются пригодными также и для случая сильного расстройством коммутации, когда коммутирование тока происходит через коммутационные дуги, образующиеся между щетками и коллектором.

5. Уравнение (5) позволяет найти зависимости переходного падения напряжения от скорости вращения и от тока якоря при перегрузках ( $E_t = 0$ ). Так как и реактивная, и коммутирующая э. д. с. пропорциональны скорости вращения, то первая из этих зависимостей  $U_b = f(n)$  — прямолинейная. Для определения второй зависимости  $U_b = f(I_a)$  надо построить сначала кривые  $E_r = f(I_a)$  и  $E_k = f(I_a)$ . Первая из них прямая (кривая 1, рис. 3), так как потоки рассеяния секции якоря, замыкаясь в основном через воздух, почти не зависят от насыщения и растут пропорцио-

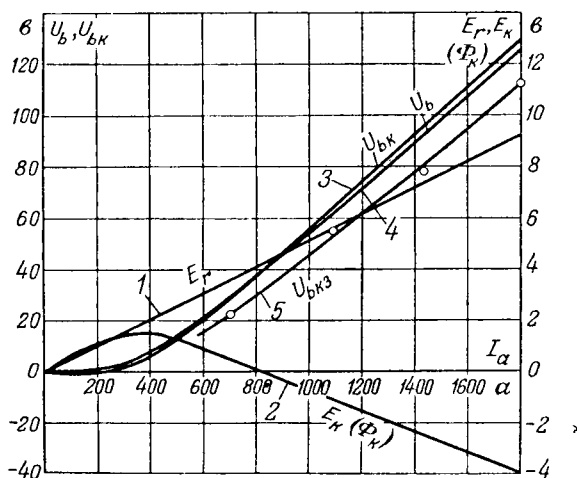


Рис. 3. Построение кривой переходного падения напряжения  $U_b = f(I_a)$  для режима длительной перегрузки машины GM-282 при  $n = 1000$  об/мин.

нально току  $I_a$ . Электродвижущая сила  $E_k$  пропорциональна коммутационному потоку  $\Phi_k$ , поэтому, если известна кривая  $\Phi_k = f(I_a)$ , то  $E_k = f(I_a)$  можно получить соответствующим пересчетом (кривая 2, рис. 3). Разность ординат кривых 1 и 2, умноженная на величину  $\frac{P}{a} k_p$ , дает составляющую переходного падения напряжения  $U_{bk}$ , вызванную расстройством коммутации (кривая 3, рис. 3). Прибавляя к ней величину  $2 \cdot U_{\beta 1}$ , получим искомую зависимость  $U_b = f(I_a)$  (кривая 4).

В переходных режимах действительные значения коммутационной э. д. с.  $E_k$  вследствие успокоительного действия вихревых токов на коммутационный поток могут не совпадать со значениями  $E_k$ , определяемыми кривой 2. Вследствие этого, а также по причине влияния трансформаторной э. д. с.  $E_t$  зависимость  $U_b = f(I_a)$  для переходных режимов будет несколько отличаться от кривой 4, построенной для длительных нагрузок.

6. При быстрых нарастаниях тока в цепи якоря коммутационное поле может оказаться весьма малым. Для этих случаев, пренебрегая э. д. с.  $E_t$  и напряжением  $2U_{\beta 1}$ , уравнения (4) и (5) можно написать в следующем виде:

$$P_b = P_{bo} = U_b I_a = \frac{P}{a} k_p E_r I_a \quad (4a)$$

и

$$U_b = \frac{P}{a} k_p E_r = \frac{P}{a} k_p \frac{I_a}{I_{an}} \frac{n}{n_n} E_{rn}. \quad (5a)$$

Эти уравнения могут служить для быстрого подсчета мощности  $P_b$ , выделяемой на коллекторе, и переходного падения напряжения  $U_b$  в случае всплеска больших токов в цепи якоря машины постоянного тока. Электродвижущая сила  $E_r$  при этом может быть определена по любому из урав-

нений (I,30) или (I,31), приведенных в приложении.

Согласно уравнению (5a) переходное сопротивление  $R'_b$  щеточных контактов, включая сопротивление коммутационных дуг, обусловленное нескомпенсированной реактивной э. д. с.

$$R'_b = \frac{U_b}{I_a} = \frac{P}{a} k_p \frac{E_r}{I_a} = \frac{P}{a} k_p \frac{E_{rn}}{I_{an}} \frac{n}{n_n}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что в случае отсутствия коммутационного поля переходное сопротивление  $R'_b$  изменяется пропорционально скорости вращения машины.

**Экспериментальное определение переходного падения напряжения  $U_b$ . Методика экспериментирования.** Как это видно из уравнения (1), опытное определение  $U_b$  возможно путем измерения вольтметром или осциллографически напряжений под сбегющими и набегающими краями щеток. Однако при больших токах в главной цепи машины возникает сильное искрение под сбегющими краями щеток, причем коммутационные дуги распространяются по коллектору на некоторое неопределенное расстояние. Поэтому указанный способ в этих случаях оказывается непригодным.

Для определения  $U_b$  при больших кратностях тока может быть применен косвенный метод, заключающийся в следующем.

Щетки испытуемой машины устанавливаются строго на нейтрали, якорь приводится во вращение вспомогательным двигателем с заданной скоростью вращения  $n_o$ , и через обмотку возбуждения от независимого источника тока пропускается небольшой ток, соответствующий некоторой пониженной э. д. с.  $E_o$ , индуцируемой в обмотке якоря полезным потоком  $\Phi_a$ . Затем цепь якоря замыкается накоротко и производится измерение тока якоря  $I_a$ , напряжения на щетках  $u_{\omega}$ , скорости вращения  $n$ , а также изменения полезного потока  $\Delta \Phi_a$ , вызванного действием реакции якоря. Поток  $\Delta \Phi_a$  измеряется флюксметром или путем осциллографирования с помощью вспомогательной катушки из одного или нескольких витков, помещаемой предварительно в машине, как показано на рис. 4 (катушка  $a-a$ ). По возможности стороны катушки следует расположить по границам коммутационных зон симметрично по отношению к главному полюсу. При расположении сторон на нейтрали (катушка  $b-b$ , рис. 4) поток  $\Delta \Phi_a$  будет определяться с некоторой погрешностью вследствие влияния продольного потока рассеяния коммутационных секций  $\Phi'_{as}$ , возникающего в коммутационной зоне под действием продольной н. с. коммутационных токов (рис. 4).

По данным, полученным на основании описанного опыта, вычисляется э. д. с.  $E$ , индуцируемая в обмотке якоря при коротком замыкании:

$$E = E_o \frac{n}{n_o} - \frac{p n}{60 a} \Delta \Phi_a, \quad (8)$$

затем находится искомое падение напряжения

$$U_b = E - u_{щ} - I_a R_a, \quad (9)$$

где  $R_a$  — сопротивление обмотки якоря, измеряемое непосредственно перед выполнением опыта.

Произведя опыты короткого замыкания при разных значениях тока  $I_a$  и скорости  $n$ , можно найти зависимости переходного падения напряжения от тока якоря и скорости вращения  $U_b = f(I_a, n)$ .

Описанный метод позволяет провести исследование влияния коммутающего потока  $\Phi_k$  и коммутающей э. д. с.  $e_k$  на переходное падение напряжения  $U_b$ . В этом случае измерения потока  $\Phi_k$  в воздушном зазоре по возможности ближе к якору необходимо поместить еще одну вспомогательную катушку, охватывающую башмак добавочного полюса. Поток  $\Phi_k$  можно изменять, пропуская через обмотку добавочных полюсов дополнительный ток подпитки.

Изложенный метод пригоден также для исследования падения напряжения  $U_b$  при переходных процессах, например при внезапном коротком замыкании машины постоянного тока. Для этого необходимо произвести осциллографирование исследуемого процесса, записывая при этом ток якоря  $I_a$ , скорость вращения  $n$ , напряжение на зажимах или щетках машины  $u$  или  $u_{щ}$ , э. д. с.  $e_a$ , индуктируемую во вспомогательной катушке потоком  $\Phi_a$ , и регистрируя время  $t$ . Из каждой осциллограммы для заданного момента времени  $t$  находятся значения  $I_a$ ,  $n$ ,  $u$  и приращение потока  $\Delta\Phi_a$ , определяемое по соответствующей площади кривой  $e_a = f(t)$ . Имея эти данные, искомое падение напряжения  $U_b$  можно вычислить по уравнениям (8) и (9), введя в уравнение (9) слагаемое, учитывающее э. д. с. самоиндукции обмотки якоря  $-L_a \frac{dI_a}{dt}$ . В некоторых случаях, например при внезапном коротком замыкании в момент всплеска тока  $I_a$ , когда эта э. д. с. равна нулю, не требуется вводить поправки в уравнение (9).

Необходимо сделать несколько замечаний, касающихся повышения точности проводимых экспериментов.

1. Рекомендуется опыт короткого замыкания производить возможно быстро, особенно при больших токах, во избежание чрезмерного нагрева обмотки якоря.

2. Для увеличения точности измерения потока  $\Delta\Phi_a$  флюксометром катушки обмотки возбуждения желательно соединить в несколько параллельных групп, а в цепь возбуждения ввести по возможности наибольшее сопротивление, что способствует ускорению процесса установления потоков в машине. Вспомогательные катушки, служащие для измерения потока  $\Delta\Phi_a$ , желательно поместить под всеми полюсами и соединить последовательно.

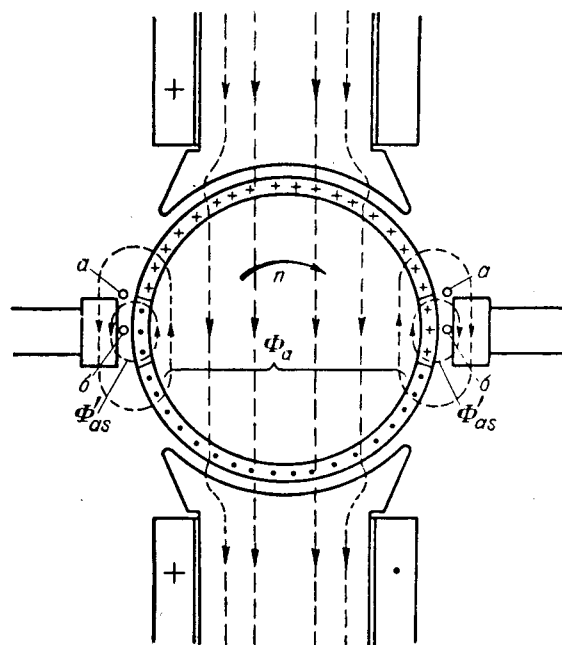


Рис. 4. Расположение вспомогательной катушки для измерения потока  $\Delta\Phi_a$ .

3. Измерение сопротивления обмотки якоря  $R_a$ , а также проверку положения щеток на нейтрали в случае больших токов  $I_a$  рекомендуется производить перед каждым опытом короткого замыкания.

4. При осциллографировании э. д. с.  $e_a$ , необходимой для определения потока  $\Delta\Phi_a$ , рекомендуется включить в цепь вспомогательной катушки надлежащим образом подобранный фильтр из индуктивности и емкости, не пропускающий в регистрирующий вибратор колебания коммутационной частоты, накладывающиеся на основную кривую  $e_a = f(t)$  и затрудняющие ее обработку.

**Результаты эксперимента:** В лаборатории электрических машин ЛПИ автор исследовал переходное падение напряжения  $U_b$  при внезапном коротком замыкании машины постоянного тока GM-282 118 кВт, 440 в, 300 а, 1000 об/мин. Осциллографирование производилось на выбеге машины при различном возбуждении и различной начальной скорости вращения. Одна из осциллограмм процесса короткого замыкания, дающая зависимости  $I_a$ ,  $i_f$ ,  $n$ ,  $u_{щ}$  и  $e_a = f(t)$ , представлена на рис. 5. В результате обработки ряда осциллограмм получены опытные кривые переходного падения напряжения для момента наибольшего всплеска тока в якоре  $U_b = f(n, I_{am})$ , представленные на рис. 6 и 7.

Рассматривая полученные кривые, можно сделать следующие выводы.

1. При внезапном коротком замыкании переходное падение напряжения  $U_b$  достигает значительной величины. Например, в случае короткого замыкания машины, работавшей до этого в режиме холостого хода при номинальном напряжении 440 в и номинальной скорости 1000 об/мин,

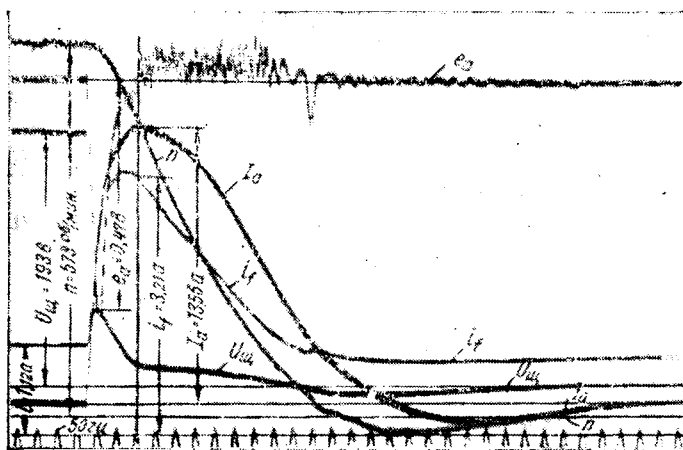


Рис. 5. Осциллограмма процесса внезапного короткого замыкания машины GM-282.

в момент всплеска тока напряжение  $U_b$  достигает 112 в. При этом нужно отметить, что полученные значения  $U_b$  еще несколько преуменьшены, так как при выполнении опытов вспомогательные катушки, служащие для определения потока  $\Delta\Phi_a$ , были расположены не по границам коммутационных зон, а на нейтрали. При дополнительном учете продольного потока  $\Phi_{as}$  в коммутационных зонах для вышеуказанного случая  $U_b = 132$  в.

2. Мощность  $P_b$ , выделяемая в переходном сопротивлении между щетками и коллектором, также оказывается весьма значительной. Для рассматриваемого случая максимальный ток короткого замыкания  $I_{am} = 1800$  а, следовательно, эта мощность в момент всплеска тока равна 200... 240 квт. Большая энергия, выделяемая при коротком замыкании на коллекторе, приводит к образованию между щетками и коллектором мощных коммутационных дуг. Дуги, стремясь распространиться по коллектору, способствуют образованию кругового огня. Оба эти явления — мощные коммутационные дуги и круговой огонь на коллекторе — наблюдались при опытах короткого замыкания; для защиты от кругового огня пришлось устанавливать специальные изолирующие барьеры на коллекторе.

3. Экспериментальные кривые рис. 6, дающие зависимость  $U_b = f(n)$  для разных случаев короткого замыкания при  $I_{am} \approx \text{пост}$ , близки к прямым линиям, нанесенным пунктиром, что соответствует ранее изложенным теоретическим соображениям. Некоторое отклонение кривых  $U_b = f(n)$  от прямой можно объяснить следующим образом.

С увеличением скорости вращения при коротком замыкании коммутация становится все более замедленной, а коммутационные дуги распространяются все дальше по коллектору. Вследствие смещения оси н. с. якоря ее поперечная составляющая, противодействующая н. с. добавочных полюсов, при одном и том же токе якоря уменьшается, а коммутирующий поток в коммутационной зоне несколько возрастает (что подтверж-

дается снятыми осциллограммами, здесь не приведенными). Это и способствует некоторому замедлению роста падения напряжения  $U_b$  с увеличением скорости вращения.

Экспериментальные кривые рис. 7, дающие зависимость  $U_b = f(I_{am})$  при  $n = \text{пост}$ , по своему характеру аналогичны расчетной кривой  $U_b = f(I_{am})$ , построенной для режима длительной перегрузки исследуемой машины (кривая 4, рис. 3). На рис. приведена кривая 5  $U_{b\text{кз}} = f(I_{am})$ , полученная в опытах внезапного короткого замыкания и соответствующая скорости вращения  $n = 1000$  об/мин. Сравнение кривых 4 и 5 показывает, что опытная кривая  $U_b = f(I_{am})$  легла несколько ниже расчетной кривой  $U_b = f(I_{am})$ . Это объясняется, во-первых, отмеченным ранее влиянием сдвига оси н. с. якоря при коротком замыкании и влиянием вихревых токов на поток  $\Phi_k$  и, во-вторых, погрешностью при определении величины  $\Delta\Phi_a$  из-за расположения вспомогательных катушек на нейтрали.

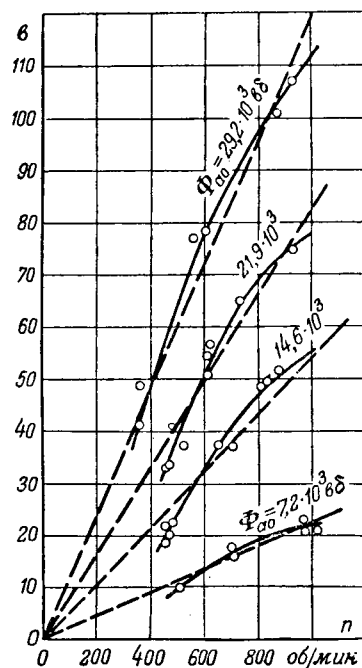


Рис. 6. Переходное падение напряжения  $U_b = f(n)$  при  $I_{am} \approx \text{пост}$  (опытные кривые).

Влияние трансформаторной э. д. с.  $e_t$  при коротком замыкании, особенно в момент всплеска тока якоря, оказывается небольшим. Это видно из осциллограммы рис. 5, на которой э. д. с.  $e_t$  одновременно является и трансформаторной э. д. с.  $e_t$ .

4. Согласно (5а) переходное падение напряжения для случая короткого замыкания при  $n = 1000$  об/мин и  $I_{am} = 1800$  а

$$U_b = \frac{p}{a} k_p \frac{I_a}{I_{an}} \frac{n}{n_n} E_{rn} = \frac{3}{1} 3,18 \cdot \frac{1800}{300} \cdot \frac{1000}{1000} \cdot 2,11 = 121 \text{ в}, \quad (56)$$

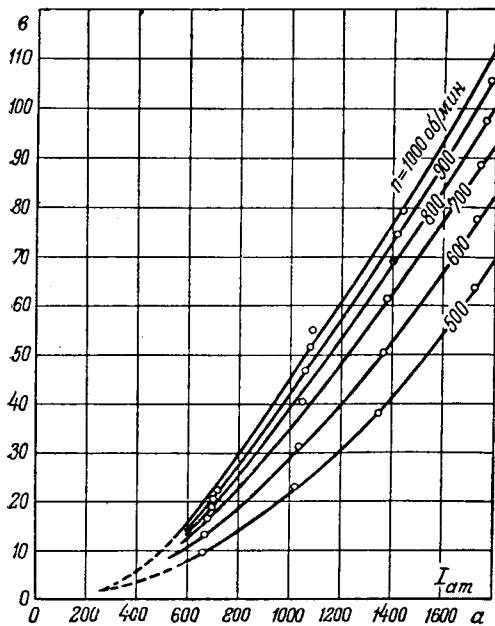


Рис. 7. Переходное падение напряжения  $U_b = f(I_a)$  при  $p = \text{const}$  (опытные кривые).

где средняя реактивная э. д. с.  $E_{rk}$  при номинальном токе  $I_{an} = 300$  а, вычисленная по правой части уравнения (I,31), равна 2,11 в, а коэффициент перекрытия с учетом расчетной ширины щетки для волновой обмотки  $k_p = 3,18$ .

При подстановке в (5а) реактивной э. д. с.  $E_{rk} = 1,55$  в, найденной посредством измерения коммутающего потока при прямолинейной коммутации (рис. 3), получается преуменьшенное значение падения напряжения  $U_b = 90$  в. Преувеличенное значение э. д. с.  $E_{rk}$  в первом случае компенсирует ошибку от неучтенного влияния опрокинутого коммутающего поля, и результат вычисления оказывается близким к опытному значению  $U_b = 112$  и  $132$  в (погрешность менее 10%). Таким образом, уравнение (5а) совместно с уравнением (I,30) или (I,31) можно рекомендовать для быстрой оценки падения напряжения  $U_b$  в момент всплеска тока при внезапном коротком замыкании машины постоянного тока.

**Общие выводы.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Переходное падение напряжения между щетками и коллектором может оказаться одним из существенных факторов, влияющих на работу машины при перегрузках и в переходных режимах. Особенно велика его роль при внезапных коротких замыканиях машины постоянного тока.

2. Энергия, выделяемая в переходном сопротивлении, при расстроенной коммутации может принимать весьма большие значения, приводя к образованию в случае больших кратностей тока мощных коммутационных дуг, переходящих в круговой огонь по коллектору. Чрезмерное возрастание переходных потерь на коллекторе и является одной из причин возникновения кругового огня в переходных режимах машин постоянного тока.

3. Предлагаемые способы теоретического определения переходного падения напряжения  $U_b$  и потерь на коллекторе  $P_b$  дают результаты, согласующиеся с данными экспериментального исследования, и могут быть рекомендованы для практических расчетов.

**Приложение.** Рассмотрим процесс коммутации секций простой петлевой обмотки. Для упрощения рассуждений примем число перекрытых щеткой коллекторных делений  $k_p = 3$  и число элементарных пазов в одном зубцовом делении  $u_s = 1$ . Для секций, замкнутых накоротко одной щеткой (или комплектом щеток одного пальца), можно написать следующие уравнения (рис. 8):

$$u_{\beta 2} - u_{\beta 1} = e'_{rk}, \quad (I,1a)$$

$$u_{\beta 3} - u_{\beta 2} = e''_{rk}, \quad (I,1b)$$

$$u_{\beta 4} - u_{\beta 3} = e'''_{rk}; \quad (I,1в)$$

$$i_2 = i' - i'', \quad (I,2a)$$

$$i_3 = i'' - i''', \quad (I,2б)$$

$$i_4 = i''' + i_a; \quad (I,2в)$$

$$I_b = i_1 + i_2 + i_3 + i_4; \quad (I,3)$$

$$I_a = p I_b = 2a i_a. \quad (I,4)$$

В этих уравнениях:  $u_{\beta(i)}$  — падение напряжения между щеткой и соответствующей коллекторной пластиной;  $i_{(i)}$  — ток, проходящий через соответствующую коллекторную пластину;  $e_{rk}^{(i)}$  — результирующая э. д. с. в короткозамкнутой секции.

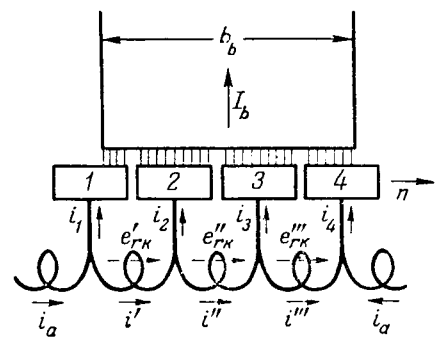


Рис. 8. Токи и э. д. с. в коммутируемых секциях.

Пренебрегая пульсационной и трансформаторной э. д. с., результирующую э. д. с. можно принять равной сумме реактивной и коммутающей э. д. с.:

$$e_{rk} = e_r + e_k = -L_r \frac{di}{dt} + e_k,$$

где  $L_r$  — результирующая индуктивность, учитывающая взаимную индукцию от одновременно замкнутых секций одного и того же паза;  $i^{(i)}$  — ток в соответствующей коммутируемой секции;  $i_a$  — ток в параллельной ветви обмотки якоря;  $I_b$  — ток, протекающий через щетки одного пальца.

Умножая уравнение (I,1a) на ток  $i_2$ , а (I,1в) на ток  $i_4$ , получим:

$$u_{\beta 2} i_2 - u_{\beta 1} (i_2 + i_1 - i_1) = e'_{rk} (i' - i'') \quad (I,5a)$$

и

$$u_{\beta 4} i_4 - u_{\beta 3} (i_4 + i_3 - i_3) = e'''_{rk} (i''' + i_a). \quad (I,5б)$$

Из уравнений (I,5) определим мгновенное значение потерь  $p_{b1}$  в щеточном контакте:

$$p_{b1} = u_{\beta 1} i_1 + u_{\beta 2} i_2 + u_{\beta 3} i_3 + u_{\beta 4} i_4 = e'_{rk} (i' - i'') + e'''_{rk} (i''' + i_a) + u_{\beta 1} (i_1 + i_2) + u_{\beta 3} (i_3 + i_4). \quad (I,6)$$

Из (I,1a) и (I,16) находим:

$$u_{\beta 3} = u_{\beta 2} + e''_{rk} = u_{\beta 1} + e'_{rk} + e''_{rk}, \quad (I,7)$$

а из (I,2)

$$i_3 + i_4 = i'' + i_a. \quad (I,8)$$

Подставляя полученное значение  $u_{\beta 3}$  в уравнение (I,6) и учтя (I,8), получим:

$$p_{b1} = e'_{rk} i' + e''_{rk} i'' + e'''_{rk} i''' + e'_{rk} i_a + e''_{rk} i_a + e'''_{rk} i_a + u_{\beta 1} (i_1 + i_2 + i_3 + i_4) \quad (I,9)$$

или

$$p_{b1} = \Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} + i_a \Sigma e^{(i)}_{rk} + u_{\beta 1} I_b, \quad (I,9a)$$

где сумма распространяется на число одновременно замкнутых щеткой секций.

Из (I,1) находим:

$$u_{\beta 1} = u_{\beta 4} - (e'_{rk} + e''_{rk} + e'''_{rk}). \quad (I,10)$$

Подставляя это значение  $u_{\beta 1}$  в уравнение (I,9a), после преобразований получим:

$$p_{b1} = \Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} - i_a \Sigma e^{(i)}_{rk} + u_{\beta 4} I_b. \quad (I,11)$$

Суммируя правые и левые части (I,9a) и (I,11), найдем мгновенное значение потерь под щетками пары разноименных щеточных болтов:

$$p_{b\pm} = 2p_{b1} = 2\Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} + (u_{\beta 1} + u_{\beta 4}) I_b. \quad (I,12)$$

При числе щеточных болтов, равном числу полюсов, полные потери под всеми щетками обеих полярностей

$$p_b = 2p\Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} + (u_{\beta 1} + u_{\beta 4}) I_a. \quad (I,12a)$$

Согласно уравнению (I)

$$u_b = u_{\beta 1} + u_{\beta 4},$$

поэтому (I,12a) можно написать в следующем виде:

$$p_b = 2p\Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} + u_b I_a = p_{bd} + p_{bo}. \quad (I,13)$$

Отсюда следует, что потери в щеточном контакте состоят из двух слагаемых: основной составляющей потерь  $p_{bo}$ , возникающих при прохождении тока якоря  $I_a$  через переходное сопротивление щеточного контакта, и добавочной (коммутационной) составляющей потерь  $p_{bd}$ , вызываемых наличием в коммутируемых секциях нескомпенсированной э. д. с.  $e_{rk}$ . Переходное падение напряжения при этом не зависит от составляющей  $p_{bd}$ , а непосредственно определяется потерями  $p_{bo}$  по уравнению:

$$u_b = \frac{p_{bo}}{i_a}. \quad (I,14)$$

Для расчетных целей наибольший интерес представляют не мгновенные значения переходного падения напряжения и потерь на коллекторе, а средние. Для их вычисления найдем величину энергии  $W_b$ , выделяемой в виде потерь под щетками при повороте якоря на одно зубцовое деление. Для этого проинтегрируем уравнение (I,13)

$$W_b = \int_0^{t_\beta} p_b dt = 2p \int_0^{t_\beta} \Sigma e^{(i)}_{rk} i^{(i)} dt + \int_0^{t_\beta} u_b I_a dt. \quad (I,15)$$

Здесь интервал времени  $t_\beta$ , соответствующий повороту якоря на одно коллекторное деление (при  $u_s = 1$  и на зубцовое)

$$t_\beta = \frac{60}{kn}. \quad (I,16)$$

Подставляя в (I,15) значение э. д. с.  $e_{rk}$ , из выражения для  $e_{rk}$ , получим:

$$\begin{aligned} W_b &= 2p\Sigma \int_0^{t_\beta} e_r^{(i)} i^{(i)} dt + 2p\Sigma \int_0^{t_\beta} e_k i dt + \int_0^{t_\beta} u_b I_a dt = \\ &= 2p \int_{-i_a}^{+i_a} L_r i di + 2p \int_0^{T_k} e_k i dt + I_a \int_0^{t_\beta} u_b dt = \\ &= 0 + 2p \int_0^{T_k} e_k i dt + I_a U_b t_\beta, \end{aligned} \quad (I,15a)$$

где период коммутации

$$T_k = t_\beta k_\beta; \quad (I,17)$$

среднее значение переходного падения напряжения

$$U_b = \frac{1}{t_\beta} \int_0^{t_\beta} u_b dt. \quad (I,18)$$

Среднее значение переходных потерь под щетками обеих полярностей

$$P_b = \frac{W}{t_\beta} = \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} e_k i dt + I_a U_b = P_{bd} + P_{bo}. \quad (I,19)$$

Потери  $P_{bd}$  можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{bd} &= \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} e_k i dt = \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} 2B_k I_a v_a i dt = \\ &= \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} 2f_1 \frac{D_a}{2} \omega dt = \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} \omega M_{k1} dt = \omega M_k, \end{aligned} \quad (I,20)$$

где  $f_1$  и  $M_{k1}$  — сила и вращающий момент, действующие на одну коммутируемую секцию;  $M_k$  — добавочный вращающий момент, возникающий в коммутационных зонах вследствие взаимодействия добавочных коммутационных токов с коммутирующим потоком; остальные обозначения общезвестны.

В том случае, когда коммутирующая э. д. с. за время коммутации не изменяется ( $e_k = E_k = \text{const}$ ), потери

$$\begin{aligned} P_{bd} &= \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} E_k i dt = \frac{2pk_\beta}{T_k} E_k \int_0^{T_k} i_g dt + \\ &+ \frac{2pk_\beta}{T_k} E_k \int_0^{T_k} i_f dt = 0 + p F_{kM} E_k, \end{aligned} \quad (I,20a)$$

где  $i_g$  и  $i_f$  — токи прямолинейной коммутации и добавочных;  $F_{kM}$  — н. с. коммутационной реакции на пару полюсов.

Среднее значение потерь под щетками обеих полярностей можно получить также путем интегрирования уравнения (1,9а):

$$P_b = \frac{2p}{t_\beta} \int_0^{t_\beta} p_{b1} dt = \frac{2p}{t_\beta} \int_0^{t_\beta} \Sigma e_{rk}^{(i)} i^{(i)} dt + \frac{2p}{t_\beta} \int_0^{t_\beta} i_a \Sigma e_{rk}^{(i)} dt + \frac{2p}{t_\beta} \int_0^{t_\beta} u_{\beta 1} I_b dt. \quad (1,21)$$

Первый интеграл правой части (1,21) был уже вычислен. Найдем второй интеграл:

$$\int_0^{t_\beta} i_a \Sigma e_{rk}^{(i)} dt = i_a \int_0^{T_k} e_{rk} dt = i_a (E_r + E_k) T_k = i_a (E_r + E_k) k_\beta t_\beta, \quad (1,22)$$

где  $E_r$  и  $E_k$  — средние за период коммутации значения реактивной и коммутирующей э. д. с.

После вычисления интегралов и подстановки токов  $i_a$  и  $I_b$  в соответствии с уравнением (1,4) получим следующее выражение для потерь:

$$P_b = \frac{2pk_\beta}{T_k} \int_0^{T_k} e_k i dt + \frac{p}{a} k_\beta (E_r + E_k) I_a + 2U_{\beta 1} I_a = P_{bd} + P_{bo}, \quad (1,23)$$

где  $U_{\beta 1}$  — среднее значение падения напряжения между щеткой и набегающей коллекторной пластиной.

Из уравнений (1,19) и (1,23) следует, что основные потери в щеточном контакте:

$$P_{bo} = U_b I_a = \frac{p}{a} k_\beta (E_r + E_k) I_a + 2U_{\beta 1} I_a. \quad (1,24)$$

Отсюда получаем следующую формулу для расчета переходного падения напряжения:

$$U_b = \frac{p}{a} k_\beta (E_r + E_k) + 2U_{\beta 1}. \quad (1,25)$$

Изложенный вывод был сделан для случая простой петлевой обмотки при  $k_\beta = 3$  и  $u_s = 1$ . Нетрудно показать, что формулы (1,19) ..., (1,25) справедливы также для любых значений  $k_\beta$  и  $u_s$ , и для других типов обмоток (множественной петлевой и волновой). В случае волновой или множественной петлевой обмотки вычисление коэффициента  $k_\beta$  необходимо производить с учетом расчетной ширины щетки

$$b_{bi} = b_b - \gamma + \left(1 - \frac{a}{p}\right) \beta_k, \quad (1,26)$$

где  $b_b$  — ширина щетки,  $\beta_k$  — коллекторное деление и  $\gamma$  — толщина изоляции между пластинами. При учете также и трансформаторной э. д. с. в формулах (1,24) и (1,25),

кроме э. д. с.  $E_r$  и  $E_k$ , войдет с соответствующим знаком средняя за период коммутации э. д. с.

$$E_t = -\frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} \frac{d\Phi_a}{dt} dt = -\frac{\Delta T \Phi_a}{T_k},$$

где  $\Delta T \Phi_a$  — приращение потока  $\Phi_a$  за период коммутации.

При учете знака э. д. с.  $E_t$  нужно иметь в виду, что в случае генератора при возрастании потока  $\Phi_a$  э. д. с.  $E_t$  действует согласно с э. д. с.  $E_r$ , а при уменьшении потока  $\Phi_a$  — встречно, в случае двигателя — наоборот.

С помощью уравнения (1,23) можно определить потери, выделяемые в щеточном контакте при каждом коммутировании тока в одной секции, когда нет коммутирующего поля ( $e_k = 0$ ). Пренебрегая  $U_{\beta 1}$ , получим:

$$W_{b1} = \frac{P_b t_\beta}{2p} = \frac{p_b}{a 2p} k_\beta E_r I_a t_\beta = 4 \frac{L_r i_a^2}{2} = 4 W_{ms1}, \quad (1,28)$$

где средняя реактивная э. д. с.

$$E_r = \frac{L_r I_a}{a T_k}. \quad (1,29)$$

Электродвижущая сила  $E_r$  может быть вычислена по общеизвестной формуле [Л. 2]:

$$E_r = 2w_s v_a l_a S\%. \quad (1,30)$$

Однако во многих практических случаях вычисление э. д. с.  $E_r$  удобнее произвести по следующей формуле, выведенной из условия равенства  $E_r = E_k$  при номинальном режиме работы:

$$E_r = 2w_s v_a l_w B_k = \mu_0 w_s v_a l_w \frac{F_w + F_k - F_a}{k_{\delta w} \delta_w}, \quad (1,31)$$

где  $w_s$ ,  $v_a$ ,  $l_w$ ,  $B_k$  — число витков в секции, окружная скорость якоря, длина добавочного полюса, индукция в коммутационной зоне;  $F_w$ ,  $F_k$  и  $F_a$  — н. с. добавочных полюсов, компенсационной обмотки и обмотки якоря на пару полюсов;  $k_{\delta w}$  и  $\delta_w$  — коэффициент зазора и воздушный зазор под добавочными полюсами.

Расчет э. д. с.  $E_t$  по уравнению (1,31) по значениям н. с.  $F_w$ ,  $F_k$  и  $F_a$  может дать несколько преувеличенный результат, так как при этом не учитывается н. с., идущая на проведение потока  $\Phi_k$  через участки магнитной цепи, состоящие из стали. Если опытным путем найти значения потока  $\Phi_k$  и индукции  $B_k$  при прямолинейной коммутации, то по уравнению (1,31) э. д. с.  $E_r$  можно определить с большой точностью.

## Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.
2. С. Б. Юдицкий. Коммутация машин постоянно-го тока. Госэнергоиздат, 1941.
3. Н. П. Ермолин. Переходные процессы в машинах постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.
4. Э. Арнольд, И. Ла-Кур. Машины постоянного тока. Т. 1. ГИИ, стр. 227, 1931.
5. T. Linville. Current and Torque of D. C. Machines on Short circuit. Trans. AIEE. стр. 957, 1946.

[26. 5. 1952]





# Влияние неравномерности воздушного зазора на дифференциальное рассеяние асинхронной машины

Кандидат техн. наук, доц. А. И. ВОЛЬДЕК

Таллинский политехнический институт

## Постановка вопроса.

При нормальном рабочем режиме асинхронной машины практически все высшие гармоники магнитных полей статора и ротора целиком создают потоки рассеяния, что и учитывается при расчете так называемых индуктивностей дифференциального рассеяния. Лишь в случае машин с короткозамкнутым ротором следует рассматривать некоторое заглушение высших гармоник поля статора.

В асинхронных машинах вследствие относительно малой величины воздушного зазора индуктивности дифференциального рассеяния сравнительно велики и составляют до 25...40% от полных индуктивностей рассеяния машины. Отсюда вытекает необходимость достаточно точного расчета индуктивностей дифференциального рассеяния.

Вопрос о расчете индуктивностей дифференциального рассеяния в предположении равномерности воздушного зазора (бесконечно малые открытия пазов) в настоящее время разработан достаточно полно. При этом определяется так называемый коэффициент дифференциального рассеяния:

$$\tau_{\partial} = \frac{x_2 - x_1}{x_1}, \quad (1)$$

где  $x_2$  — индуктивное сопротивление, обусловленное всеми гармониками (с учетом взаимной индукции от других фаз), а  $x_1$  — сопротивление от основной гармоники поля в воздушном зазоре. Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния

$$x_{\partial} = \tau_{\partial} x_1. \quad (2)$$

Формулы для  $\tau_{\partial}$ , выведенные для различных типов обмоток в предположении равномерности воздушного зазора, приведены в ряде литературных источников [Л. 1, 2].

Фактически воздушный зазор никогда не является равномерным и это обстоятельство часто учитывается, как, например, рекомендует Р. Рихтер [Л. 2], тем, что в формуле (2) используется значение  $\tau_{\partial}$ , рассчитанное для равномер-

*Анализируется дифференциальное рассеяние асинхронной машины при зубчатости статора и ротора. Показывается, что сопротивление дифференциального рассеяния при неравномерном зазоре может быть вычислено с введением поправки к коэффициенту дифференциального рассеяния, определенного для случая равномерного зазора. Предлагаются формула и кривые для вычисления поправки.*

ного зазора, значение  $x_1$  рассчитывается для „приведенного“ воздушного зазора  $\delta' = k_{\delta} \delta$ , где  $k_{\delta}$  — коэффициент воздушного зазора (коэффициент

Картера) и  $\delta$  — фактиче-

ская ширина воздушного зазора. Подобный прием равносильен предположению, что под воздействием зубчатости все гармоники уменьшаются в одинаковой мере в отношении  $k_{\delta}$ . Такое предположение в действительности неверно, и поэтому при подобном методе расчета значения  $x_{\partial}$  получаются часто значительно преувеличенными. Это затруднение обычно обходят тем, что в формулы для расчета индуктивностей дифференциального рассеяния вводят различные поправки эмпирического характера, либо вовсе отказываются от этих формул и возвращаются к введенным в обиход около полстолетия назад формулам для так называемого „рассеяния по коронкам зубцов“ или „рассеяния зигзагом“, используя при этом также различные эмпирические коэффициенты. Однако эмпирические коэффициенты весьма ненадежны, так как невозможно определить экспериментальным путем индуктивности дифференциального рассеяния отдельно от других индуктивностей, что же касается теории рассеяния по коронкам зубцов, то она лишь весьма грубо охватывает рассматриваемое явление. Незавершенность теории дифференциального рассеяния с учетом неравномерности воздушного зазора является одной из причин того, что к надежности расчетов индуктивностей рассеяния на практике относятся скептически.

Цель настоящей работы — разработать достаточно обоснованный и практически приемлемый метод расчета индуктивности дифференциального рассеяния с учетом неравномерности воздушного зазора путем введения поправки к коэффициенту дифференциального рассеяния, рассчитанного в предположении о равномерном воздушном зазоре.

В соответствии с выражениями (1) и (2) сопротивление дифференциального рассеяния

$$x_{\partial} = x_2 - x_1, \quad (3)$$

и поэтому необходимо установить влияние неравномерности воздушного зазора на сопротивление  $x_2$  и  $x_1$ .

**Случай односторонней зубчатости.** Рассмотрим обмотку с целым числом пазов на полюс и фазу  $q$ , уложенную в пазы статора с открытием  $s$ , в предположении, что ротор не имеет зубцов (бесконечно малое открытие паза). Примем, что магнитная проницаемость стали  $\mu = \infty$ . Двухслойную обмотку с сокращенным шагом всегда можно представить состоящей из двух обмоток с диаметральной шагом, сдвинутых друг относительно друга на величину сокращения шага. Поэтому при  $\mu = \infty$  поле обмотки можно получить наложением полей диаметральных катушек, вследствие чего достаточно произвести анализ поля одной катушки с диаметральной шагом.

На рис. 1,б сплошной кривой 1 показан характер распределения магнитной индукции на поверхности ротора при возбуждении током одной диаметральной катушки. Ширина зазора  $\delta$  обычно мала по сравнению с шириной зуба  $t-s$ , поэтому на протяжении некоторой части зуба индукция практически постоянна и равна значению  $B_m$ , которое имело бы место и при равномерном зазоре шириной  $\delta$ .

Обычно обмотка отделена от воздушного зазора клином, а когда клин отсутствует, то открытие паза мало по сравнению с его глубиной. Поэтому с большой точностью можно считать, что все магнитные линии, пронизывающие воздушный зазор, проникают в зуб ниже обмотки и сцепляются со всеми ее витками, причем точкой раздела между линиями, сцепляющимися и не сцепляющимися с данной катушкой, является точка на поверхности ротора напротив центра открытия паза. Таким образом, при расчете потокосцеплений сечение катушки можно считать сосредоточенным в точке в центре открытия паза на уровне воздушного зазора.

Если допустить, что поле под половинками пазов, занятых током, имеет такую же форму, как и под половинками пазов, не занятых током, как изображено на рис. 1,б пунктиром (кривая 2), то зубчатая кривая поля может быть заменена равновеликой по площади прямоугольной волной (кривая 3, рис. 1,б) с индукцией  $B_c$ , причем  $B_c = B_m: k_\delta$ . Форма поля согласно кривой 3 рис. 1,б имела бы место при равномерном зазоре шириной  $\delta' = k_\delta \delta$ , если поле под проводником с током изменялось бы скачком.

Как нетрудно видеть, поля согласно кривым 2 и 3 рис. 1,б создают одинаковые потокосцепления как с рассматриваемой катушкой с током, так и со всякой другой катушкой, сдвинутой относительно первой. Поэтому в случае поля согласно кривой 2 общее потокосцепление с обмоткой и полное индуктивное сопротивление  $x_2$  были бы такими же, как и при равномерном зазоре шириной  $\delta' = k_\delta \delta$ . Фактически же поле под половинками пазов, занятых током, слабее, чем под половинками пазов, свободных от тока, вследствие чего сопротивление  $x$  уменьшается на не-

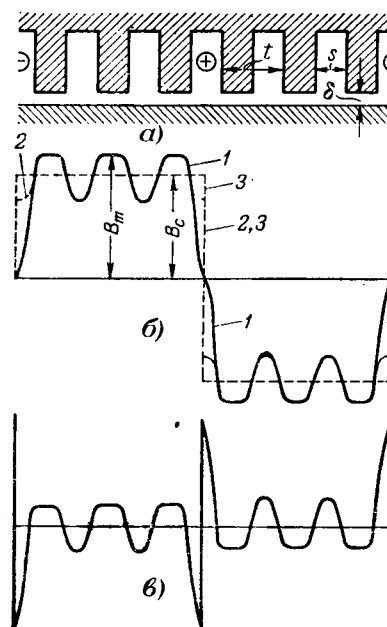


Рис. 1.

которую величину  $\Delta x_2$ , что и является одной из причин уменьшения дифференциального рассеяния при неравномерном зазоре.

Разность между кривой 1 и кривой 3 рис. 1,б изображена отдельно на рис. 1,в. Кривая рис. 1,в наряду с прочими гармониками содержит также основную гармонику с периодом  $2\pi$ , которая складывается арифметически с основной гармоникой кривой 3 рис. 1,б. Поэтому основная гармоника кривой 1 рис. 1,б больше основной гармоники кривой 3 того же рисунка. Если отношение амплитуд этих гармоник равно  $\xi_1$ , то в таком же отношении увеличится основная гармоника поля всей обмотки и сопротивление ее основной гармоники будет больше, чем соответствующее сопротивление  $x_1$  в случае равномерного зазора шириной  $\delta' = k_\delta \delta$ . Увеличение сопротивления  $x_1$  до значения  $\xi_1 x_1$  является второй причиной уменьшения индуктивности дифференциального рассеяния при неравномерном зазоре. Хотя коэффициент  $\xi_1$  весьма незначительно превышает единицу и с этим обстоятельством можно не считаться при всех прочих расчетах, оно оказывает заметное влияние на дифференциальное рассеяние, так как сама разность (3) — малая величина.

В соответствии со сказанным при односторонней зубчатости вместо выражения (3) можно написать:

$$x_\partial = x_2 - \Delta x_2 - \xi_1 x_1.$$

Отнеся  $x_\partial$  к  $x_1$ , вычисляемому для равномерного зазора шириной  $\delta' = k_\delta \delta$ , получим:

$$\tau'_\partial = \frac{x_\partial}{x_1} = \tau_\partial - \Delta \tau_\partial, \quad (4)$$

где

$$\tau_\partial = \frac{x_2 - x_1}{x_1}$$

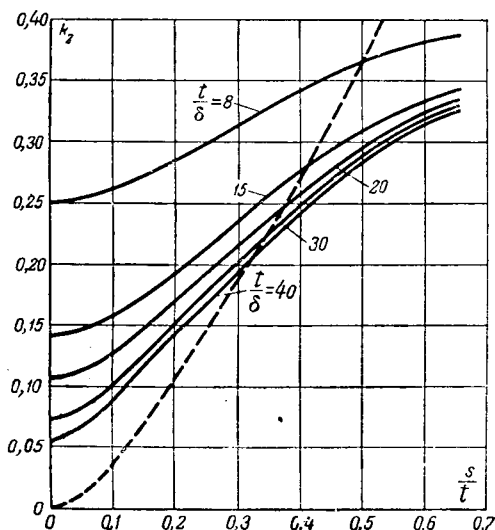


Рис. 2.

— коэффициент дифференциального рассеяния при равномерном зазоре и

$$\Delta\tau_\partial = (\xi_1 - 1) + \frac{\Delta x_2}{x_1} \quad (5)$$

— поправка к этому коэффициенту, учитывающая неравномерность зазора.

Как показано в приложении, поправка  $\Delta\tau_\partial$  в случае фазных обмоток с целым  $q$  и в случае беличьей клетки может быть вычислена по формуле

$$\Delta\tau_\partial \approx k_z \frac{1}{m^2 q^2} = k_z \left( \frac{2p}{Z} \right)^2, \quad (6)$$

где  $m$  — число фаз;

$p$  — число пар полюсов;

$Z$  — число пазов;

$k_z$  дают кривые рис. 2, их можно также вычислить по приближенной формуле:

$$k_z \approx 1,8 \frac{\delta}{t} + 0,313 \frac{s}{t} \lg \frac{t}{\delta}, \quad (7)$$

подобранной на основании указанных кривых.

**Случай двусторонней зубчатости.** Когда открытия пазов статора и ротора одновременно не равны нулю, изменение магнитной индукции  $B$  вдоль окружности при воздействии намагничивающей силы  $F$  дается [Л. 3] зависимостью

$$B = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} \lambda_{\delta c} F, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха, а  $\lambda_{\delta c}$  при  $\mu = \infty$  — коэффициент пропорциональности, зависящий только от положения ротора по отношению к статору и может быть назван относительной магнитной проводимостью воздушного зазора.

Согласно [Л. 3] проводимость

$$\lambda_{\delta c} = 1 + k_{\delta 1} \sum_{i=1, 2, 3} (-1)^{i+1} \lambda_i \cos i Z_1 \alpha + + k_{\delta 2} \sum_{j=1, 2, 3} (-1)^{j+1} \lambda_j \cos j Z_2 (\alpha - \omega_2 t) +$$

$$+ \frac{1}{2} k_\delta \sum_i \sum_j (-1)^{i+j} \lambda_i \lambda_j \times$$

$$\times \{ \cos [(j Z_2 - i Z_1) \alpha - j Z_2 \omega_2 t] + + \cos [(j Z_2 + i Z_1) \alpha - j Z_2 \omega_2 t] \}; \quad (9)$$

здесь  $\alpha$  — геометрический угол вдоль окружности зазора, отсчитываемой от оси фазы статора;

$Z_1$  — число пазов статора;

$Z_2$  — число пазов ротора;

$\omega_2$  — механическая угловая скорость ротора;

$t$  — время;

$\lambda_i$  и  $\lambda_j$  — коэффициенты магнитной проводимости соответственно ротора и статора, меньшие единицы и убывающие с возрастанием порядковых чисел  $i$  и  $j$ .

Общий коэффициент воздушного зазора  $k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$  представляется в виде произведения частных коэффициентов воздушного статора  $k_{\delta 1}$  и ротора  $k_{\delta 2}$ , каждый из них вычислен в предположении, что противоположная сторона машины имеет бесконечно малое открытие паза.

Рассмотрим магнитное поле, создаваемое намагничивающей силой обмотки статора  $F$  при симметричной нагрузке:

$$F = \sum_\nu F_\nu \cos(\omega t \mp p\nu\alpha), \quad (10)$$

где  $F_\nu$  — амплитуда гармоники порядка  $\nu$ .

При вычислении согласно выражению (8) произведений (9) и (10) и разложении произведений косинусов на сумму косинусов получим различные группы гармонических полей. При этом нетрудно заметить [Л. 3], что из всех групп полей э. д. с. основной частоты в обмотке статора будут индуцировать лишь группы, соответствующие в выражении (9) первому члену (единице) и первой одинарной сумме. Остальные группы гармоник поля будут индуцировать э. д. с. других частот и не могут быть учтены в виде слагающих дифференциального рассеяния.

Следовательно, могут быть учтены лишь поля, соответствующие проводимости

$$\lambda'_{\delta c} = 1 + k_{\delta 1} \sum_i (-1)^{i+1} \lambda_i \cos i Z_1 \alpha.$$

Но такова же полная проводимость воздушного зазора в случае, когда открытие пазов ротора бесконечно мало и поэтому  $\lambda_j = 0$ . Формы учитываемых полей в обоих случаях поэтому одинаковы и одинаковы поправки  $\Delta\tau_\partial$ . Разница заключается лишь в том, что в первом случае в выражение (8) входит  $k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$ , а во втором  $k_\delta = k_{\delta 1}$ , так как в этом втором случае  $k_{\delta 2} = 1$ .

Из сказанного можно сделать вывод, что поправка  $\Delta\tau_\partial$  к коэффициенту дифференциального рассеяния определяется одинаковым образом как в случае односторонней, так и в случае двусторонней зубчатости, следует лишь учесть геомет-

рию рассматриваемой стороны зазора, но при вычислении сопротивления дифференциального рассеяния

$$x_0 = (\tau_0 - \Delta\tau_0) x_1 \quad (11)$$

необходимо использовать значение  $x_1$ , вычисленное с учетом полного коэффициента воздушного зазора  $k_0 = k_{01} k_{02}$ .

Заметим здесь, что в известной автору литературе вопрос о влиянии неравномерности зазора на дифференциальное рассеяние более или менее тщательно рассматривался лишь Олджером и Уэстом [Л. 6] для обмотки в виде белличей клетки. Авторы не учитывали особого характера поля под пазом, занятым током, и принимали, что провал поля под пазом имеет форму треугольника, прямоугольника, трапеции и т. д., вычисляли затем для каждого случая  $\tau_0$  и по ряду сильно расходящихся кривых построили некоторую среднюю. Значения коэффициента  $k_z$ , вытекающее из данных названных авторов, изображены для случая  $\frac{t}{\delta} = 30$  на рис. 2 пунктиром.

Можно полагать, что работа Олджера и Уэста дает весьма приближенное решение задачи, так как рассматриваемые ими формы кривых поля весьма далеки от истинных и особый характер поля под пазом, занятым током, не учитывается. Именно благодаря последнему обстоятельству кривая Олджера и Уэста на рис. 2 начинается не с нуля, хотя в действительности и при  $s=0$  поле под пазом, занятым током, имеет не прямоугольную форму, а характер кривой 2 рис. 4 (см. ниже).

**Дифференциальное рассеяние нулевой последовательности.** Для синхронных, а отчасти и для асинхронных машин интерес представляет сопротивление дифференциального рассеяния нулевой последовательности  $x_{00}$ . Ниже выводится выражение для расчета  $x_{00}$  асинхронной машины.

При обтекании трехфазной обмотки токами нулевой последовательности в воздушном зазоре существуют лишь поля, обусловленные нечетными, кратными трем гармониками намагничивающей силы. Индуктивное сопротивление от кратной трем гармоники порядка  $\nu$  при равномерном зазоре шириной  $\delta' = k_0 \delta$  получим из приведенного в приложении выражения для  $x_1$ , если разделить последнее на  $\nu^2$ , умножить на 2 и заменить обмоточный коэффициент основной гармоники  $k_{w1}$  на коэффициент  $\nu$ -той гармоники  $k_{w\nu}$ . Необходимость умножения на 2 объясняется тем, что в выражении для намагничивающей силы третьих гармоник вместо множителя  $3/2$  появляется множитель 3, так как намагничивающие силы третьих гармоник трех фаз складываются арифметически. Суммы индуктивных сопротивлений всех кратных трем гармоник дает сопротивление дифференциального рассеяния нулевой последовательности:

$$x_{00} = \sum_{\nu=3, 9, 15} \omega \frac{\mu_0}{\pi} \frac{2mDl}{k_0 \delta} \frac{\omega^2 k_{w\nu}^2}{\nu^2 p^2} \quad (12)$$

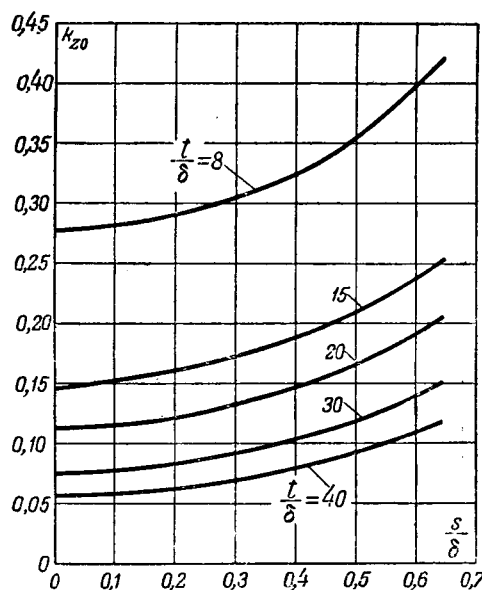


Рис. 3.

Отнеся  $x_{00}$  к  $x_1$ , получим коэффициент дифференциального рассеяния нулевой последовательности

$$\tau_{00} = \frac{x_{00}}{x_1} = \frac{2}{k_{w1}^2} \sum_{\nu=3, 9, 15, \dots} \frac{k_{w\nu}^2}{\nu^2}, \quad (13)$$

и при известном  $\tau_{00}$  сопротивление  $x_{00}$  определяется выражением

$$x_{00} = \tau_{00} x_1. \quad (14)$$

Переходя к учету неравномерности зазора, заметим прежде всего, что согласно (12)  $x_{00}$  не зависит от  $x_1$ . Поэтому уменьшение основной гармоники поля под влиянием зубчатости не оказывает влияния на величину  $x_{00}$ , вследствие чего поправка вида  $\xi_1 - 1$  к коэффициенту  $\tau_{00}$  отпадает. Остается, таким образом, учесть поправку

$$\Delta\tau_{00} = \frac{\Delta x_{00}}{x_1},$$

обусловленную уменьшением  $x_{00}$  на  $\Delta x_{00}$ . в результате более сильного ослабления поля под пазами, занятыми током, по сравнению с пазами, свободными от тока.

Как показано в приложении, поправка  $\Delta\tau_{00}$  может быть вычислена по формуле:

$$\Delta\tau_{00} = \frac{4q - 4k k_{z0}}{4q - k m^2 q^2}, \quad (15)$$

причем значения  $k_{z0}$  приводятся на рис. 3, а  $k$  — сокращение шага обмотки в зубцовых делениях ( $0 \leq k \leq q$ ).

Соответственно, при неравномерном зазоре

$$x_{00} = (\tau_{00} - \Delta\tau_{00}) x_1. \quad (16)$$

**Приложение. Вычисление поправок  $\Delta\tau_0$ . Фазная обмотка.** Формы кривых поля под пазами могут быть рассчитаны методом конформных отображений, исходя из теории скалярного магнитного потенциала и предположения

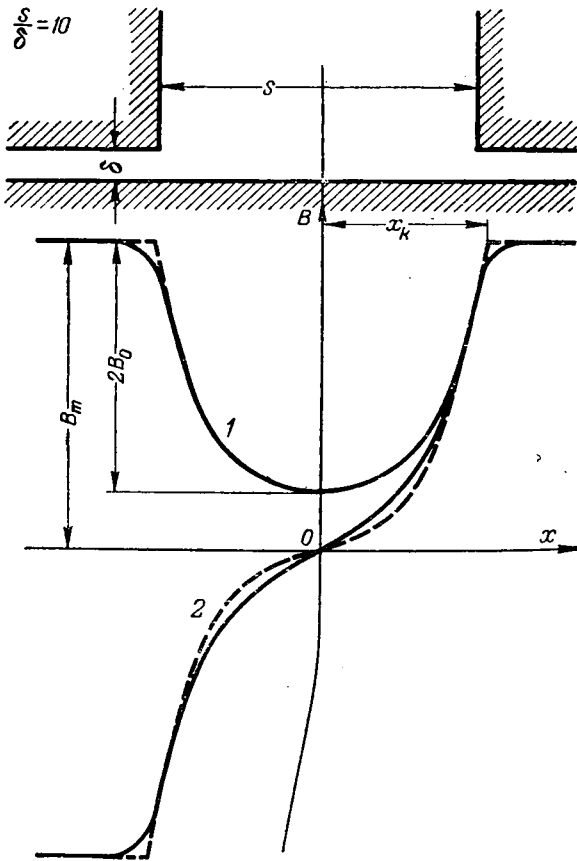


Рис. 4.

о плоско-параллельном характере поля и бесконечно большой магнитной проницаемости стали. Используем приведенные в литературе решения этой задачи для пазов, не занятых [Л. 7, стр. 147] и занятых [Л. 8, стр. 542] током при различных геометрических соотношениях. В качестве

примера на рис. 4 для  $\frac{s}{\delta} = 10$  приведены рассчитанные подобным образом кривые поля под пазом, не занятым током (сплошная кривая 1) и занятым током (сплошная кривая 2).

Решения для кривых поля получаются методом конформного отображения в параметрической и сложной форме, неудобной для разложения кривой вида 1 рис. 1, б в ряд Фурье. Поэтому для кривых поля под пазами (рис. 4) были подобраны функции более простого вида:

$$B = B_m - 2B_0 + B_1 \left( \operatorname{ch}_\gamma \frac{x}{\delta} - 1 \right) \quad (I,1)$$

для пазов, не занятых током, и

$$B = B_2 \operatorname{sh}_\gamma \frac{x}{\delta} \quad (I,2)$$

для пазов, занятых током. Значения  $B_0$ ,  $B_m$  и  $x_k$  ясны из рис. 4. Величины  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $x_k$  и  $\gamma$  были подобраны по серии кривых вида рис. 4 и изображены в функции  $\frac{s}{\delta}$  на рис. 5.

Кривые поля по (I,1) и (I,2) изображены в качестве примера на рис. 4 пунктирными линиями. Как видно, они достаточно хорошо совпадают со сплошными линиями.

Задав кривую 1 рис. 1, б математически с помощью (I,1) и (I,2) и прямыми на участках зубцов шириной  $t - 2x_k$ , была определена основная гармоника этой кривой и отнесена к основной гармонике прямоугольной волны 3 рис. 1, б, в результате чего было найдено отношение  $\xi_1$ :

$$\xi_1 - 1 = k_\delta \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \left[ \left( \frac{1}{\lambda} B_1 \cos \gamma_0 - B_{II} \sin \gamma_0 \right) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2qm} + \frac{1}{\lambda} B_{III} \sin \alpha_0 + \cos \alpha_0 - \frac{1}{k_\delta} - \frac{1}{k_\delta \lambda^2} \right], \quad (I,3)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{qm} \frac{x_k}{t}, \quad \lambda = \frac{qm}{\pi} \frac{t}{\delta} \gamma,$$

а

$$B_I = \frac{B_1}{B_m} \operatorname{sh} \lambda \alpha_0,$$

$$B_{II} = \frac{B_1 + 2B_0}{B_m} = \frac{B_1}{B_m} \operatorname{ch} \lambda \alpha_0,$$

$$B_{III} = \frac{B_2}{B_m} \operatorname{ch} \lambda \alpha_0$$

изображены графически на рис. 5.

Содержание квадратных скобок в (I,3) представляет весьма малую величину по сравнению с отдельными слагаемыми в этих скобках, и поэтому для удобства практических расчетов разложим правую часть (I,3) в ряд по степеням  $\frac{\pi}{qm}$ . Член  $\frac{1}{k_\delta}$ , представляющий относительно большую величину, целесообразно выразить через те же константы, как и другие члены.

Интегрируя по кривой 1 рис. 3 и используя при этом (I,1) для выражения индукции под пазом, нетрудно получить:

$$\frac{1}{k_\delta} = \frac{2}{B_m t} \int_0^{\frac{t}{2}} B dx = 1 - \frac{2x_k}{t} B_{II} + \frac{2\delta}{t} B_I.$$

Учитывая приведенное соотношение и полагая  $\frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} \approx 1$ , при разложении (I,3) в ряд получим:

$$\xi_1 - 1 \approx a \left( \frac{\pi}{qm} \right)^2 + b \left( \frac{\pi}{qm} \right)^4 + c \left( \frac{\pi}{qm} \right)^6 + \dots$$

При обычных соотношениях  $\frac{\pi}{qm} < 1$ , а коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ... весьма быстро убывают. Поэтому можно учесть

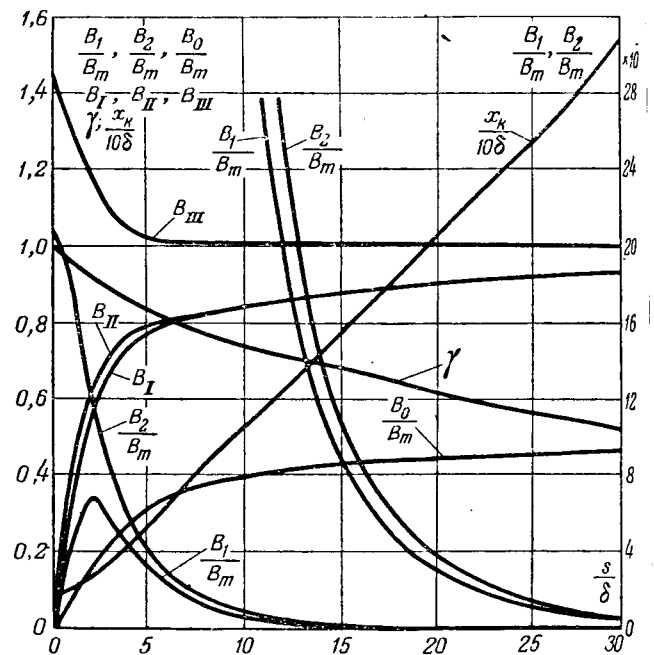


Рис. 5.

лишь первый член разложения и, таким образом, с учетом значения  $a$  имеем:

$$\xi_1 - 1 \approx k_\delta \left[ \frac{\partial}{\partial t} \frac{x_k}{t} B_{III} + \frac{1}{6} \left( \frac{x_k}{t} B_{II} - \frac{\partial}{\partial t} B_I \right) + \left( \frac{1}{3} \frac{x_k}{t} B_{II} - \frac{\partial}{\partial t} B_I - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{x_k}{t} \right)^2 - \frac{1}{k_\delta} \left( \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 \right] \frac{\pi^2}{q^2 m^2}. \quad (1,4)$$

Вычислим теперь второе слагаемое  $\Delta\tau_\partial$ .

На рис. 6 изображена схема чередования пазов трехфазной двухслойной обмотки с  $q=3$  и сокращением шага на  $k=1$  зубцов делений. Указаны также направления токов для момента времени, когда ток в первой фазе имеет максимальное значение. Представим себе, что каждый слой составляет самостоятельную обмотку с диаметральной шагом и что возбуждена одна диаметрально катушка верхнего слоя. Соответствующее поле также изображено на рис. 6.

Как указывалось выше, уменьшение сопротивления  $x_2$  на величину  $\Delta x_2$  происходит вследствие того, что поток  $\frac{\Phi_k}{2}$  меньше потока  $\frac{\Phi_t}{2}$  (рис. 6). Пусть

$$\Phi_k = (1 - \vartheta) \Phi_t,$$

где коэффициент

$$\vartheta = f\left(\frac{s}{\delta}, \frac{t}{\delta}\right)$$

подлежит определению на основании кривых поля под пазами.

Подсчитаем потокосцепление первой фазы обмотки с потоками  $\frac{\Phi_k}{2}$ .

Из рис. 6 следует, что потоки  $\frac{\Phi_k}{2}$  создают потокосцепление только с данной возбужденной диаметральной катушкой и катушкой, лежащей с нею в одних пазах, так как для других катушек потоки  $+\frac{\Phi_k}{2}$  и  $-\frac{\Phi_k}{2}$  взаимно компенсируются. Соответственно этому потоки  $\frac{\Phi_k}{2}$  от  $q$  верхних катушек первой фазы создают с верхними же катушками первой фазы потокосцепление  $\Phi_k q s_k$ , а с нижними катушками первой фазы потокосцепление  $\Phi_k (q - k) s_k$ , где  $s_k$  — число витков в катушке (секции). Такие же потокосцепления создают  $q$  катушек нижнего слоя первой фазы. Учитывая, что в данный момент времени другие две фазы обтекаются током, равным половине тока первой фазы, легко заметить, что потоки  $\frac{\Phi_k}{2}$  этих фаз создают с первой фазой потокосцепление  $\Phi_k k s_k$ .

Таким образом, общее потокосцепление первой фазы с потоками  $\frac{\Phi_k}{2}$  при  $p$  пар полюсов

$$\Psi_k = (4q - k) s_k p \Phi_k = (4q - k) s_k p (1 - \vartheta) \Phi_t,$$

причем

$$\Phi_t = \frac{B_m}{k_\delta} t l = \frac{\mu_0}{\delta k_\delta} \frac{s_k \sqrt{2} I}{2} \frac{\pi D l}{2 p m q},$$

где  $l$  — активная длина машины, а  $D$  — диаметр рашотки.

Учитывая, что

$$\Delta x_2 = \frac{\omega \Psi_k}{\sqrt{2} I} \frac{\Phi_t - \Phi_k}{\Phi_k},$$

где  $\omega$  — угловая частота тока, и подставив  $s_k = \frac{w}{2 q p}$ ,

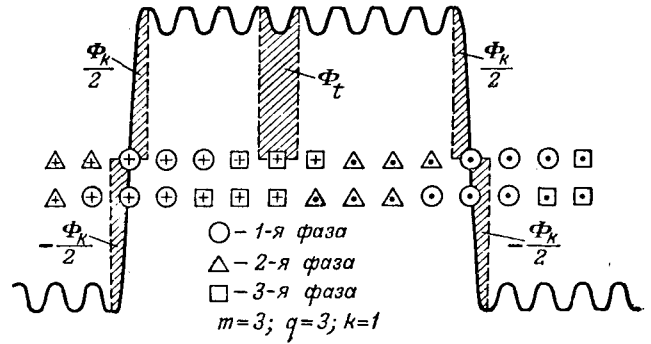


Рис. 6.

где  $w$  — число последовательных витков в фазе, получим:

$$\Delta x_2 = \omega \frac{\pi \mu_0}{4} \frac{D l}{m k_\delta \delta} \frac{w^2}{q^2 p^2} \frac{4q - k}{4q} \vartheta.$$

Индуктивное сопротивление от основной гармоник поля в воздушном зазоре шириной  $\delta' = k_\delta \delta$  [Л. 4, стр. 239]

$$x_1 = \omega \frac{\mu_0}{\pi} \frac{m D l \omega^2 k^2 w_1}{k_\delta \delta p^2}.$$

где  $k_{w1} = k_{p1} k_{y1}$  — обмоточный коэффициент основной гармоники.

Следовательно,

$$\frac{\Delta x_2}{x_1} \approx \frac{1}{4} \vartheta \frac{\pi^2}{m^2 q^2}, \quad (1,5)$$

так как для всех практических случаев можно принять:

$$\frac{4q - k}{4q k_y^2 k^2} \approx 1.$$

Поправка  $\Delta\tau_\partial$  к коэффициенту дифференциального рассеяния согласно (5), (1,4) и (1,5)

$$\Delta\tau_\partial \approx k_2 \frac{1}{m^2 q^2}. \quad (1,6)$$

Очевидно, при этом коэффициент равен сумме правых сторон выражений (1,4) и (1,5), умноженных на  $m^2 q^2$ . Значения  $k_2$  в соответствии с (1,4) и (1,5) были вычислены для ряда практических соотношений, пользуясь кривыми поля типа рис. 4 и кривыми коэффициентов, изображенных на рис. 5. Полученные значения  $k_2$  изображены на рис. 2.

**Короткозамкнутая обмотка.** Для короткозамкнутой обмотки в виде беличьей клетки коэффициент дифференциального рассеяния при равномерном зазоре дается [Л. 5] выражением

$$\tau_\partial = \frac{\left(\frac{p\pi}{Z_2}\right)^2}{\sin^2\left(\frac{p\pi}{Z_2}\right)} - 1.$$

Пусть  $\frac{Z_2}{p}$  — целое и притом четное число. Тогда каждому из  $\frac{Z_2}{2p}$  стержней на протяжении одного полюсного

деления  $\tau$  будет соответствовать на расстоянии  $\tau$  под другим полюсом стержень с противоположным по фазе током. Каждую такую пару стержней можно рассматривать как одну фазу обмотки, состоящую из одного витка с диаметральной шагом, причем число таких фаз на протяжении двойного полюсного деления равно  $\frac{Z_2}{2p}$ . Фазы других

двойных полюсных делений можно считать соединенными с первыми последовательно или параллельно.

В этом случае нетрудно заметить, что все выводы, полученные в предыдущем случае, будут действительны и для

рассматриваемого случая, с тем лишь отличием, что приближенное равенство (1,5) превратится в точное. При этом

$$mq = \frac{Z_2}{2p}.$$

Можно показать, что сказанное справедливо и в случае, когда  $\frac{Z_2}{p}$  равно любому числу, и, следовательно, в случае беличьей клетки с любым числом стержней поправку  $\Delta\tau_0$  можно вычислять таким же образом, как и для фазной обмотки.

**Поправка к коэффициенту дифференциального рассеяния нулевой последовательности.** Как указывалось выше, поправка  $\Delta\tau_{00} = \frac{\Delta x_{00}}{x_1}$  аналогична поправке  $\frac{\Delta x_2}{x_1}$  и, следовательно, вычисляется аналогично (1,5). Разница состоит лишь в том, что при обтекании обмотки токами нулевой последовательности токи фаз 2 и 3 на рис. 6 изменят свой знак и будут равны току фазы 1. Поэтому, как можно заключить из рассмотрения рис. 6, при вычислении  $\Delta x_{00}$  вместо множителя  $4q - k$  войдет множитель  $4q - 4k$  (случай  $0 \leq k \leq q$ ).

Таким образом, вместо (1,5) получим:

$$\Delta\tau_{00} = \frac{\Delta x_{00}}{x_1} = \frac{4q - 4k}{4q - k} \frac{\pi^2 \vartheta}{4\pi^2 q^2} = \frac{4q - 4k}{4q - k} \frac{k_{z0}}{m^2 q^2}, \quad (1,7)$$

где

$$k_{z0} = \frac{\pi^2}{4} \vartheta.$$

Значения  $k_{z0}$  для разных геометрических соотношений были определены по кривым, подобным кривым рис. 5, и полученные значения  $k_{z0}$  изображены на рис. 3.

**Пример.** В качестве примера рассчитаем сопротивление дифференциального рассеяния с учетом неравномерности воздушного зазора для асинхронного двигателя с данными:  $P=1,5$  квт,  $U=380$  в,  $I=3,4$  а,  $\cos \varphi = 0,820$ , к. п. д. — 0,83, 50 гц, 1470 об/мин. Конструктивные данные: диаметр ротора  $D=143$  мм; длина стали статора и ротора  $l=76$  мм; числа пазов (соответственно статора и ротора)  $Z_1=36$ ,  $Z_2=44$ ; зубцовые деления  $t_1=12,5$  мм,  $t_2=10,1$ ; воздушный зазор  $\vartheta=0,5$  мм; открытия пазов  $s_1=3,2$  мм,  $s_2=1,0$  мм; коэффициент воздушного зазора  $k_s=1,21$ . Обмотка статора: число витков  $w_1=408$ ; шаг 1-8; обмоточный коэффициент  $k_{w1}=0,901$ . Обмотка ротора: короткозамкнутая с круглыми медными стержнями  $d=6,35$  мм, скос пазов на 0,183 зубцового деления ротора. Индуктивное сопротивление статора от основной гармоники

$$x_1 = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot 143 \cdot 10^{-3} \cdot 76 \cdot 10^{-3}}{1,21 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \times \\ \times \frac{408 \cdot 0,901^2}{2^2} = 228 \text{ ом}.$$

Коэффициенты дифференциального рассеяния статора и ротора [Л. 2]:  $\tau_{01}=0,0111$ ,  $\tau_{02}=0,0070$ . Сопротивление дифференциального рассеяния статора и ротора без учета неравномерности зазора:

$$x_{01} + x'_{02} = (\tau_{01} + \tau_{02}) x_1 = (0,0111 + 0,0070) 228 = 4,13 \text{ ом}.$$

Сопротивления пазовых и лобовых частей обмотки статора и ротора, рассчитанные по формулам зазора „Электросила“, составили:

$$x_{паз1} + x'_{паз2} = 4,43 + 3,09 = 7,52 \text{ ом}.$$

Полное индуктивное сопротивление рассеяния машины без учета неравномерности зазора

$$x = 7,52 + 4,13 = 11,65 \text{ ом}.$$

По  $\frac{s_1}{\vartheta} = \frac{3,2}{0,5} = 6,4$ ,  $\frac{t_1}{\vartheta} = \frac{12,5}{0,5} = 25,0$  для статора и  $\frac{s_2}{\vartheta} = \frac{1,0}{0,5} = 2,0$ ,  $\frac{t_2}{\vartheta} = \frac{10,1}{0,5} = 20,2$  для ротора; из рис. 1 находим  $k_{z1}=0,191$  и  $k_{z2}=0,110$ . Поправки к коэффициентам дифференциального рассеяния:

$$\Delta\tau_{01} + \Delta\tau_{02} = \frac{k_{z1}}{m_1 q_1^2} + \left(\frac{2p}{Z_2}\right)^2 k_{z2} = \frac{0,191}{3^2 \cdot 3^2} + \\ + \left(\frac{4}{44}\right)^2 \cdot 0,110 = 0,00236 + 0,00091 = 0,00327.$$

Полное сопротивление рассеяния с учетом неравномерности зазора:

$$x' = x - (\Delta\tau_{01} + \Delta\tau_{02}) x_1 = 11,65 - 0,00327 \cdot 228 = 10,90 \text{ ом}.$$

Таким образом, в данном случае в машине с малыми открытиями пазов дифференциальное рассеяние с учетом неравномерности зазора составляет 31% от полного сопротивления рассеяния. Под влиянием неравномерности зазора дифференциальное рассеяние статора уменьшается на 21,2%, дифференциальное рассеяние ротора — на 13,0%, а полное сопротивление — на 6,4%.

Определенное из опыта сопротивление рассеяния данной машины составило 11,02 ом. Весьма хорошее совпадение с расчетным значением 10,90 ом, разумеется, в известной мере случайно.

### Литература

1. Справочная книга для электротехников (СЭТ), т. VI, Кубуч, Ленинград, 1934.
2. Р. Рихтер. Электрические машины, т. IV, ОНТИ, 1939.
3. А. И. Вольдек. Влияние неравномерности воздушного зазора на дифференциальное рассеяние асинхронной машины. Электричество, № 12, 1951.
4. А. Е. Алексеев и М. П. Костенко. Турбогенераторы. Госэнергоиздат, 1939.
5. М. П. Костенко. Электрические машины, специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.
6. P. L. Alger und H. R. West, The Air Gap Reactance of Polyphase Machines, Trans. AIEE, vol. 66, p. 1331, 1947.
7. И. М. Аснин. Расчеты электромагнитных полей. Изд. ВЭТА, Ленинград, 1939.
8. К. А. Круг. Основы электротехники. ОНТИ, т. I, 1931.

[19.5.1952]



# Применение эквивалентных схем активного четырехполюсника и шестиполюсника для расчета нелинейных цепей

Кандидат техн. наук П. А. ИОНКИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Цепь с двумя нелинейными элементами. Выделим из произвольной электрической цепи две ветви (рис. 1) с нелинейными элементами  $r_1(I_1)$  и  $r_2(I_2)$ . Остальную часть цепи можно рассматривать относительно зажимов 1—1' и 2—2' в виде линейного активного четырехполюсника, присоединенного к нелинейным элементам в точках 1—1' и 2—2'. Заменяем линейный активный четырехполюсник, например, Т-образной эквивалентной схемой, в результате получим электрическую схему рис. 2 с токами  $I_1$  и  $I_2$ , равными действительным токам в соответствующих ветвях реальной цепи.

Электродвижущие силы  $E_{1x}$  и  $E_{2x}$  (рис. 2) определяются путем расчета или из опыта при одновременном размыкании ветвей с нелинейными элементами  $r_1(I_1)$  и  $r_2(I_2)$  в заданной цепи [Л. 1 и 2] (рис. 10, приложение 1).

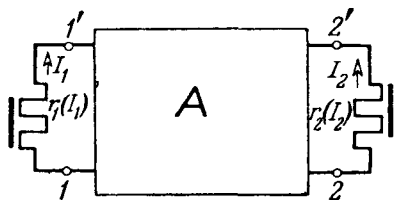


Рис. 1.

Для определения сопротивлений  $r'_1$ ,  $r'_2$  и  $r'_{12}$  эквивалентной схемы рис. 2 целесообразно воспользоваться уравнениями для пассивного четырехполюсника:

$$U_1 = r_{11}I_1 + r_{12}I_2 \quad \text{и} \quad U_2 = r_{22}I_2 + r_{21}I_1, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — внешние напряжения, приложенные соответственно к зажимам 1—1'' и 2—2''.

При  $I_2 = 0$  и питании четырехполюсника только со стороны зажимов 1—1' (рис. 11, приложение 1) из уравнений (1) имеем:  $r_{11} = \frac{U_1}{I_{1x}}$  и  $r_{21} = -\frac{U'_{2x}}{I_{1x}}$ . Аналогично, при  $I_1 = 0$  и питании четырехполюсника со стороны зажимов 2—2'' получим:

$$r_{12} = \frac{-U'_{1x}}{I_{2x}} = \frac{-U'_{2x}}{I_{1x}} \quad \text{и} \quad r_{22} = \frac{U_2}{I_{2x}}.$$

Изложен графоаналитический способ расчета электрических цепей постоянного тока с двумя и тремя нелинейными элементами. Прием основан на замене заданной линейной активной части электрической цепи соответствующей эквивалентной схемой более простого вида, позволяющей произвести расчет всей цепи графоаналитически.

Пользуясь уравнениями (1), можно показать, что сопротивления  $r'_1$ ,  $r'_2$  и  $r'_{12}$  эквивалентной схемы определяются через сопротивления  $r_{11}$ ,  $r_{22}$  и  $r_{12}$  выражениями

$$r'_1 = r_{11} - r_{12}, \quad r'_2 = r_{22} - r_{12} \quad \text{и} \quad r'_{12} = r_{12}.$$

Графоаналитическое определение токов  $I_1$  и  $I_2$  в эквивалентной схеме рис. 2, как в схеме с двумя узлами, не представляет затруднений ([Л. 3 и при-

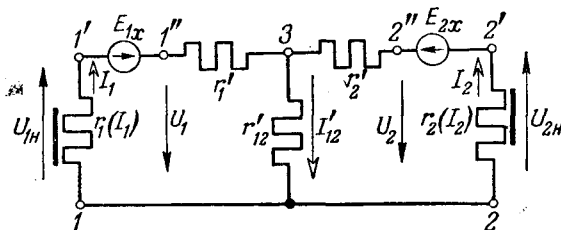


Рис. 2.

ложение 1]). Зная токи  $I_1$  и  $I_2$  и напряжения  $U_{1x}$  и  $U_{2x}$  в ветвях с нелинейными элементами и пользуясь законами Кирхгофа, легко определить токи в остальных ветвях заданной электрической цепи.

**Цепь с тремя нелинейными элементами.** Задана электрическая цепь произвольного вида с линейными и тремя нелинейными элементами (рис. 3).

Выделим из этой цепи три нелинейных элемента  $r_1(I_1)$ ,  $r_2(I_2)$  и  $r_3(I_3)$ . Будем рассматривать остальную линейную часть этой цепи относительно зажимов 1—1'', 2—2'' и 3—3' в виде активного шестиполюсника. После замены активного линейного шестиполюсника его эквивалентной схемой получим электрическую схему рис. 4 с реальными токами  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  в ветвях с нелинейными элементами. Электродвижущие силы  $E_{1x}$ ,  $E_{2x}$  и  $E_{3x}$  определяются так же, как в схеме с двумя нелинейными элементами, опытным или расчетным путем при одновременном размыкании всех ветвей с нелинейными элементами. Для определения сопротивлений  $r'_1$ ,  $r'_2$ ,  $r'_3$ ,  $r'_{12}$ ,  $r'_{23}$  и  $r'_{31}$  эквивалентной схемы рис. 4 целесообразно вос-



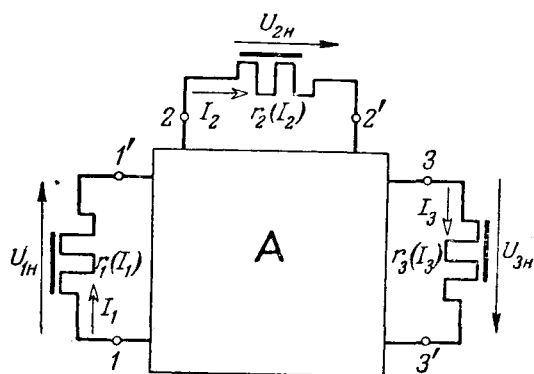


Рис. 3.

пользоваться уравнениями пассивного шестиполусника:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= r_{11}I_1 + r_{12}I_2 + r_{13}I_3, \\ U_2 &= r_{21}I_1 + r_{22}I_2 + r_{23}I_3, \\ U_3 &= r_{31}I_1 + r_{32}I_2 + r_{33}I_3, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  — внешние напряжения, приложенные соответственно к зажимам 1—1'', 2—2'' и 3—3'' линейного пассивного шестиполусника.

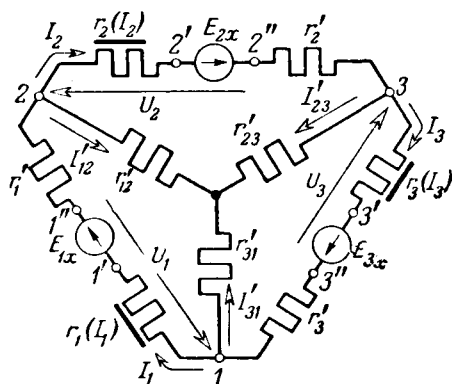


Рис. 4.

При питании пассивного шестиполусника только со стороны зажимов 1—1'' и при  $I_2 = I_3 = 0$  получим  $U_1 = r_{11}I_{1x}$ ,

$$r_{11} = \frac{U_1}{I_{1x}}, \quad r_{21} = -\frac{U_{2x}}{I_{1x}} \text{ и } r_{31} = -\frac{U_{3x}}{I_{1x}}.$$

Аналогичным путем определяются сопротивления  $r_{22}$ ,  $r_{33}$  и  $r_{23}$ .

Из уравнений (2) можно получить, что сопротивления эквивалентной схемы рис. 4 определяются следующими выражениями:

$$r'_1 = r_{11} + r_{12} + r_{13}, \quad r'_2 = r_{22} + r_{23} + r_{21},$$

$$r'_3 = r_{33} + r_{31} + r_{32},$$

$$r'_{12} = -r_{12}, \quad r'_{23} = -r_{23} \text{ и } r'_{31} = -r_{31}.$$

Для определения токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  преобразуем звезду сопротивлений  $r'_{12}$ ,  $r'_{23}$  и  $r'_{31}$  в эквивалентный треугольник с сопротивлениями  $r''_{12}$ ,  $r''_{23}$  и  $r''_{31}$

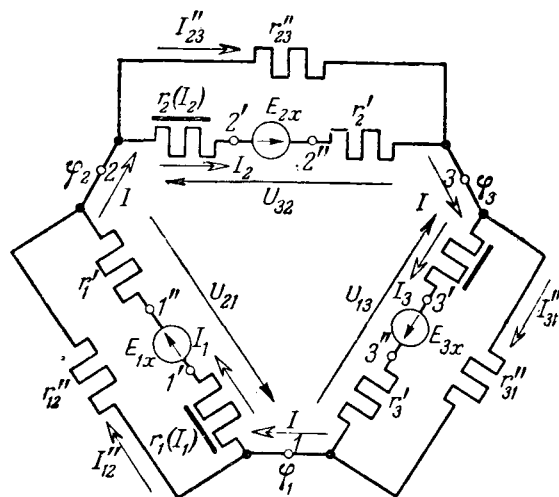


Рис. 5.

(рис. 5). Затем построим известным способом вольтамперные характеристики

$$I = I_1 + I''_{12} = f_1(U_{21}), \quad I = I_2 + I''_{23} = f_2(U_{32})$$

и

$$I = I_3 + I''_{31} = f_3(U_{13}),$$

где

$$U_{21} = -r''_{12}I''_{12} = E_{1x} - r_1(I_1)I_1 - r'_1I_1,$$

$$U_{32} = -r''_{23}I''_{23} = E_{2x} - r_2(I_2)I_2 - r'_2I_2$$

и

$$U_{13} = -r''_{31}I''_{31} = E_{3x} - r_3(I_3)I_3 - r'_3I_3$$

(приложение 2, рис. 15). Так как сумма напряжений  $U_{21}$ ,  $U_{32}$  и  $U_{13}$  должна равняться нулю, то, построив дополнительную характеристику  $I = f(U_{21} + U_{32} + U_{13})$ , получим точку пересечения этой кривой с осью ординат, которая и определяет ток  $I$ . По известному току  $I$  легко найти напряжения  $U_{21}$ ,  $U_{32}$  и  $U_{13}$ , а затем токи  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  и напряжения  $U_{1n}$ ,  $U_{2n}$  и  $U_{3n}$  нелинейных элементов. Зная токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и напряжения  $U_{1n}$ ,  $U_2$  и  $U_{3n}$ , можно с помощью законов Кирхгофа определить токи в остальных ветвях заданной цепи.

В заключение необходимо отметить, что изложенный способ расчета можно распространить на такие цепи, в которых каждый нелинейный элемент, выделяемый из сложной цепи, представляет собой последовательно-параллельное соединение любого числа активных и пассивных нелинейных элементов. В таких случаях необходимо предварительно заменить заданное смешанное соединение нелинейных элементов одним эквивалентным, и после этого воспользоваться для расчета цепи изложенным способом.

Вместе с тем замена пассивной линейной части цепи эквивалентной схемой четырехполусника или шестиполусника нецелесообразна в том случае, когда пассивная часть соответствующей линейной цепи преобразуется к более простой схеме другими известными приемами или отсутствует необходимость в ее преобразовании в силу простоты схемы. Например, на рис. 6 изображена

схема моста: для стабилизации напряжения. При одновременном размыкании двух ветвей с нели-

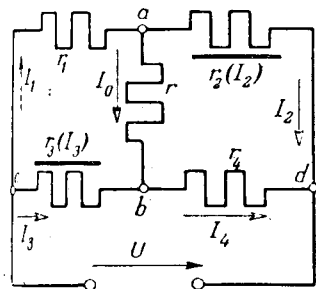


Рис. 6.

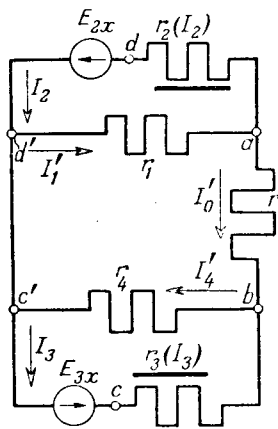


Рис. 7.

нейными элементами  $r_2(I_2)$  и  $r_3(I_3)$  после определения э. д. с.  $E_{2x}$  и  $E_{3x}$  получим простую эквивалентную схему рис. 7 с токами  $I_2$  и  $I_3$ , равными соответствующим токам в ветвях заданной цепи.

Для определения токов  $I_2$  и  $I_3$  нет необходимости специально находить параметры Т-образной эквивалентной схемы пассивного четырехполюсника, так как в данном случае заданные линейные сопротивления образуют П-образную эквивалентную схему (рис. 7). Расчет такой цепи, представляющей смешанное соединение линейных и нелинейных элементов, не представляет затруднений.

Иногда в результате размыкания ветвей с нелинейными элементами они отсоединяются от остальной части цепи и возникает неопределенность в нахождении напряжений холостого хода на зажимах соответствующих ветвей (см., например, [Л-3], рис. 5,22). В таких схемах можно принять напряжение на зажимах одной из ветвей равным нулю, после чего легко найти напряжения холостого хода на зажимах остальных ветвей.

**Приложение I.** На рис. 8 показана электрическая цепь с двумя нелинейными элементами  $r_1(I_1)$  и  $r_2(I_2)$ .

Вольтамперные характеристики для этих элементов заданы в виде кривых  $I_1 = f_1(U_{1H})$  и  $I_2 = f_2(U_{2H})$  на рис. 9.

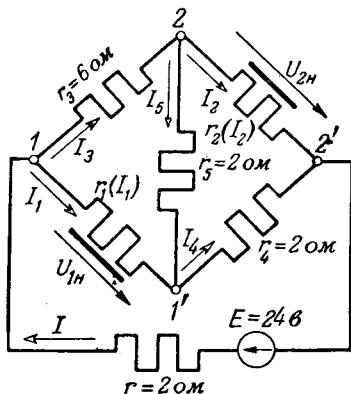


Рис. 8.

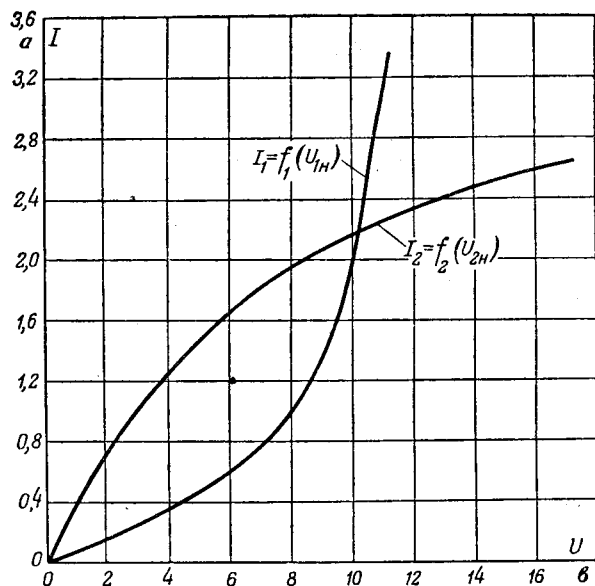


Рис. 9.

Для определения пассивных параметров эквивалентной схемы рис. 2 подведем напряжение  $U_1$  к зажимам 1—1'' (рис. 11) и при разомкнутых зажимах 2—2' определим входное сопротивление  $r_{11} = \frac{U_1}{I_{1x}} = \frac{8}{3}$  ом и взаимное сопротивление  $r_{21} = -\frac{U'_{2x}}{I_{1x}} = -\frac{2}{3}$  ом. Аналогично найдем

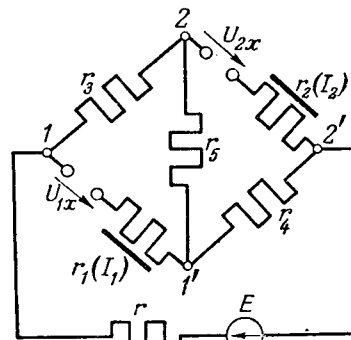


Рис. 10.

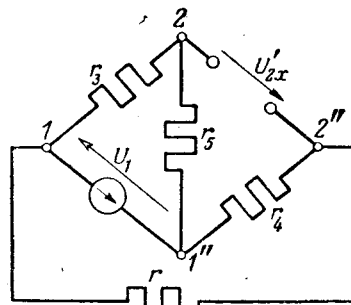


Рис. 11.

входное сопротивление  $r_{22} = \frac{U_2}{I_{2x}} = \frac{8}{3}$  ом всей цепи со стороны зажимов 2—2'' при разомкнутых зажимах 1—1''.

Сопротивления эквивалентной схемы рис. 2 равны:

$$r'_1 = r_{11} - r_{12} = \frac{8}{3} + \frac{2}{3} = \frac{10}{3} \text{ ом};$$

$$r'_2 = r_{22} - r_{12} = \frac{8}{3} + \frac{2}{3} = \frac{10}{3} \text{ ом}$$

Числовые значения э. д. с.  $E$  и сопротивлений ветвей указаны на рис. 8. Для определения э. д. с.  $E_{1x}$  и  $E_{2x}$  в эквивалентной схеме рис. 2 разомкнем ветви с элементами  $r_1(I_1)$  и  $r_2(I_2)$  (рис. 10) и найдем напряжения на зажимах 1—1' и 2—2'. Эти напряжения определяют искомые э. д. с. по величине и направлению:  $E_{1x} = 16$  в и  $E_{2x} = 8$  в.

и

$$r'_{12} = r_{12} = -\frac{2}{3} \text{ ом.}$$

Затем задаемся напряжением  $U_{31} = U_{32}$  или токами  $I_1$  и  $I_2$  и строим (рис. 12) вольтамперные характеристики

$$I_1 = f_1(U_{31}) = f_1(E_{1x} - r'_1 I_1 - U_{1n}),$$

$$I_2 = f_2(U_{32}) = f_2(E_{2x} - r'_2 I_2 - U_{2n})$$

и прямую  $I'_{12} = f_{12}(r'_{12} I'_{12})$ .

Для определения тока  $I'_{12} = I_1 + I_2$  построим вспомогательную характеристику  $I_1 + I_2 = f_{31}(U_{31}) = f_{32}(U_{32})$  путем суммирования ординат токов  $I_1$  и  $I_2$  для одних и тех же значений напряжения  $U_{31} = U_{32}$ . Координаты точки  $a$  пересечения прямой  $I'_{12} = f_{12}(r'_{12} I'_{12})$  и кривой  $I_1 + I_2 = f_{31}(U_{31})$  рис. 12 определяют ток  $I_{12}$  и напряжение на зажимах трех параллельных ветвей эквивалентной схемы рис. 2. Зная напряжение  $U_{31} = U_{32}$ , определяем искомые токи  $I_1 = 2,46 \text{ а}$ ,

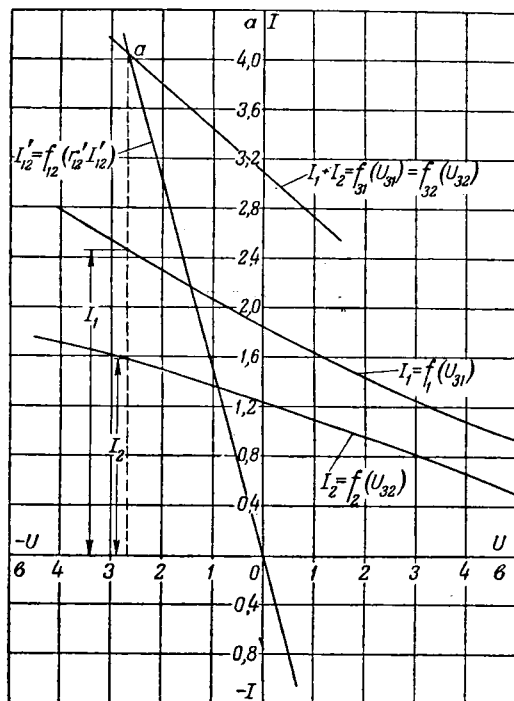


Рис. 12.

$I_2 = 1,58 \text{ а}$  и напряжения  $U_{1n} = 10,50 \text{ в}$ ,  $U_{2n} = 5,6 \text{ в}$ . Возвращаясь к исходной схеме рис. 8, находим на основании законов Кирхгофа токи в остальных ветвях:  $I_3 = 1,7 \text{ а}$ ,  $I_4 = 2,58 \text{ а}$ ,  $I_5 = 0,12 \text{ а}$  и  $I = 4,16 \text{ а}$ .

**Приложение II.** На рис. 13 изображена электрическая цепь с тремя нелинейными элементами  $r_1(I_1)$ ,  $r_2(I_2)$  и  $r_3(I_3)$ .

Вольтамперная характеристика нелинейного элемента  $r_1(I_1)$  задана в виде кривой  $I_1 = f_1(U_{1n})$  рис. 9, а вольтамперные характеристики второго и третьего элементов одинаковы и для каждого элемента заданы в виде кривой  $I_2 = f_2(U_{2n})$  рис. 9. Значения э. д. с.  $E_4$ ,  $E_5$  и  $E_6$  и сопротивлений ветвей указаны на рис. 13. Для определения э. д. с.  $E_{1x}$ ,  $E_{2x}$  и  $E_{3x}$  в эквивалентной схеме рис. 4 разомкнем одновременно ветви с нелинейными элементами  $r_1(I_1)$ ,  $r_2(I_2)$  и  $r_3(I_3)$  и найдем напряжения, вызываемые э. д. с.  $E_4$ ,  $E_5$  и  $E_6$  на зажимах 1—1', 2—2' и 3—3'.

Эти напряжения определяют искомые э. д. с. по величине и направлению:  $E_{1x} = 18 \text{ в}$ ,  $E_{2x} = 13,5 \text{ в}$  и  $E_{3x} = 6 \text{ в}$ . Для определения пассивных параметров эквивалентной схемы рис. 4 подведем напряжение  $U_1$  к зажимам 1—1' рис. 14. При разомкнутых зажимах 2—2' и 3—3' найдем

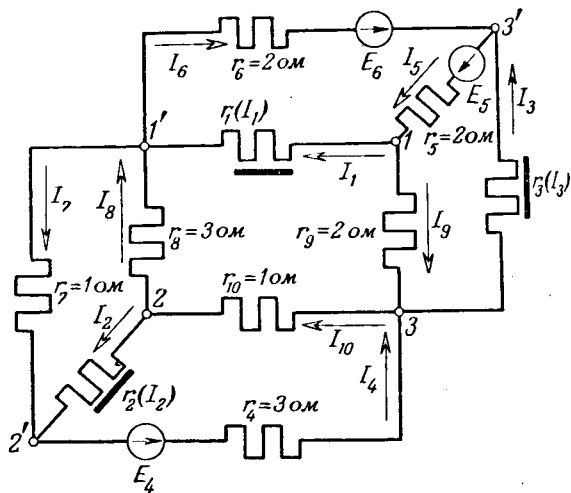


Рис. 13.

входное сопротивление  $r_{11} = \frac{U_1}{I_{1x}} = 2 \text{ ом}$  и взаимные сопротивления  $r_{21} = -\frac{U_{2x}}{I_{1x}} = 0,5 \text{ ом}$ ,  $r_{31} = -\frac{U_{3x}}{I_{1x}} = 0$ .

Аналогично определим входные сопротивления со стороны зажимов 2—2'  $r_{22} = \frac{U_2}{I_{2x}} = \frac{15}{8} \text{ ом}$  при  $I_3 = I_1 = 0$  и зажимов 3—3'  $r_{33} = \frac{U_3}{I_{3x}} = 2 \text{ ом}$  при  $I_1 = I_2 = 0$ , а также взаимное сопротивление  $r_{32} = -\frac{U_{3x}}{I_{2x}} = 0,5 \text{ ом}$ .

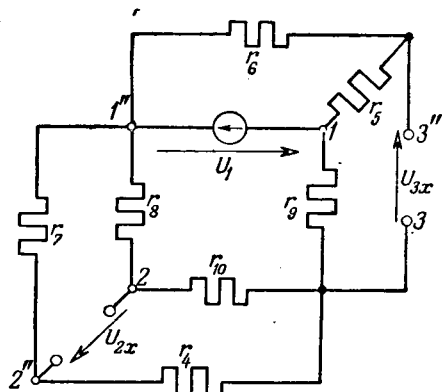


Рис. 14.

Так как в данном примере сопротивление  $r_{31}$  равно нулю, то  $r'_{12}$  оказывается непосредственно присоединенным к зажимам 1—2, а  $r'_{23}$  — к зажимам 3—1, рис. 4. В эквивалентной схеме рис. 5 ток  $I_2 = I_1 + I'_{12} = I_3 + I'_{31}$ , а сопротивление

$$r'_1 = r_{11} + r_{12} = 2,5 \text{ ом}, \quad r'_2 = r_{22} + r_{12} + r_{23} = 2,88 \text{ ом},$$

$$r'_3 = r_{33} + r_{23} = 2,5 \text{ ом}, \quad r''_{12} = -r_{12} = -0,5 \text{ ом}$$

и

$$r''_{31} = -r_{31} = -0,5 \text{ ом}.$$

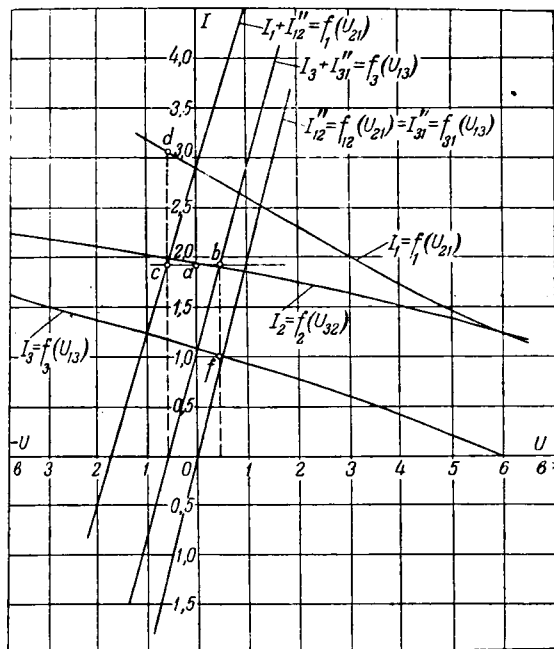


Рис. 15.

Затем задаемся значениями напряжений  $U_{21}$ ,  $U_{32}$  и  $U_{13}$  и строим вольтамперные характеристики (рис. 15)

$$I_1 + I_{12}'' = f_1(U_{21}), \quad I_2 = f_2(U_{32})$$

$$I_3 + I_{31}'' = f_3(U_{13}),$$

где

$$U_{21} = -r_{12}'' I_{12}'' = E_{1x} - r_1' I_1 - U_{1N},$$

$$U_{32} = E_{2x} - r_2' I_2 - U_{2N}$$

и

$$U_{13} = -r_{31}'' I_{31}'' = E_{3x} - r_3' I_3 - U_{3N}.$$

Суммируя значения напряжения  $U_{21}$ ,  $U_{32}$  и  $U_{13}$  для одних и тех же значений тока  $I_2 = I_1 + I_{12}'' = I_3 + I_{31}''$ , получим на оси ординат точку  $a$ , определяющую ток  $I_2 = 1,92$  а.

Для определения токов  $I_1$  и  $I_3$  проведем через точку  $a$  прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с характеристиками  $I_3 + I_{31}'' = f_3(U_{13})$  и  $I_1 + I_{12}'' = f_1(U_{21})$ . Отрезки  $a'b$  и  $a'c$  дают соответственно значения напряжения  $U_{13}$  и  $U_{21}$ . Затем через точки  $b$  и  $c$  проведем прямые, параллельные оси ординат, до пересечения с характеристиками  $I_3 = f_3(U_{13})$  и  $I_1 = f_1(U_{21})$ , в результате получим точки  $d$  и  $f$ , ординаты которых соответственно определяют токи  $I_1 = 3,05$  а и  $I_3 = 1,01$  а. Пользуясь заданными вольтамперными характеристиками (рис. 9), находим напряжения на зажимах нелинейных элементов:  $U_{1N} = 11$  в;  $U_{2N} = 7,8$  в и  $U_{3N} = 3$  в. Возвращаясь к исходной схеме, на основании законов Кирхгофа определяем токи в остальных ветвях:  $I_4 = 4,11$  а;  $I_5 = 3,76$  а;  $I_6 = 2,75$  а;  $I_7 = 2,19$  а;  $I_8 = 1,91$  а,  $I_9 = 0,72$  а и  $I_{10} = 3,83$  а.

#### Литература

1. Э. А. Меерович. К расчету нелинейных цепей, Электричество, № 9, 1951.
2. П. А. Ионкин. Схема замещения и круговая диаграмма активного четырехполюсника. Электричество, № 10, 1951.
3. Под редакцией К. А. Круга. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1952.
4. А. В. Нетушил. О применении принципа наложения при расчете нелинейных цепей. Электричество, № 8, 1950.

[22. 12. 1952]



# Расчет токов и напряжений в цепях с безинерционными нелинейными элементами

Доктор техн. наук, проф. Р. А. ВОРОНОВ

Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта

В предыдущей статье [Л. 1] было показано решение задачи о распределении токов в цепях с нелинейными элементами, обладающими тепловой инерцией. Путем проведения предварительного приближенного расчета и последующего введения поправок можно с достаточной для практики точностью просто и быстро получать значения токов и напряжений всех ветвей цепи как при одном, так и при нескольких нелинейных элементах. Для введения поправок используется обычная вольтамперная характеристика, дающая связь между действующими значениями тока и напряжения нелинейного элемента.

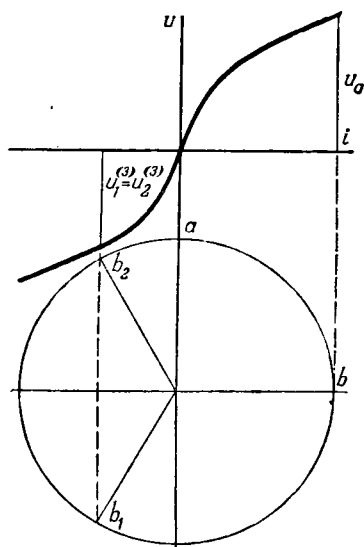


Рис. 1. Основная вольтамперная характеристика активного нелинейного элемента.

При наличии безинерционных нелинейных элементов расчет осложняется тем, что все токи и напряжения цепи будут уже несинусоидальными даже при синусоидальном напряжении сети. В ряде случаев можно пренебречь появлением такой несинусоидальности и использовать для расчета тот же метод, проводя его непосредственно для действующих значений, но сравнительно хорошая точность результата может быть при этом только тогда, когда появляющиеся гармонические составляющие токов невелики.

Рассматривается распространение метода поправок на случай расчета цепи с безинерционными нелинейными элементами. При сделанных допущениях возможно проведение достаточно точных расчетов всех гармонических составляющих, что дает все необходимые данные для определения действующих значений токов и напряжений и для построения их в виде кривых. В статье приведен простейший случай, когда нелинейные элементы имеют симметричные характеристики без резких перегибов.

Гораздо удобнее и точнее продолжить дальнейшее введение поправок, найдя значение всех гармонических составляющих, и уже по ним определить действующие значения токов и напряжений. При этом возможно также опреде-

ление взаимных сдвигов между отдельными составляющими, что позволяет записать полученные значения в виде рядов или построить плоские диаграммы для токов, напряжений и мощностей.

Введением поправок можно получить значения всех гармонических составляющих при любых нелинейных элементах, но в настоящей статье рассмотрен лишь наиболее простой случай, когда у нелинейного элемента имеется вольтамперная характеристика для мгновенных значений тока и напряжения, симметричная для обоих полупериодов и не содержащая резких перегибов и разрывов. При таких характеристиках достаточно введение одной только группы поправок, дающих уже достаточную точность для всех составляющих.

При симметричных вольтамперных характеристиках для мгновенных значений в ветвях цепей могут возникать гармонические составляющие только нечетных порядков. Если при этом характеристика не имеет резких перегибов (например, подобно приведенной на рис. 1), то можно ввести предположение о том, что появление или изменение высших гармонических составляющих тока в нелинейном элементе не оказывает влияния на величину основной составляющей и что гармонические составляющие не влияют друг на друга. Это соответствует инерционности нелинейного элемента (т. е. постоянству его сопротивления, индуктивности или емкости в течение всего периода) для всех высших гармоник при безинерционности для основной составляющей.

Конечно, такое предположение является лишь приближенным, так как в действительности изменение величины любой из гармоник тока нелинейного элемента обязательно будет влиять на значения основной составляющей и всех остальных гармоник, но при таких характеристиках это влияние очень мало и получающиеся при таком допущении ошибки почти не сказываются на окончательный результат.

Введение такого предположения позволяет проводить для основных составляющих расчет

тем же путем, как это делалось для цепей с активными нелинейными элементами, обладающими большой тепловой инерцией [Л. 1]. Так как появление высших гармонических составляющих не должно влиять на значение основных составляющих, то полученные значения для них будут окончательными и дальнейших поправок вводить не требуется. Расчет следует проводить по специальным вольтамперным характеристикам, дающим для нелинейных элементов связь между максимальными (или действующими) значениями пропускаемого синусоидального тока и максимальными (или действующими) значениями основной составляющей напряжения, получающимися при этом на их зажимах.

Если нелинейный элемент — реактивный, то при расчете по уравнениям (11—14) [Л. 1] следует учитывать вызываемый им сдвиг фаз  $\varphi_n$ .

Такому режиму с синусоидальным током в нелинейном элементе будет соответствовать несинусоидальное напряжение на его зажимах, несинусоидальные токи во всех других ветвях цепи и несинусоидальное напряжение сети. Определение всех гармонических составляющих напряжения на линейном элементе должно проводиться по специальным характеристикам, дающим связь между значениями этих составляющих и значением проходящего синусоидального тока.

Если в действительности приложенное напряжение сети синусоидально, т. е. не содержит никаких гармонических составляющих, то в цепи должно произойти их перераспределение. При принятом предположении о независимости отдельных составляющих можно в каждую из них ввести поправку независимо от других. Для этого найденные по характеристикам гармонические составляющие напряжения на нелинейном элементе следует принять за появляющиеся в нем дополнительные э. д. с. соответствующих частот и рассчитать все составляющие токов в режиме обратного короткого замыкания. Полученные значения гармоник следует сложить с основными составляющими, что и даст искомые величины действующих значений всех токов и напряжений цепи. Так как при этом расчете легко найти все взаимные сдвиги между составляющими, то можно построить их на одной общей диаграмме и, сложив, получить общую кривую тока или напряжения.

Получение вольтамперных характеристик для максимальных (или действующих) значений всех составляющих напряжения на нелинейном элементе при пропускании через него синусоидального тока может быть произведено путем специальных измерений или же путем анализа основной характеристики для мгновенных значений. Не рассматривая в настоящей статье первого метода, остановимся на построении их по последнему методу. Для этого особенно удобным оказывается проведение графоаналитического анализа, основанного на использовании широко известного метода, предложенного П. Л. Чебышевым, не требующего предварительного построения самих периодических кривых напряжения.

Под симметричной характеристикой для мгновенных значений необходимо построить окружность с радиусом, равным в масштабе максимальному значению пропускаемого синусоидального тока (рис. 1). Считая начало периода совпадающим с переходом тока через нулевое значение (точка  $a$  окружности), получим переход через нуль напряжения в тот же момент времени. Из-за симметрии характеристики в напряжении будут содержаться только синусоидальные составляющие высших гармоник, которые переходят через нуль также в начале периода.

Для определения этих составляющих нужно отступить от начала периода на одну четверть и провести затем деление периода на соответствующее число равных частей. Беря за основу точку  $b$ , находим при делении окружности на три равные части еще две точки  $b_1^{(3)}$  и  $b_2^{(3)}$ . Измеряя соответствующие им ординаты характеристики, получим мгновенные значения кривой напряжения, для которых можно написать соотношение

$$3(-U_{m3} + U_{m2} - \dots) = u_0 + 2u_1^3.$$

Проведя подобное же деление от точки  $b$  на пять частей и беря соответствующие ординаты, получим соотношение

$$5(U_{m5} - U_{m15} + \dots) = u_0 + 2u_1^{(5)} + 2u_2^{(5)}$$

и так далее для всех составляющих до того порядка, которым намечено ограничиться.

Из этих соотношений легко определяются значения всех составляющих напряжения  $U_{m3}$ ,  $U_{m5}$ ,  $U_{m7}$  и т. д., основная же составляющая получится из соотношения

$$U_{m1} - U_{m3} + U_{m5} - U_{m7} + \dots = u_0.$$

Для симметричной характеристики достаточно взять только одну ее ветвь и построить четверть окружности так, как это сделано на рис. 2. На этой окружности нанесены точки, соответствующие делению всей окружности на 3, 5 и 7 частей, с указанием около них, к какой ветви они относятся (следует ли их брать с плюсом или с минусом).

Беря соответствующие ординаты кривой (на рис. 2 показано для деления окружности на 5 частей) и ограничиваясь получением составляющих только до 7-го порядка, можно найти их значения из соотношений

$$U_{m3} = -\frac{1}{3}(u_0 - 2u_1^{(3)}),$$

$$U_{m5} = \frac{1}{5}(u_0 - 2u_1^{(5)} + 2u_2^{(5)}),$$

$$U_{m7} = -\frac{1}{7}(u_0 - 2u_1^{(7)} + 2u_2^{(7)} - 2u_3^{(7)}),$$

$$U_{m1} = u_0 + U_{m3} - U_{m5} + U_{m7}.$$

Проведя окружность другим радиусом для нового значения тока и воспользовавшись теми же делениями, получим новые значения всех составляющих напряжения. Повторяя такие построения и вычисления, можно построить все характеристики. Подобные характеристики для составляющих, построенные по основной характеристике

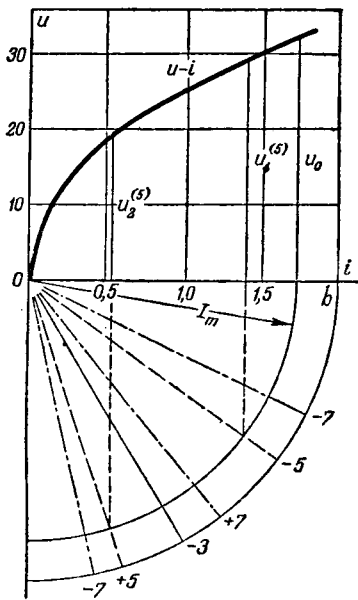


Рис. 2. Разложение основной характеристики на характеристики для гармонических составляющих напряжения при синусоидальном токе.

мгновенных значений рис. 1 и 2, приведены на рис. 3.

При индуктивном нелинейном элементе такое же разложение проводится для безгистерезисной характеристики мгновенных значений  $\psi - i$ , что дает максимальные значения составляющих потокосцепления  $\Psi_{m1}$ ,  $\Psi_{m3}$ ,  $\Psi_{m5}$  и т. д. в зависимости от максимального значения тока  $I_m$ . Так как напряжение связано с потокосцеплением зависимостью

$$u = \frac{d\psi}{dt},$$

то для каждой из составляющих максимальное значение напряжения найдется из соотношения

$$U_{mn} = \Psi_{mn} n\omega,$$

где  $n$  — порядок составляющей. Эти составляющие будут опережать потокосцепление на четверть соответствующего периода, что нужно иметь в виду при построении кривых.

Для емкостного нелинейного элемента подобное же разложение следует провести для безгистерезисной характеристики мгновенных значений напряжения  $u$  и зарядов  $q$ , заменяя максимальные значения тока  $I_m$  на максимальные значения зарядов по соотношению

$$Q_m = \frac{I_m}{\omega}.$$

При построении кривых следует учитывать отставание зарядов от тока на четверть периода.

При введении поправок на появление гармонических составляющих необходимо знать соответствующее им значение сопротивления самого нелинейного элемента. При принятом условии независимости составляющих эти сопротивления будут в течение периода постоянными для каждой

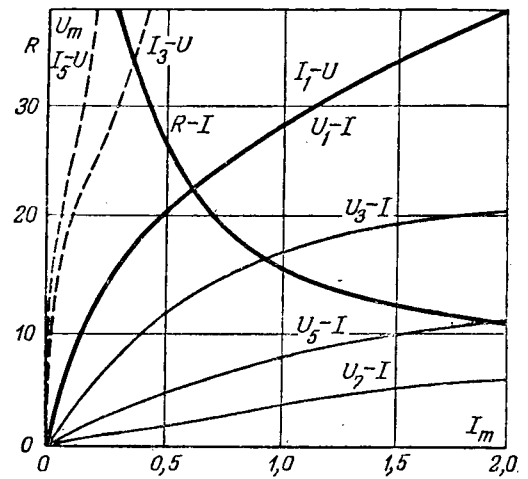


Рис. 3. Характеристики для максимальных значений тока и напряжения гармоник и для сопротивления для гармоник (масштаб напряжения для кривых  $U_3-I$ ,  $U_5-I$  и  $U_7-I$  увеличен в полтора раза).

из гармоник, являясь некоторыми средними значениями динамических сопротивлений. Определение их значений может быть проведено по характеристикам для составляющих тока при синусоидальном напряжении на зажимах нелинейного элемента.

Проводя окружность на оси напряжения и беря ее радиус равным в масштабе максимальному значению приложенного напряжения, можно найти все составляющие для тока, который будет при этом несинусоидальным. Найденная при этом характеристика  $I_{m1}-U_m$  для основной составляющей практически не будет отличаться от полученной ранее характеристики  $U_{m1}-I_m$  и может быть с ней совмещена. Характеристики для остальных составляющих тока показаны на рис. 3.

Появление этих составляющих тока может рассматриваться как наложение на синусоидальный ток дополнительных токов, создаваемых э. д. с. отдельных гармоник в режиме обратного короткого замыкания. Так как в этом случае в цепи имеется только нелинейный элемент, то его сопротивление для каждой из гармоник должно равняться:

$$R_3 = \frac{U_{m3}}{I_{m3}}; R_5 = \frac{U_{m5}}{I_{m5}}; R_7 = \frac{U_{m7}}{I_{m7}}.$$

Эти сопротивления почти не будут отличаться друг от друга и для расчетов может быть принято одно значение, взятое для составляющей третьего порядка.

Для индуктивного нелинейного элемента такое же разложение следует провести для синусоидального потокосцепления, определяемого по соотношению

$$\Psi_m = \frac{U_m}{\omega}.$$

Найденные при этом внутренние сопротивления

$$X_3 = L_3 3\omega; X_5 = L_5 5\omega; X_7 = L_7 7\omega,$$

будут приблизительно пропорциональными порядку гармоники, что соответствует почти одинаковым значениям индуктивностей  $L_3$ ,  $L_5$  и  $L_7$ . Это позволяет находить сопротивление или индуктивность только для составляющей третьего порядка, пересчитывая сопротивления для остальных составляющих по частоте

Для емкостного нелинейного элемента следует для синусоидального напряжения найти максимальные значения составляющих зарядов  $Q_{m3}$ ,  $Q_{m5}$  и  $Q_{m7}$  с последующим переходом к составляющим токам по соотношениям

$$I_{mn} = Q_{mn} n \omega.$$

Найденные при этом сопротивления

$$X_3 = \frac{1}{C_3 3 \omega}; \quad X_5 = \frac{1}{C_5 5 \omega}; \quad X_7 = \frac{1}{C_7 7 \omega}$$

почти точно обратно пропорциональны порядку гармоники, что соответствует весьма близким значениям емкостей  $C_3$ ,  $C_5$  и  $C_7$ . Это позволяет находить сопротивление только для третьей составляющей, пересчитывая их для остальных гармоник по частоте.

Если в цепи содержится несколько нелинейных элементов, то, проведя расчет на основную составляющую токов и найдя все соответствующие внутренние напряжения (э. д. с.) гармоник, следует рассчитать получающиеся гармоники токов при их совместном действии. Конечно, следует учесть взаимные сдвиги фаз между напряжениями одинаковых гармоник для всех элементов.

Если напряжение сети несинусоидально, то предварительный расчет следует провести только на его основную составляющую, а все гармонические составляющие учесть при расчете соответствующих гармоник тока.

Реактивные нелинейные элементы всегда обладают большим или меньшим гистерезисом, т. е. их исходная характеристика для мгновенных значений имеет форму петли. Можно провести анализ составляющих непосредственно по такой петле, но при этом встречается ряд затруднений. При анализе придется искать как составляющие с синусами, так и с косинусами, иметь дело с рядом различных переменных углов сдвига фаз и т. д. Гораздо удобнее для такого элемента отделять активную и реактивную части, беря отдельно безгистерезисную кривую и петлю потерь.

Такое разделение может быть проведено как по параллельной схеме соединения (реактивная и активная части элемента на эквивалентной схеме включены параллельно), так и по последовательной. Удобнее брать ту из них, которая дает более простые результаты. Так, для катушек со стальным сердечником лучше брать параллельную схему, а для конденсаторов — последовательную.

Для получения параллельной схемы для катушки следует брать полусумму мгновенных значений тока двух ветвей, соответствующих одному значению потокосцепления (рис. 4). По-

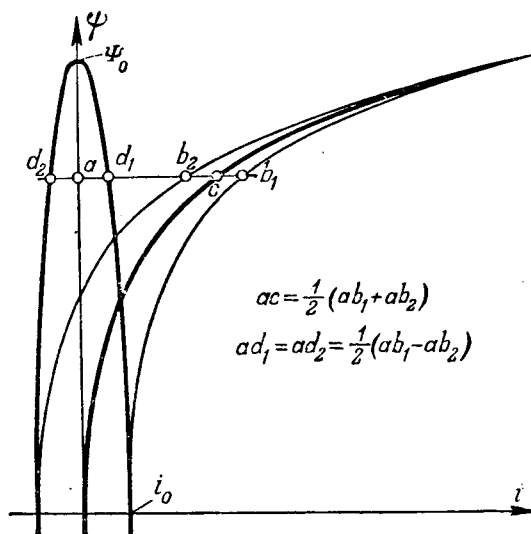


Рис. 4. Выделение безгистерезисной характеристики и петли потерь при параллельной схеме замещения для реактивного нелинейного элемента.

строенная по этим величинам кривая и будет являться безгистерезисной характеристикой. Разность между значениями тока ветвей петли и током безгистерезисной кривой (полуразность токов ветвей) определит петлю потерь, симметричную по отношению обеих осей. Подобным же путем проводится выделение безгистерезисной кривой и для емкостного элемента.

При разделении по последовательной схеме следует брать полусумму и полуразность мгновенных значений потокосцепления для катушек или напряжений для конденсаторов.

Если петля потерь близка по форме к эллипсу, то она будет соответствовать инерционному активному элементу, не вносящему дополнительных искажений в кривые тока и напряжения. Величина этого сопротивления легко определяется по полуосям эллипса  $\psi_0$  и  $i_0$  для катушки или  $u_0$  и  $q_0$  для конденсатора:

$$R_o = \frac{\psi_0 \omega}{i_0}; \quad R_o = \frac{u_0}{q_0 \omega}.$$

Если петля потерь не может быть принята за эллипс, то приходится рассматривать активный элемент безинерционным и находить для него все характеристики и сопротивления. Обычно к этому прибегать не требуется.

Продлав разложение для ряда петель гистерезиса, снятых при различных максимальных значениях, получим зависимость изменения  $R_o$  от тока или напряжения, что даст возможность построить для активной части вольтамперную характеристику и использовать ее затем для расчета. Безгистерезисную кривую для всех петель индуктивного элемента можно считать одинаковой, так что ее следует находить только для наибольшей петли.

В ряде случаев активная часть получает почти неизменное значение сопротивления, что позволяет считать ее линейной. Для катушек при парал-



лельной схеме это соответствует потерям в сердечнике, пропорциональным квадрату индукции, что обычно и может быть принято.

**Приложение.** В качестве примера приводим путь расчета токов и напряжений в цепи, составленной из активного нелинейного элемента, включенного последовательно с катушкой без стального сердечника. Нелинейный элемент имеет симметричную характеристику для мгновенных значений, половина которой приведена на рис. 2. В качестве такого нелинейного элемента взят мостиковый элемент от меднозакисного выпрямителя. Катушка имеет индуктивность 0,05 гн и активное сопротивление 12 ом. Напряжение сети синусоидально и равно 25 в. Частота 50 гц.

Путем графоаналитического анализа основной характеристики мгновенных значений получены характеристики для максимальных значений гармонических составляющих напряжения при синусоидальном токе и для максимальных значений гармонических составляющих при синусоидальном напряжении, а также характеристика изменения сопротив-

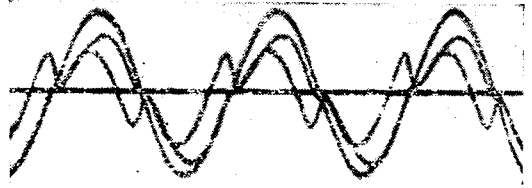


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на катушке и тока цепи.

ческих составляющих токов из режима обратного короткого замыкания цепи:

$$I_{1m} = 0,72 \angle 0^\circ,$$

$$I_{3m} = \frac{7,4}{(12 + 20,5) + j3 \cdot 15,7} = 0,13 \angle -55^\circ 20',$$

$$I_{5m} = \frac{3,0}{(12 + 20,5) + j5 \cdot 15,7} = 0,034 \angle -67^\circ 30'.$$

Напряжение на катушке будет иметь составляющие:

$$\dot{U}_{k1m} = 0,72 (12 + j15,7) = 14,2 \angle 34^\circ,$$

$$\dot{U}_{k3m} = 0,13 \angle -55^\circ 20' (12 + j3 \cdot 15,7) = 6,4 \angle 20^\circ 20',$$

$$\dot{U}_{k5m} = 0,034 \angle -67^\circ 30' (12 + j5 \cdot 15,7) = 2,7 \angle 13^\circ 50',$$

а напряжение на нелинейном элементе — составляющие:

$$\dot{U}_{нэ1m} = 0,72 \cdot 34,6 = 24,9 \angle 0^\circ,$$

$$\dot{U}_{нэ3m} = 0,13 \angle -55^\circ 20' \cdot 20,5 = 2,66 \angle -55^\circ 20',$$

$$\dot{U}_{нэ5m} = 0,034 \angle -67^\circ 30' \cdot 20,5 = 0,70 \angle -67^\circ 30'.$$

Действующие значения:

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{0,72^2 + 0,13^2 + 0,034^2} = 0,51 \text{ а},$$

$$U_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{14,2^2 + 6,4^2 + 2,7^2} = 10,35 \text{ в},$$

$$U_{нэ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{24,9^2 + 2,66^2 + 0,70^2} = 17,6 \text{ в}.$$

Сравнение с подсчетами, проведенными другими путями, показывает, что ошибки в найденных значениях не превосходят 1,5... 2,0%.

Принимая во внимание углы сдвига фаз для отдельных гармоник и помня, что они получены в режиме обратного короткого замыкания цепи, можно построить на плоской диаграмме ряд синусоид, а затем их просуммировать. Такое построение приведено на рис. 5 для напряжения на катушке, как наиболее отклоняющегося от синусоиды. Для сравнения была снята осциллограмма такой цепи (рис. 6).

#### Литература

1. Р. А. Воронов. Расчет цепей с нелинейными элементами методом поправок. Электричество, № 11, 1952.

[22. 12. 1952]

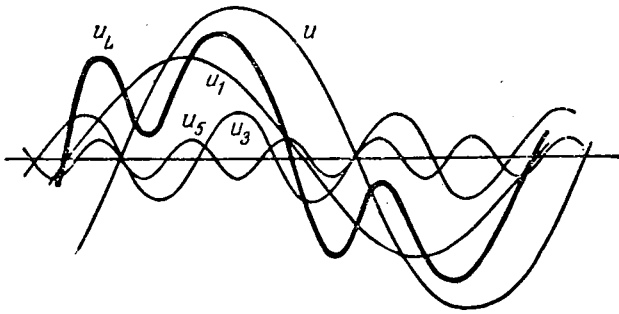


Рис. 5. Построение кривой напряжения на катушке по найденным гармоническим составляющим.

ления нелинейного элемента для гармонической составляющей третьего порядка в зависимости от проходящего синусоидального тока. Все эти характеристики представлены на рис. 3.

Задаваясь произвольным значением сопротивления нелинейного элемента и вычисляя получающиеся при этом токи и напряжения, вводим затем поправки в них, используя характеристику  $U_1 - I$  рис. 3. Найденные значения могут быть приняты за истинные значения основных составляющих напряжений и токов:

$$I_{1m} = 0,72 \text{ а}, U_{1m} = 24,9 \text{ в}, Z_{нэ1} = 34,6 \text{ ом}.$$

По характеристикам рис. 3 находим для тока 0,72 а основной составляющей значения напряжений гармонических составляющих и сопротивления нелинейного элемента для них:

$$U_{3m} = 7,4 \text{ в}, U_{5m} = 3,0 \text{ в}, Z_{нэ3} = 20,5 \text{ ом}.$$

Ограничиваясь определением только до составляющих пятого порядка, находим величины возникающих гармони-



# Природа обратного тока в ионном вентиле при высоком обратном напряжении

Доктор физ.-матем. наук, проф. В. Л. ГРАНОВСКИЙ и инж. И. А. ЛУКАЦКАЯ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

**Постановка задачи.** Обратный ток на анод<sup>1</sup> в ионном вентиле, вообще говоря, может состоять из следующих слагаемых: 1) тока ионов, оставшихся от предшествующей дуги («ток деионизации»); 2) тока ионов, диффундирующих от других дуг, горящих в том же сосуде — дуги возбуждения, дуг на другие аноды («ток диффузии»); 3) тока новых ионов и свободных электронов, образующихся в обратный полупериод («ток новой ионизации»); 4) тока смещения, обусловленного нарастанием обратного напряжения. В пределах слоя положительного пространственного заряда эта компонента действительно является током смещения, а в остальном разрядном промежутке — электронным током [Л. 1...5].

Опыт показывает, что отношение  $\frac{(I_o)_{\max}}{(I_{np})_{\max}}$ , где  $I_o$  — обратный ток<sup>2</sup>,  $I_{np}$  — прямой ток, возрастает одновременно с увеличением напряжения, приложенного к вентилу. Этот факт вызывает следующие два вопроса:

1. Во многих отношениях важно не столько максимальное значение обратного тока, сколько полное количество ионов  $N_o$ , попадающих на анод в обратную часть периода<sup>3</sup>.

Если обратный ток всецело ионный, то

$$Q_o = N_o e = \int_0^{T_o} I_o dt.$$

Возникает вопрос, как должна меняться величина  $Q_o$  с ростом обратного напряжения ( $I_o$ ).

Плотность обратного тока

$$j_o = \frac{1}{4} \dot{e} n_p \bar{v}_p + \dot{e} n_p \frac{d\delta}{dt},$$

где  $n_p$  — концентрация положительных ионов;  $\bar{v}_p$  — их средняя хаотическая скорость в остаточ-

<sup>1</sup> В статье электроды именуются по их назначению в проводящую часть периода: анодом называют электрод, отрицательный в обратном полупериоде.

<sup>2</sup> Индекс  $o$  обозначает величины, относящиеся к обратной части периода.

<sup>3</sup> Величина  $N_o$  важна не только как физическая характеристика плазмы в обратную часть периода, но и как техническая характеристика обратных токов; вредные действия обратного тока определяются в основном именно этой величиной.

Исследована интегральная величина обратного тока в экспериментальной трубке специальной конструкции при наполнении ее парами ртути, неона или водородом и при напряжении от 0,3 до 20 кв. Результаты исследования показывают, в каких условиях в обратном полупериоде наблюдаются: 1) значительная новая ионизация газа и 2) объемная рекомбинация ионов.

ной плазме;  $\delta$  — толщина слоя положительных зарядов у анода [Л. 1]. Так называемая «статическая слагающая»  $\frac{1}{4} e n_p \bar{v}_p$

не зависит от обратного

напряжения. Величина так называемой «динамической слагающей»  $e n_p \frac{d\delta}{dt}$  определяется скоростью расширения прианодного слоя  $\frac{d\delta}{dt}$ . Чем

выше  $U_o$ , тем быстрее распространится этот слой на весь объем внутри вентиле и потому раньше закончится процесс деионизации. Поэтому если в течение обратной части периода не происходит новой ионизации газа, то можно ожидать, что с ростом  $U_o$  длительность прохождения тока  $I_o$  должна падать.

Интегральная величина  $Q_o = \int_0^{T_o} I_o dt$  опреде-

ляется количеством ионов, нейтрализуемых именно на аноде, а не на стенках. Чем быстрее расширяется прианодный слой, тем большая часть ионов вытягивается к аноду и тем меньшая часть их успевает продиффундировать к стенкам ионного прибора. Поэтому можно ожидать, что с ростом  $U_o$  величина  $Q_o$  должна несколько расти, но меньше, чем  $I_o$ . Если же создать условия, при которых все положительные ионы отдают свой заряд в цепь анода, то в отсутствие новой ионизации  $Q_o$  вовсе не должно зависеть от обратного напряжения.

Правильность этих предположений должен показать опыт.

2. Правильно ли обычное представление об обратном токе, как о потоке ионов, оставшихся от предыдущего прямого тока?

При высоком обратном напряжении обратный ток может состоять не только из остаточных ионов, но и из ионов, возникших в продолжение обратной части периода, а также из вторичных электронов, выбитых из анода ударами положительных ионов.

Этот вопрос представляет практическое значение, так как появление новой ионизации усили-

вает все вредные действия обратных токов, и нужно знать условия, при которых эта ионизация может возникать в значительных количествах.

Описываемый ниже метод позволяет ответить на эти вопросы. Помимо этого, он дает также материал для суждения о том, как происходит процесс исчезновения ионов в данном вентиле — на стенках и электродах (поверхностная рекомбинация) или в самом газе (объемная рекомбинация).

**Методика исследования.** *Принцип решения задачи.* Решение возможно путем измерения полного заряда ионов, как оставшихся в газе после прекращения дуги, так и возникших в результате новой ионизации; этот заряд должен быть измерен при различных обратных напряжениях, но при неизменной по величине и форме кривой прямого тока и неизменном давлении газа. Измерение этого заряда можно произвести путем осциллографирования обратного тока  $I_o(t)$  в вентиле такой конструкции, при которой все (или почти все) ионы отдавали бы свой заряд в анодную цепь.

В этом случае интеграл  $Q_o = \int_0^{T_o} I_o dt$  равен пол-

ному заряду ионов, находившихся в объеме прибора в обратную часть периода. При осциллографической записи кривой  $I_o = f(t)$  величину  $Q_o$  можно найти графическим интегрированием.

**Экспериментальная трубка.** Для выполнения таких измерений необходимо, чтобы вентиль удовлетворял двум условиям.

1. Все ионы, как остающиеся от прямого тока, так и возникающие в обратную часть периода, должны улавливаться электродами, находящимися под отрицательным напряжением и выводы которых независимы. Это значит, что поверхности остальных

электродов и деионизирующих тел, на которых может рекомбинировать (и потому не сказываться во внешней цепи) часть зарядов обоих знаков, должны быть значительно меньше площади электродов, находящихся под высоким отрицательным напряжением.

2. Для обеспечения исследования обратных токов при высоких напряжениях прибор должен обладать большой вентильной прочностью.

Этим условиям удовлетворяла экспериментальная трубка типа экранированного газотрона (рис. 1).

Катод трубки — накаливаемый, оксидный, с теп-

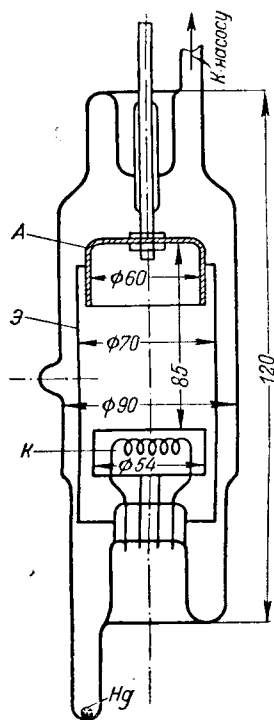


Рис. 1. Экспериментальная трубка  
А — анод; Э — экран; К — катод.

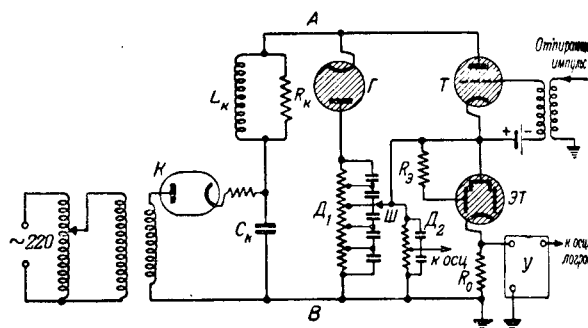


Рис. 2. Схема питания экспериментальной трубки.  
ЭТ — экспериментальная трубка; Т — вспомогательный тиратрон; Г — вспомогательный газотрон; У — усилитель;  $D_1$  — задающий делитель обратного напряжения;  $D_2$  — измерительный делитель напряжения;  $R_3$  — сопротивление 100 ом, включаемое между анодом и экраном экспериментальной трубки;  $R_0$  — шунт для измерения обратного тока;  $L_k$ ,  $C_k$  — индуктивность и емкость колебательного контура; К — рядный кенотрон.

ловым экраном. Разрядный промежуток между катодом и анодом окружен металлическим экраном с отдельным выводом, который через сопротивление в 100 ом присоединялся к цепи анода. Таким образом, все ионы, имеющиеся в разрядном промежутке в обратной части периода и попадающие либо на анод либо на экран, отдают свой заряд в анодную цепь.

Конструкция трубки почти исключает рекомбинацию на стенках колбы (рис. 1). Деионизирующие поверхности анода и экрана вместе в 10 раз больше, чем деионизирующая поверхность катода, обращенная к разрядному промежутку. Таким образом, при низких обратных напряжениях ( $U_o < 1$  кВ) на катоде может рекомбинировать лишь небольшая доля всех оставшихся зарядов, примерно 10%; остальные ионы отдают свои заряды в анодную цепь. В соответствии с вышеприведенными соображениями, с повышением обратного напряжения доля зарядов, рекомбинирующих на катоде, должна еще уменьшаться.

Опыты проводились в парах ртути, неона и водороде. Для исследований в парах Hg в нижней части трубки помещался отросток с каплей ртути, который погружался в водяную ванну. Давление паров ртути регулировалось изменением температуры воды. Остальная часть трубки и прилежащие части вакуумной установки (трубка не отпаивалась) с помощью специальных обогревателей поддерживались при более высокой температуре. Наоборот, при опытах в Ne и H<sub>2</sub> пары ртути вымораживались из трубки с помощью ловушки, погруженной в жидкий азот.

**Питание трубки.** Трубка питалась от импульсной схемы Менделеева (рис. 2), описанной в [Л. 7] и представляющей собой развитие известной импульсной схемы А. А. Горева с перезаряжающимся конденсатором. Конденсатор  $C_k$ , заряжаемый через кенотрон К до напряжения  $U$ , после подачи отпирающего импульса на сетку вспомогательного тиратрона Т перезаряжается через катушку  $L_k$ , тиратрон Т и экспериментальную трубку ЭТ. После прекращения тока через Т и ЭТ обратное напряжение оказывается прило-

женным между  $A$  и  $B$ ; вследствие этого зажигается вентиль  $\Gamma$ , и обратное напряжение ложится на задающий делитель  $D_1$ ; часть этого напряжения, определяемая положением переключателя  $\Pi$ , подается на  $\mathcal{E}T$ . Изменяя положение  $\Pi$  при неизменных  $C_k$ ,  $L_k$  и  $U$ , можно менять  $U_o$  при неизменной кривой прямого тока.  $R_k$  — сопротивление, демпфирующее паразитные колебания более высоких частот. Делитель обратного напряжения  $D_1$  был изготовлен омическо-емкостным, из пяти секций.

Измерение обратного тока производилось по методу, описанному в [Л. 4]. В цепь  $\mathcal{E}T$  включалось малоиндуктивное сопротивление  $R_o$ , напряжение на котором усиливалось электронным усилителем и записывалось электронным осциллографом. Шунт  $R_o$  состоит из двух коаксиальных цилиндров<sup>4</sup> сопротивлением в 4,5 ом. Усилитель — однокаскадный с лампой 6AG7; коэффициент усиления  $k=32$ , полосу пропускания 0,25...12000 кгц. Усиленное напряжение подавалось на одну пару пластин 1,5 кв двухлучевого осциллографа. Обратное напряжение наблюдалось этим же осциллографом. Перед подачей на пластины осциллографа это напряжение делилось измерительным емкостно-омическим делителем  $D_2$  в отношении 115:1.

При осциллографировании применялась ждущая развертка со скоростью 400 м/сек. В качестве масштаба времени использовались свободные затухающие колебания специального контура. Для синхронизации наблюдаемых явлений с разверткой и масштабом времени как развертка, так и масштаб времени запускались от того же импульса, что и схема питания.

**Предварительные опыты.** Для проверки целесообразности предлагаемого метода и типа экспериментальной трубки были получены и обработаны несколько серий осциллограмм обратных токов и напряжений (при наполнении трубки парами ртути определенного давления, неизменном прямом токе и различных обратных напряжениях), снятых двумя способами: а) экранирующий цилиндр соединен с анодом через сопротивление  $R=100$  ом, б) цилиндр изолирован от анода.

Оказалось, что анод без экрана улавливает только часть ионов; так, в одной серии опытов было найдено, что при  $U_o=1$  кв анод улавливает 50% ионов, при  $U_o=14$  кв — 70%. Далее,  $Q_o$ , вычисленное по току только на анод (способ б), при изменении  $U_o$  от 1 до 14 кв возрастало на 150%. В то же время  $Q_o$ , вычисленное по току на анод и экран (способ а), изменялось относительно вдвое меньше — на 70%. Эти результаты указывают на целесообразность измерения  $Q_o$  по суммарному току анода и экрана.

**Результаты измерений.** Измерения в парах ртути. На рис. 3 изображена серия осциллограмм обратных токов и напряжений, снятая при  $I_{\max}=20$  а и температуре охлаждающей воды 26°С ( $p=2,2$  мкм рт. ст.). Из осциллограмм

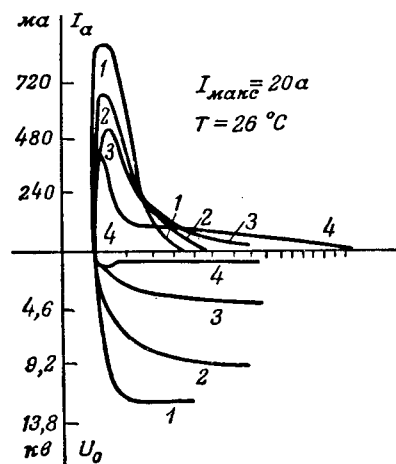


Рис. 3. Семейство осциллограмм обратного тока  $I_o$  и обратного напряжения  $U_o$  ( $I_{\max}=20$  а,  $T=26^\circ\text{C}$ ).

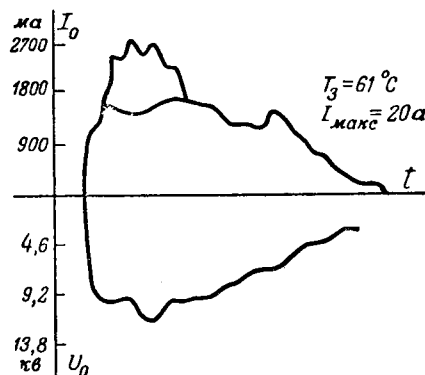


Рис. 4. Осциллограммы обратного тока  $I_o$  и обратного напряжения  $U_o$  при температуре воды 61°С.

видно, что с ростом обратного напряжения увеличивается пик обратного тока и уменьшается длительность  $I_o$ . Эти наблюдения подтверждают высказанные выше предположения. С увеличением давления ртутных паров длительность процесса деионизации и  $I_o$ , естественно, возрастают. При температуре водяной ванны 44°С и выше становится заметным рост пологой части кривой обратного тока по мере увеличения обратного напряжения. При температуре воды 61°С и выше и  $U_o > 1$  кв в непроводящую часть периода форма кривой обратного тока совершенно меняется (рис. 4).

Были сняты две серии таких осциллограмм. В первой серии обратное напряжение  $U_o$  изменялось от 0,5 до 12 кв, а температура воды, в которую был погружен отросток с каплей ртути, — от 26 до 61°С. Во второй серии  $U_o$  изменялось от 1 до 20 кв, а температура воды — от 23,5 до 45°С.

По этим осциллограммам были вычислены интегральные величины

$$Q_o = \int_0^{t_o} I_o dt.$$

<sup>4</sup> Шунт описан в [Л. 4].

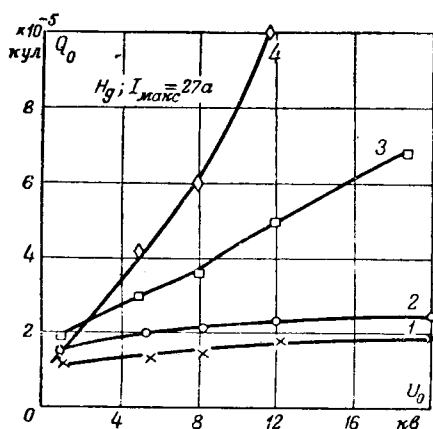


Рис. 5.  $Q_0$  в зависимости от  $U_0$  в парах Hg ( $I_{\max} = 27$  а).

1 — температура воды  $23,5^\circ\text{C}$ , давление ртути  $p = 1,7$  мм рт. ст.; 2 —  $30^\circ\text{C}$ ,  $p = 3,0$ ; 3 —  $40^\circ\text{C}$ ,  $p = 6,5$ ; 4 —  $45^\circ\text{C}$ ,  $p = 9,5$  мм рт. ст.

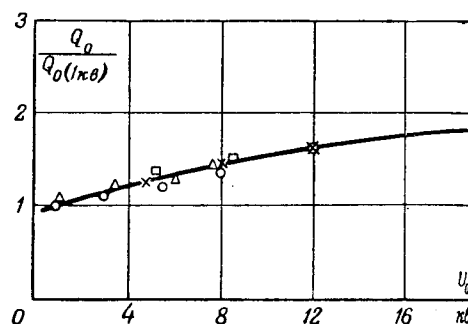
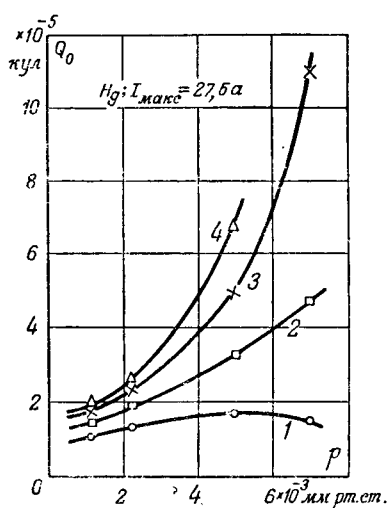


Рис. 7.  $\frac{Q_0(U)}{Q_0(U=1 \text{ кВ})} = f(U_0)$  при разных давлениях  $p$  и токах  $I_0$ .

Рис. 6.  $Q_0$  в зависимости от давления.

1 — температура воды  $23,5^\circ\text{C}$ , обратное напряжение  $U_0 = 1$  кВ; 2 —  $30^\circ$ ,  $U_0 = 6$ ; 3 —  $40^\circ$ ,  $U_0 = 12$ ; 4 —  $45^\circ\text{C}$ ,  $U_0 = 20$  кВ.

На рис. 5 приведена зависимость  $Q_0 = f(U_0)$  при  $I_{\max} = 27,5$  а. Аналогичный характер имеют кривые, полученные при обработке другой серии осциллограмм, поэтому мы их не приводим<sup>5</sup>.

Как видно из кривых рис. 5 при низких давлениях ртутных паров ( $T_{\text{воды}} \leq 35^\circ\text{C}$ )  $Q_0$  слабо растет с увеличением  $U_0$ ; с повышением давления ( $T_{\text{воды}} = 40^\circ\text{C}$  и выше)  $Q_0$  растет значительно круче. На рис. 6 приводим те же данные, рассматривая  $Q_0$  как функцию давления. Параметр кривых — обратное напряжение. При низком напряжении  $Q_0$  проходит через максимум при  $p = 4 \dots 5$  мм рт. ст.; затем падает; при более высоких напряжениях  $Q_0$  монотонно растет вместе с давлением.

Если вычислить и нанести на графике отношения  $Q_0$  при данном  $U_0$  к  $Q_0$  при  $U_0 \leq 1$  кВ для всех кривых, снятых при  $T_{\text{воды}} \leq 35^\circ\text{C}$  и при двух значениях тока ( $I_{\max} = 20$  и  $I_{\max} = 27,5$  а), то оказывается, что все точки ложатся на одну кривую (рис. 7). Следовательно, при этих условиях рост  $Q_0$  при повышении  $U_0$  не зависит ни от давления газа, ни от начальной концентрации остаточных ионов.

**Измерения в неоне и водороде.** В той же экспериментальной трубке были произведены измерения интегральной величины обратного тока  $Q_0$  в неоне и водороде. Перед опытами ртутные пары были удалены из трубки путем ее прогрева и прилежащих к ней частей вакуумной установки, включая ловушку, в электрической печи при температуре  $400^\circ\text{C}$ . До измерений ловушка, находящаяся перед экспериментальной трубкой, помещалась в сосуд Дюара с жидким азотом; трубка «промывалась» несколько раз соответствующим газом. Измерения проводились в диапазоне давлений от 15 до 30 мм рт. ст. при разрядном токе  $I_{\max} = 20$  а. Обратное напряжение изменялось от 1 до 12 кВ. Длительность импульса разрядного тока так же, как и в опытах с парами ртути 100 мксек.

На рис. 8 приведены зависимости  $Q_0 = f(U_0)$  в неоне. И в неоне  $Q_0$  увеличивается вместе с ростом обратного напряжения (рис. 8) тем сильнее, чем больше давление; при низком давлении ( $p = 12$  мм рт. ст.)  $Q_0$  мало зависит от напряжения. Аналогичные результаты были получены и в водороде.

**Обсуждение результатов.** 1) Кривые рис. 5 показывают, что при самых низких давлениях (пары ртути — до 4—5 мм)  $Q_0$  мало зависит от  $U_0$ : при изменении  $U_0$  от 0,3 до 20 кВ  $Q_0$  увеличивается всего в 1,6...1,8 раза. Следовательно, в этих условиях появление новых электронов и ионов в обратную часть периода незначительно: вплоть до напряжений в 20 кВ  $Q_0$  не превышает 60—80% остаточной ионизации. Небольшое возрастание  $Q_0$  является, однако, не кажущимся, а вполне реальным. Оно не обусловлено уменьшением доли зарядов, рекомбинирующих на катоде, так как этот фактор мог бы вызвать возрастание наблюдаемой величины  $Q_0$  не более чем на 10% (см. выше). Следовательно, на самом деле имеет место появление новых носителей заряда в обратную часть периода.

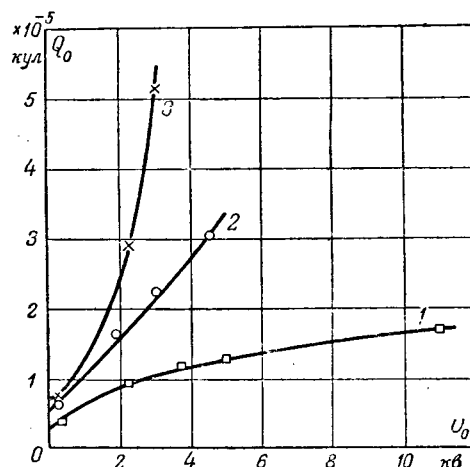


Рис. 8.  $Q_0$  в зависимости от  $U_0$  в неоне.

1 —  $p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.; 2 —  $p = 2 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.; 3 —  $p = 3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.

<sup>5</sup> Давления ртутных паров приведены к  $0^\circ\text{C}$ . Температура пара принималась равной  $70^\circ\text{C}$ .

Каково происхождение этой небольшой новой ионизации?

Если бы она возникла в результате ударной ионизации молекул газа электронами (объемная ионизация), то ее выход зависел бы от давления газа. Как показывает рис. 7, этого нет;  $Q_o$  одинаково растет с увеличением напряжения при разных давлениях, пока они не превышают 4...5 мм рт. ст. Следовательно, роль объемной ионизации в этих условиях незначительна. Причиной роста  $Q_o$  при повышении  $U_o$  является вторичная эмиссия электронов с анода и экрана под ударами положительных ионов, выход которой<sup>6</sup> при низком давлении газа не зависит от давления, но растет вместе с напряжением, обуславливающим увеличение энергии ионов, бомбардирующих анод.

2) При более высоких давлениях (в парах ртути выше 5 мм),  $Q_o$  растет с повышением  $U_o$  (рис. 5 и 8) и тем сильнее, чем выше давление. Это показывает, что в данных условиях имеет место значительная объемная ионизация газа в обратную часть периода. Ионизацию производят вторичные электроны, выбиваемые из анода положительными ионами и ускоряемые обратным напряжением, падающим в основном на слой объемного заряда у анода.

При дальнейшем повышении давления объемная ионизация газа в обратную часть периода становится настолько значительной, что меняет самую форму кривой обратного тока (рис. 4). Наконец, при еще более высоких давлениях она приводит к возникновению самостоятельного тока (тлеющего разряда) в каждый обратный полупериод.

3) Описанные выше наблюдения приводят также к некоторым выводам о процессе рекомбинации ионов в обратную часть периода.

Рассмотрим на рис. 6 ход кривой  $Q_o = f(p)$  при  $U_o = 1$  кВ. Если рекомбинация заряженных частиц в объеме газа отсутствует, то  $Q_o$  при  $U_o \leq 1$  кВ, когда новая ионизация еще незначительна, должна быть приблизительно равна полному заряду остаточных ионов:

$$Q_o = e \int n_{ост} dV,$$

где  $n_{ост}$  — концентрация остаточных ионов.

Как известно из теории плазмы стационарного разряда и экспериментальных исследований, с повышением давления концентрация заряженных частиц увеличивается; следовательно, должна увеличиваться и концентрация остаточных ионов [Л. 8].

<sup>6</sup> Так называемый коэффициент

$$\gamma = \frac{\text{ток вторичных электронов}}{\text{ток первичных ионов}}.$$

Наблюдающееся на опыте уменьшение  $Q_o$  при давлении  $p \geq 4,5$  мм рт. ст. можно объяснить рекомбинацией заряженных частиц в объеме газа. Увеличение концентрации заряженных частиц, более быстрое падение электронной температуры и замедление диффузии заряженных частиц к стенкам при повышении давления, очевидно, способствуют возрастанию роли рекомбинации в объеме газа в процессе деионизации. При  $U_o \geq 5-6$  кВ время распространения прианодного слоя на весь объем газа сокращается настолько, что объемная рекомбинация не успевает происходить в заметном масштабе; все ионы как остаточные, так и вновь возникающие нейтрализуются на аноде и экране.

**Выводы.** Интегральная величина обратного тока

$$Q_o = \int_0^{\tau_o} I_o dt$$

является характеристикой обратного тока, важной в физическом и техническом отношениях. Ее определение в различных условиях позволяет судить о процессах ионизации и рекомбинации в остаточной плазме.

Проведенные опыты показали, что при низком давлении газа (в ртутных парах — при  $p \leq 4-5$  мм рт. ст) и обратных напряжениях до 20 кВ обратный ток состоит в основном из тока остаточных ионов и тока вторичных электронов. При более высоких давлениях становится значительной новая объемная ионизация газа в непродолжительную часть периода. При еще более высоких давлениях она меняет не только величину, но и форму кривой обратного тока и, наконец, приводит к самостоятельному току в обратном направлении.

Рекомбинация ионов и электронов при низком обратном напряжении и низком давлении газа происходит в основном на стенках вентиля, при более высоком давлении — в самом газе (объемная рекомбинация). При высоком обратном напряжении ионы нейтрализуются в основном на электродах.

#### Литература

1. W. Koch, Zeit. f. techn. Phys. т. 17, стр. 446, 1936.
2. М. Габович. ЖТФ, т. 9, стр. 214, 1937.
3. Wasseraab Th. Wiss. Ver. Siemens, т. 19, 1940.
4. В. Л. Грановский, Е. Мерзлюхова. ЖТФ, т. 10, стр. 2022, 1940.
5. В. Л. Грановский и Л. Ревердатто. ЖТФ, т. 14, стр. 314, 1944.
6. В. Л. Грановский. Труды ВЭИ, вып. 41, 1940.
7. В. Л. Менделев, Л. Святоезерская. ЖТФ, т. 21, 1951.
8. В. Л. Грановский. ЖТФ, т. 22, стр. 3, 1952.

[5. 1. 1953]



# К обобщенной теории индукционных электроизмерительных приборов

Доктор техн. наук, проф. В. О. АРУТЮНОВ и кандидат техн. наук, доц. П. Н. ГОРЮНОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Индукционным называется такой измерительный механизм, в котором для перемещения подвижной части используется энергия магнитного поля системы, состоящей из одного или нескольких неподвижных контуров с током и контуров токов, индуцированных в подвижной части магнитными потоками неподвижных контуров.

В зависимости от числа неподвижных магнитных потоков, воздействующих на подвижную часть, индукционные измерительные механизмы делятся на две группы: однопоточные и многопоточные.

Индуктированные в подвижной части токи можно использовать различным путем, в зависимости от конструкции проводящих элементов подвижной части. В качестве таких элементов применяют обмотки, определенным образом расположенные в магнитном поле неподвижных контуров, или массивные проводящие диски и полые цилиндры.

Поскольку чаще всего подвижной частью индукционных приборов служит алюминиевый диск, ниже рассматривается действие переменных магнитных потоков, именно на такой диск. Однако ввиду общности основных положений теории методика и все выводы могут быть распространены и на другие конструкции подвижных частей.

**Однопоточные индукционные механизмы.** Пусть на диск  $A$  (рис. 1) действует один пере-

Дается теория как однопоточных, так и многопоточных индукционных приборов. Делаются необходимые принципиальные выводы и отмечаются особенности теории наиболее распространенного двухпоточного индукционного прибора. Теория двухпоточного электроизмерительного прибора может быть распространена и на родственную этим приборам группу индукционных реле.

менный магнитный поток  $\Phi_1$ . Окружность  $B$  представляет собой след полюса электромагнита  $C$ , по обмотке которого протекает переменный ток  $I_1$ . Магнитный поток  $\Phi_1$  индук-

тирует в диске токи  $I_2$ . Край диска при этом всегда представляет собой одну из линий тока в диске. Все линии тока симметричны относительно прямой, соединяющей центр диска с центром следа полюса.

Мгновенное значение действующей вдоль вертикали  $OX$  переменной силы

$$F_t = \frac{\partial W_t}{\partial x},$$

где  $W_t$  — мгновенное значение энергии системы;  $\partial x$  — бесконечно малое перемещение контура тока вдоль оси  $OX$ . Примем перемещение этого контура сверху вниз (рис. 1) за положительное.

Мгновенное значение энергии системы двух контуров токов  $i_1$  и  $i_2$ :

$$W_t = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 i_2;$$

здесь  $L_1$  и  $L_2$  — индуктивности цепей токов  $i_1$  и  $i_2$ ,  $M_{12}$  — взаимная индуктивность этих цепей.

Дифференцирование выражения энергии по перемещению  $x$  дает мгновенное значение силы:

$$F_t = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + i_2 \frac{\partial (M_{12} i_1)}{\partial x}.$$

При дифференцировании первый член выражения энергии обращается в нуль, так как  $L_1 = \text{const}$  и от перемещения контура тока  $i_2$  не зависит.

При  $\partial x > 0$ , т. е. при перемещении контура вторичного тока вниз,  $L_2$  и  $M_{12}$  возрастают, поэтому  $\frac{\partial L_2}{\partial x} > 0$  и  $\frac{\partial M_{12}}{\partial x} > 0$  и обе составляющие силы положительны.

Произведение  $M_{12} i_1$ , есть не что иное, как поток  $\Psi_{12}$ , сцепляющийся с контуром тока  $i_2$  и создающий в диске э. д. с.  $e_2$  и ток  $i_2$

$$M_{12} i_1 = \Psi_{12},$$

где  $\Psi_{12} = W_2 \Phi_{12}$ , причем  $\Phi_{12} = K_1 \Phi_1$ .

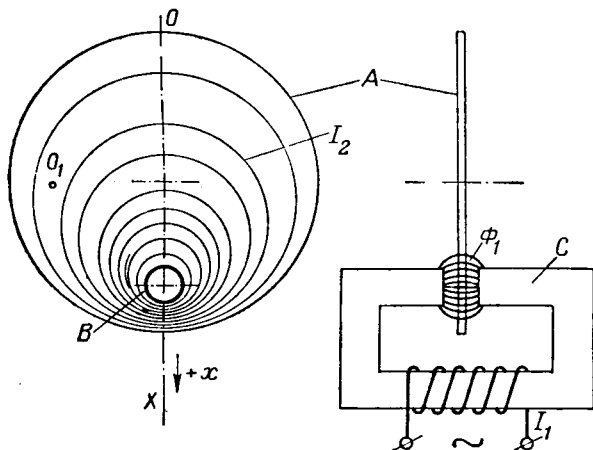


Рис. 1.

Можно написать:

$$F_t = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + i_2 \Psi_{12t} \frac{\partial \Psi_{12t}}{\Psi_{12t} \partial x};$$

здесь  $\frac{\partial \Psi_{12t}}{\Psi_{12t} \partial x}$  относительное изменение потока  $\Psi_{12}$ , приходящееся на единицу перемещения контура тока  $i_2$  вдоль оси  $OX$ . Оно не зависит от абсолютного значения потока  $\Psi_{12}$ , а определяется исключительно взаимным расположением диска и электромагнита, создающего поток  $\Psi_{12}$ . В частности, можно написать:

$$\frac{\partial \Psi_{12t}}{\Psi_{12t}} = \frac{\partial \Psi_{12}}{\Psi_{12}},$$

где  $\Psi_{12}$  — действующее значение потока, а  $\Psi_{12t}$  — мгновенное.

Полагая, что потоки и токи являются синусоидальными функциями времени, для среднего значения силы получим:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T F_t dt = \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + I_2 \Psi_{12} \cos(\angle I_2, \Psi_{12}) \frac{\partial \Psi_{12}}{\partial x \Psi_{12}}.$$

Электродвижущая сила в диске отстает от потока  $\Phi_1$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ , поэтому

$$\cos(\angle I_2, \Psi_{12}) = \cos(\angle I_2, \Phi_1) = -\sin \varphi_2 = -\frac{x_2}{z_2},$$

где  $x_2$  и  $z_2$  — соответственно реактивное и полное сопротивления цепи тока  $I_2$ .

Так как действующее значение тока

$$I_2 = \frac{\omega M_{12} I_1}{z_2} = \frac{\omega \Psi_{12}}{z_2}, \text{ а } \Psi_{12} = k_1 \Phi_1,$$

выражение для  $F$  можно представить в виде

$$F = -\frac{k_1^2 \Phi_1^2 \omega x_2}{z_2^2} \left[ \frac{\partial \Psi_{12}}{\Psi_{12} \partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{L_2 \partial x} \right].$$

Выражение в квадратных скобках всегда положительно, что видно из следующего:  $\Psi_{12} = M_{12} I_1 = I_1 k \sqrt{L_1 L_2}$ , где  $k$  — коэффициент связи:  $\ln \Psi_{12} = \ln I_1 + \ln k + \frac{1}{2} (\ln L_1 + \ln L_2)$ ; следовательно,

$$\frac{\partial \Psi_{12}}{\Psi_{12}} = \frac{\partial k}{k} + \frac{1}{2} \frac{\partial L_2}{L_2},$$

а

$$F = -k_1^2 \frac{\omega \Phi_1^2 x_2}{z_2^2} \left( \frac{\partial k}{k \partial x} \right).$$

Обозначив выражение в квадратных скобках, умноженное на  $k_1^2$ , через  $c$ , получим:

$$F = -c \omega \Phi_1^2 \frac{x_2}{z_2^2},$$

$c$  зависит от положения вторичного контура.

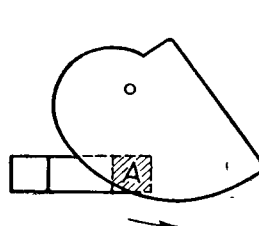


Рис. 2.

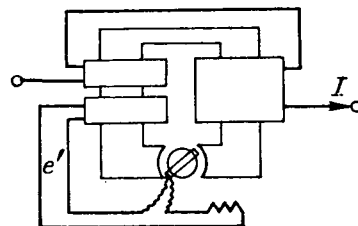


Рис. 3.

Из последнего выражения можно сделать следующие выводы:

1. Знак минус показывает, что сила  $F$  направлена к центру диска, иначе говоря, диск всегда выталкивается электромагнитом, так как  $x_2$  диска всегда положительно.

2. Сила  $F$  пропорциональна квадрату магнитного потока  $\Phi_1$  и, следовательно, квадрату тока  $I_1$ .

3. Сила  $F$  определяется индуктивным сопротивлением диска и равна нулю, если  $x_2 = 0$ ; когда сопротивление цепи вторичного тока имеет емкостный характер ( $x_2 < 0$ ), сила меняет знак. По этой причине было бы уместно назвать однопоточные индукционные приборы реактивными.

4. Сила  $F$  максимальна при  $r_2 = 0$ , а когда  $r_2 \neq 0$ , то  $x_2 = r_2$ .

5. Так как сила  $F$  направлена к центру диска, то при совпадении центра диска с центром полюса среднее значение силы равно нулю. Диск в этом случае находится в неустойчивом равновесии: достаточно его сдвинуть, чтобы он под действием силы  $F$  начал выталкиваться в том направлении, в каком был сдвинут. По этой причине ось подвижной части не может быть помещена в центре диска; она должна быть в стороне от него, например, в точке  $O_1$  (рис. 1).

На практике диску придают различные формы и этим добиваются определенной зависимости момента от угла поворота, и приближения шкалы прибора к равномерной (рис. 2).

7. Поскольку  $x_2$  диска мало, выгоднее воспользоваться подвижной рамкой, а не диском. Тогда, замыкая рамку на большее  $x_2$ , возможно увеличить момент. В этом случае легко воспользоваться ферродинамическим измерительным механизмом, замкнув рамку на индуктивное сопротивление (рис. 3). Как показывают исследования [Л. 7], если в цепь рамки ввести дополнительную э. д. с.  $e$  от вспомогательной обмотки (рис. 3), можно изменять характер шкалы, приближая ее к равномерной. Вместе с тем увеличение  $x_2$  приводит к уменьшению влияния частоты, которое при малых  $x_2$  пропорционально квадрату частоты.

При больших же  $x_2$ , когда  $x_2 \gg r_2$ , выражение силы примет следующий вид:

$$F = -c \frac{\Phi_1^2}{L_2}.$$

**Многopotочные индукционные механизмы.** Рассмотрим действие на диск двух магнитных



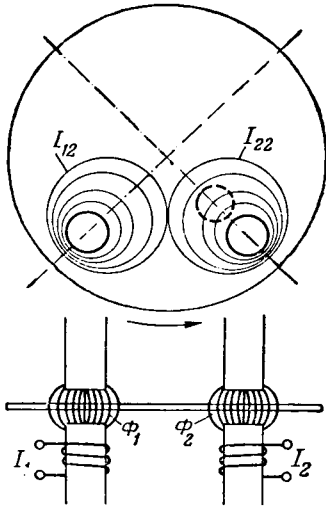


Рис. 4.

потоков (рис. 4). Предполагается, что полюса симметрично расположены относительно вертикали.

Очевидно, линии токов, индуцированных потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в диске, симметричны относительно прямых, соединяющих центр диска с центрами следов электромагнитов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ .

Мгновенное значение энергии четырех контуров токов в устройстве, показанном на рис. 4, в общем случае можно представить в виде суммы 10 членов:

$$W_t = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + i_1 i_2 M_{12} + i_{12} i_{22} M_{12,22} + \\ + \frac{1}{2} i_{12}^2 L_{12} + \frac{1}{2} i_{22}^2 L_{22} + i_1 i_{12} M_{1,12} + \\ + i_2 i_{22} M_{2,22} + i_1 i_{22} M_{1,22} + i_2 i_{12} M_{2,12};$$

здесь  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M_{12}$  — индуктивности и взаимноиндуктивности неподвижных контуров токов  $i_1$  и  $i_2$ ;  $L_{12}$ ,  $L_{22}$ ,  $M_{12,22}$  — то же подвижных контуров  $i_{12}$  и  $i_{22}$ ;  $M_{1,12}$  и  $M_{2,22}$  — взаимноиндуктивности контуров токов  $i_1$  и  $i_2$  с контурами токов, ими же индуцированных в диске, и наконец,  $M_{1,22}$ ,  $M_{2,12}$  — взаимноиндуктивности контуров токов, соответственно,  $i_1$  и  $i_{22}$ , а также  $i_2$  и  $i_{12}$ .

Полагая, что ось вращения находится в центре диска, мы должны искать такие силы, которые создавали бы вращающие моменты. Для этого надо взять производную от энергии  $W_t$  по углу поворота диска:

$$D_t = \frac{\partial W}{\partial \alpha}.$$

При этом можно установить следующее:

а) члены первой строки выражения  $W_t$  при дифференцировании дадут нуль, так как  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M_{12}$  и  $M_{12,22}$  от угла поворота подвижных контуров не зависят;

б) члены второй строки дают силы, направленные к центру диска; это направление всегда

остается таким же и при повороте диска вокруг центра; поэтому момент сил равен нулю.

Остается третья строка, которая дает:

$$D_t = i_{22} \frac{\partial (i_1 M_{1,22})}{\partial \alpha} + i_{12} \frac{\partial (i_2 M_{2,12})}{\partial \alpha}.$$

Произведение  $i_1 M_{1,22}$  есть часть потока  $\Phi_{12}$ , сцепляющаяся с контуром тока  $i_{22}$ , а произведение  $i_2 M_{2,12}$  — часть потока  $\Phi_{21}$ , сцепляющаяся с контуром тока  $i_{12}$ , поэтому

$$i_1 M_{1,22} = k_1 \Phi_{12},$$

$$i_2 M_{2,12} = k_2 \Phi_{21}.$$

Из условий симметрии следует, что при повороте контуров тока вправо (положительное направление поворота, когда  $\partial \alpha > 0$ , рис. 4)  $k_1$  уменьшается, так как контур тока  $i_{22}$  удаляется от потока  $\Phi_{12}$ , а  $k_2$  в такой же мере растет, так как контур тока  $i_{12}$  приближается к потоку  $\Phi_{21}$ . Поэтому

$$\frac{\partial k_2}{\partial \alpha} = -\frac{\partial k_1}{\partial \alpha} = c_1,$$

где  $c_1$  — существенно положительная величина.

Тогда

$$D_t = c_1 (i_{12} \Phi_{21} - i_{22} \Phi_{12}).$$

Среднее значение вращающего момента:

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T D_t dt = c_1 [I_{12} \Phi_2 \cos(I_{12}, \Phi_2) - \\ - I_{22} \Phi_1 \cos(I_{22}, \Phi_1)].$$

Из диаграммы рис. 5 видно, что:

$$\angle I_{12} \Phi_2 = \frac{\pi}{2} - (\psi - \varphi_{12})$$

и

$$\angle I_{22} \Phi_1 = \frac{\pi}{2} + (\psi + \varphi_{22}),$$

поэтому

$$D = c_1 [I_2 \Phi_2 \sin(\psi - \varphi_{12}) + \\ + I_{22} \Phi_1 \sin(\psi + \varphi_{22})].$$

Токи в диске могут быть найдены из выражений:

$$I_{12} = \frac{\omega M_{1,12} I_1}{z_{12}} \quad \text{и} \quad I_{22} = \frac{\omega M_{2,22} I_2}{z_{22}}.$$

Произведения  $M_{1,12} I_1$  и  $M_{2,22} I_2$  представляют собой не что иное, как потоки  $\Psi_{12}$  и  $\Psi_{22}$ , пронизывающие диск и индуцирующие в нем токи  $i_{12}$  и  $i_{22}$ . Потоки  $\Psi_{12}$  и  $\Psi_{22}$  являются частями потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , поэтому

$$\Psi_{12} = k_{12} \Phi_2,$$

$$\Psi_{22} = k_{22} \Phi_2.$$

Из условий симметрии следует, что  $\varphi_{12} = \varphi_{22} = \varphi_2$ ,  $z_{12} = z_{22} = z_2$ ,  $k_{12} = k_{22} = k_0$ , вследствие чего выражения для токов  $I_{12}$  и  $I_{22}$  примут вид:

$$I_{12} = \frac{\omega \Phi_1 k_0}{z_2} \text{ и } I_{22} = \frac{\omega \Phi_2 k_0}{z_2}.$$

Подставляя значения токов  $I_{12}$  и  $I_{22}$  в выражение для момента  $D$  и учитывая, что  $\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}$ , получим:

$$D = 2c_1 k_0 \omega \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi \frac{r_2}{z_2} = c_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi.$$

Из последних выражений можно сделать следующие выводы:

1) Чтобы получить вращающий момент, необходимо наличие двух потоков, сдвинутых по фазе ибо при  $\psi = 0$  и  $D = 0$ . Потоки должны быть сдвинуты и в пространстве; иначе говоря, обязательным условием для получения вращающего момента в двухпоточном приборе с диском является наличие бегущего магнитного поля. Когда подвижная часть имеет форму цилиндра, а потоки действуют вдоль радиусов цилиндра, необходимо наличие вращающегося магнитного поля. Максимум момента наступает при  $\psi = \frac{\pi}{2}$ , когда  $\sin \psi = 1$ .

2) Действие двухпоточного, а значит и многопоточного прибора, обусловлено активным сопротивлением диска, а не реактивным, как в однопоточном. Момент равен нулю, если  $r_2 = 0$ . По этой причине такие приборы было бы уместно назвать активными. Момент максимален при  $x_2 = 0$ , а когда  $x_2 \neq 0$ , при  $r_2 = x_2$ .

При весьма малых  $x_2$ , что практически и имеет место, выражение для момента имеет следующий вид:

$$D = D \cdot c_1 k_0 \omega \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi \cdot \frac{1}{r_2},$$

откуда видно, что следует стремиться к применению диска из материала с возможно малым удельным сопротивлением.

3) Влияние частоты на вращающий момент характеризуется множителем:

$$\frac{\omega r_2}{r_2^2 + x_2^2}.$$

Линейная связь между моментом и частотой  $\omega$  получается лишь при  $x_2 = 0$ .

4) Если число потоков более двух, их действие можно рассматривать попарно. Полученные при этом выражения будут иметь вид  $c \omega \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi$ .

Например, для реально существующих конструкций ваттметра, счетчика или реле получим следующие выражения:

$$D_1 = c_1 \omega (+\Phi_1)(\Phi_2) \sin(+\Phi_1 \Phi_2);$$

$$D_2 = c_2 \omega (-\Phi_1)(\Phi_2) \sin(-\Phi_1, \Phi_2);$$

$$D_3 = c_3 \omega (+\Phi_1)(-\Phi_1) \sin(+\Phi_1, -\Phi_1) = 0.$$

Суммарный момент

$$D = D_1 + D_2 = (c_1 + c_2) \omega \Phi_1 \Phi_2 \sin(\Phi_1 \Phi_2).$$

Следует подчеркнуть, что здесь мы пренебрегли некоторой несимметричностью расположения потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Ниже будет показано, что это возможно не только потому, что сама асимметрия невелика, но и вследствие незначительности реактивного сопротивления диска  $x_2$  (угол  $\varphi_2$  составляет несколько градусов) и угла  $\frac{\pi}{2} - \psi$ , так как  $\psi$  чаще всего близок к  $\frac{\pi}{2}$ .

5) При симметричном расположении потоков мгновенное значение вращающего момента  $D$  равно среднему.

Действительно

$$D_t = c_1 (i_{12} \Phi_{2t} - i_{22} \Phi_{1t}).$$

Подставляя сюда значения потоков  $\Phi_{1t}$  и  $\Phi_{2t}$ , а также токов  $i_{12t}$  и  $i_{22t}$ , выраженные через амплитудные значения, и учитывая, что амплитудные значения токов можно представить в виде:

$$I_{12m} = k_0 \frac{\omega \Phi_1 m}{z_2} \text{ и } I_{22m} = k_0 \frac{\omega \Phi_2 m}{z_2},$$

получим:

$$D_t = c_1 k_0 \frac{\omega \Phi_1 \Phi_2 m}{z_2} \sin \psi \cos \varphi_2,$$

или

$$D_t = 2c_1 k_0 \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi \frac{r_2}{z_2},$$

что совпадает с ранее приведенным средним значением момента. Вращающий момент при синусоидальных токах и потоках остается неизменным во времени и не пульсирует, как это имеет место в других измерительных приборах.

**Влияние асимметрии в расположении полюсов.** Если потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  расположены несимметрично относительно вертикали, как это, например, показано пунктиром на рис. 4, то мы будем иметь следующие неравенства:

$$\frac{\partial k_1}{\partial a} \neq -\frac{\partial k_2}{\partial a};$$

$$\varphi_{12} \neq \varphi_{22}; \quad z_{12} \neq z_{22}; \quad k_{12} \neq k_{22}.$$

Поэтому, полагая что:

$$\frac{\partial k_1}{\partial a} = c_1 \text{ и } \frac{\partial k_2}{\partial a} = c_2$$

для вращающего момента мы получим следующее выражение:

$$D = \left[ \frac{c_2 k_{12} r_{12}}{z_{12}^2} + \frac{c_1 k_{22} r_{22}}{z_{22}^2} \right] \omega \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi - \left[ \frac{c_2 k_{12} x_{12}}{z_{12}^2} - \frac{c_1 k_{22} x_{22}}{z_{22}^2} \right] \omega \Phi_1 \Phi_2 \cos \psi,$$

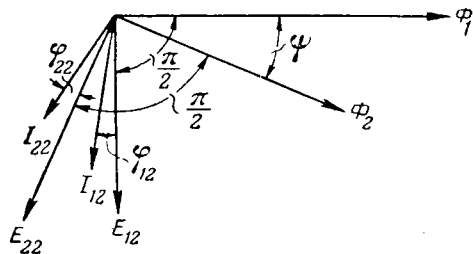


Рис. 5.

из которого видно, что асимметрия вызывает появление дополнительного момента, пропорционального косинусу угла между потоками. Этот дополнительный момент определяется реактивным сопротивлением цепей вторичных токов. Так как сопротивление очень мало и асимметрия на практике оказывается небольшой, разность величин  $\frac{c_2 k_{12} x_{12}}{z_2^2}$  и  $\frac{c_1 k_{22} x_{22}}{z_{22}^2}$  также весьма мала.

Ввиду того, что на практике в ваттметрах и счетчиках угол  $\psi$  близок к  $\frac{\pi}{2}$  (в амперметрах и

вольтметрах этот дополнительный момент вообще не играет роли),  $\cos \psi$  будет также небольшим. Поэтому на практике дополнительным моментом обычно пренебрегают, так как он по сравнению с основным моментом весьма мал.

### Литература

1. Е. Г. Шрамков. О классификации электроизмерительных приборов. Электричество, № 7, 1950.
2. Е. Г. Шрамков. Электрические и магнитные измерения. ГОНТИ, 1937.
3. Н. Н. Пономарев. Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов, 1943.
4. А. С. Касаткин. Электрические измерения. Госэнергоиздат, 1946.
5. А. В. Фремке. Электрические измерения. Госэнергоиздат, 1951.
6. П. Н. Горюнов и др. Электрические счетчики. Госэнергоиздат, 1951.
7. В. О. Арутюнов. Расчет и конструкции электроизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1949.

[2.12.1950]



## Включение мощных синхронных компенсаторов без сушки

Инж. Т. П. МУСАТОВ и инж. В. П. КОВАЛЕНКО

Синхронный компенсатор 10 000 кВА, 6,6 кВ выпуска 1941 г. во время войны был отправлен в восточные районы страны. От компенсатора сохранился только статор, который находился на эвакуационной базе на открытом воздухе до 1950 г., когда его возвратили в один из сетевых районов юга.

При осмотре статора было установлено, что сталь магнитопровода проржавела на глубину 2...3 мм, обмотка загрязнена и в двух местах ее лобовых частей имеются вмятины. При проверке мегомметром 2500 в сопротивление изоляции по отношению к корпусу (одноминутное значение) оказалось равным 9...10 мгом; при номинальном напряжении  $\text{tg } \delta$  составил около 25%; ток утечки при  $U = 7,8$  кВ — около 900 мкА, а при напряжении 9,9 кВ одна из фаз пробилась на корпус у выводной доски. В декабре 1951 г. статор был помещен в машинный зал электростанции, где находился около двух месяцев. Температура в зале колебалась в пределах 15...25°С.

В феврале 1952 г. статор подвергся более полному испытанию при снятой выводной доске. Результаты испытаний: коэффициент абсорбции  $K = \frac{K_{60}}{R_{15}} = 1,6$ ; сопротивление изоляции (60 сек) 400 мгом; ток утечки при выпрямленном напряжении 6,5 кВ — 15 мкА, при 13 кВ — 40, 42 и 43 мкА; по фазам  $\text{tg } \delta$  соответственно составил 10,6; 13,8 и 18,5% при напряжениях: 4,5; 6,6 и 7,5 кВ. При температуре +15°С каждая фаза испытывалась напряжением 9,9 кВ по отношению к двум другим заземленным обмоткам.

Таким образом, за два месяца хранения в машинном зале изоляция обмотки статора значительно улучшилась. После измерений обмотку статора очистили от грязи и покрыли покровным лаком № 2110, установили новую выводную доску.

В таком слегка отремонтированном виде статор был отправлен на одну из подстанций для замены поврежденного статора синхронного компенсатора такого же типа.

На месте установки при температуре обмотки +22°С проводились контрольные испытания статора, которые дали следующие результаты: коэффициенты абсорбции по отдельным фазам — 1,17; 1,25 и 1,3; сопротивление изоляции уменьшилось в три раза, составив по фазам 130, 140, 150 мгом. Ток утечки при напряжении 6,5 кВ увеличился в 4 раза, достигнув 60 мкА на пятой

*Приводятся показатели изоляции мощных синхронных компенсаторов с компаундированной изоляцией, включенных без сушки. В заключении указывается, что в большинстве случаев можно отказаться от сушки обмоток статоров электрических машин с компаундированной изоляцией. Печатается в порядке обсуждения.*

минуте, а  $\text{tg } \delta$  при напряжении 6,6 кВ возрос с 13,8 до 21%. Эти измерения показали, что изоляция статора во время покраски значительно увлажнилась, что следует отнести

в качестве растворителя только бензина.

Статор установили на место поврежденного и при указанных значениях показателей по изоляции включили в работу. Через месяц работы при температуре +60°С сопротивление изоляции обмотки статора равнялось 1 000 мгом и коэффициент абсорбции был 2,2 ( $R_{60}/R_{15} = 1000/450$ ). Ток утечки при выпрямленном напряжении 6,5 кВ составил 4 мкА, следовательно, он снизился в 15 раз по сравнению с данными последнего измерения даже при условиях более высокой температуры (+60°С).

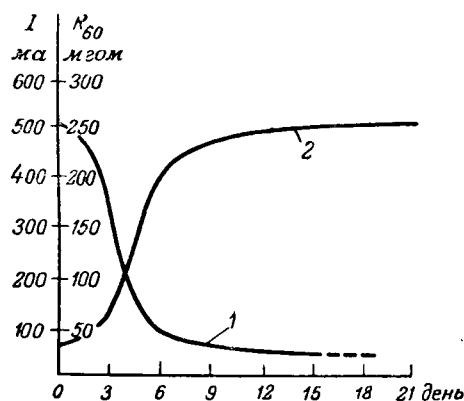
Синхронный компенсатор работает около года без замечаний с предельной нагрузкой по температуре и напряжению. Успешное включение и работа статора синхронного компенсатора, бездействовавшего более 10 лет и хранившегося в плохих условиях, показали, что и в этих наихудших условиях увлажнение изоляции ограничилось поверхностными слоями.

Не менее убедительным примером, подтверждающим факт поверхностного увлажнения компаундированной изоляции, может служить успешное включение без сушки синхронного компенсатора после полной замены обмотки статора.

Замена обмотки статора 10 000 кВА происходила практически на открытом воздухе. После окончания замены лобовые части обмотки покрыли покровным лаком № 2110.

Испытания дали следующие результаты: 1) сопротивление изоляции фазы относительно двух других заземленных фаз: 55, 55 и 45 мгом, между фазами 95, 80, 70 мгом; 2) коэффициент абсорбции не выше 1,1; 3) токи утечки по фазам при напряжении 10 кВ — 310, 344 и 427 мкА; 4)  $\text{tg } \delta$  % при напряжениях: 3,3 кВ; 6,6 и 9,9 кВ соответственно 25,5; 30,7 и 33,6%. Обмотку статора при этих показателях, свидетельствующих о явном увлажнении, испытали напряжением  $1,5U_{ном}$ .

После испытаний статор поставили в машинный зал здания компенсаторов, где температура воздуха колеблется в пределах 25...35°С. Спустя 21 день (рисунок) измерения дали следующие результаты (температура +35°С): при напряжениях 3,3, 6,6, 9,9 кВ  $\text{tg } \delta$  составил соответственно



Изменение тока утечки 1 и сопротивления изоляции 2 увлажненной обмотки в зависимости от времени ее нахождения в теплом вентилируемом помещении.

9,4; 17,9 и 22,6%; коэффициент абсорбции: фазы относительно двух других заземленных фаз — 260/220, 250/200, 250/200; между фазами — 520/400, 550/400 и 480/350; фазы на корпус — 320/250, 330/250 и 330/250; трех фаз на корпус — 200/120; испытательное напряжение 14 кВ.

Статор был смонтирован взамен поврежденного на однотипном компенсаторе. Синхронный компенсатор работает около 6 месяцев без замечаний.

Приведем еще один характерный случай включения в работу синхронного компенсатора без сушки при явно увлажненной изоляции.

При пожаре обмотки статора синхронного компенсатора 10 000 кВА, 6,6 кВ вследствие виткового замыкания в лобовой части обмотку тушили водой из ведра по причине недостаточного напора в гидранте. При этом в лючки выливали несколько ведер воды при вращающемся роторе.

После вырезки поврежденной секции и изолировки поврежденных мест произвели измерение сопротивления изоляции каждой фазы по отношению корпуса (при двух других изолированных) и между обмотками и измерили  $\text{tg } \delta$  при 4,5 кВ и температуре обмотки  $+21^\circ\text{C}$ . Результаты следующие: 1)  $R_{60}$  на корпус — 300 мгом, 2)  $R_{60}$  между фазами — 9, 18 и 25 мгом, 3)  $\text{tg } \delta$  — 17% (фазы при двух других заземленных).

В связи с явно неудовлетворительным состоянием изоляции статор был испытан только номинальным напряжением и включен в работу. Спустя 5 дней компенсатор остановили для улучшения изоляции лобовых частей, попутные измере-

ния при температуре обмотки  $+60^\circ\text{C}$  дали следующие результаты: 1) сопротивления изоляции между фазами (60 сек) — 500, 700 и 900 мгом; фаза — корпус — 500, 450, 600 мгом; 2) коэффициент абсорбции в пределах 1,1...1,3; 3)  $\text{tg } \delta$  снизился 3,7% при 4,5 кВ.

Компенсатор был вновь включен и работает более 10 месяцев (до капитального ремонта поврежденной пожаром обмотки).

Следует отметить, что контрольные измерения мегомметром сопротивления изоляции в случаях когда к статору подключен пучок протяженных кабелей, положительных результатов не дают, так как емкость кабелей значительно больше емкости обмотки статора. В этом случае общее сопротивление не изменяется, несмотря на значительное увеличение температуры машин и улучшение характеристик изоляции самого статора.

**Выводы.** 1. Обмотки статоров генераторов (компенсаторов) с компаундированной изоляцией увлажняются в основном в верхних слоях, независимо от срока пребывания изоляции на открытом воздухе.

2. Характеристики увлажненной изоляции могут быть улучшены, если до включения в работу статоры находятся 7...10 дней в помещении с температурой воздуха свыше  $+20^\circ\text{C}$  и с нормальной вентиляцией, что обычно легко осуществить до или во время монтажа.

3. Испытание повышенным напряжением, равным  $1,5 U_{ном}$ , не является опасным даже увлажненной изоляции (при коэффициенте абсорбции ниже 1,5), однако при отсутствии в ней местных дефектов.

4. Помимо коэффициента абсорбции и абсолютного значения сопротивления изоляции дополнительным критерием увлажнения может служить повышенное значение  $\text{tg } \delta$  при напряжении не больше фазного. При более высоком напряжении  $\text{tg } \delta$  может быть велик даже при сухой изоляции за счет ионизации.

5. Включение в эксплуатацию генераторов и компенсаторов с увлажненной изоляцией (компаундированной) при обязательном соблюдении эксплуатационного циркуляра бывш. МЭС № 2/Э от января 1952 г. в части загрузки не представляет опасности, так как изоляция сравнительно быстро подсыхает за счет хорошей вентиляции без каких-либо последствий.

6. Контрольные измерения изоляции желательно производить через 3...5 дней после включения машины в сеть.

[11. 4. 1953]



# Выдающийся русский физик Г. В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве

К 200-летию со дня смерти

Проф. Я. Г. ДОРФМАН

Ленинград

*„Память его никогда  
не умолкнет“*

Ломоносов

6 августа (26/VII) 1753 г. трагически погиб от удара молнии во время исследования атмосферного электричества выдающийся русский ученый, современник и сподвижник Ломоносова, действительный член Петербургской академии наук Георгий Вильгельмович Рихман.

Событие это глубоко возмущало всю русскую общественность и всю мировую науку.

Рихман пал жертвой исследования новооткрытого явления природы — электричества.

Г. В. Рихман родился в г. Пернове (Эстония) 22 июня 1711 г. Он получил физико-математическое образование в германских университетах в Галле и Иене. В 1734 г. Рихман прибыл в Петербург в качестве домашнего учителя в семью канцлера А. И. Остермана. Однако уже в следующем, 1735 году, Рихман был зачислен студентом физического класса в Петербургскую академию наук, при которой, как известно, до основания Петербургского университета существовал особый академический университет. В 1740 г. Рихман стал адъюнктом, в январе 1741 г. был утвержден в должности штатного профессора физики, а в 1744 г. заменил уехавшего за границу профессора Краффта по заведыванию физическим кабинетом.

В Академии Рихман развернул широкую научную, преподавательскую и популяризаторскую деятельность. За период с 1741 по 1753 г. им было опубликовано в Комментариях Русской академии наук 15 экспериментальных исследований по разнообразным вопросам физики и метеорологии.

Рихман осуществил впервые в истории физики измерения теплопроводности. Он впервые установил носящую его имя формулу, позволяющую вычислять температуру смеси различно нагретых



Рис. 1. Портрет Г. В. Рихмана (с гравюры XVIII в.).

масс одной и той же жидкости. Ряд работ Рихмана был посвящен вопросу о скорости испарения воды в различных условиях, причем для этой цели им был сконструирован специальный измерительный прибор — «атмометр». Рихман зарекомендовал себя как первоклассный экспериментатор.

Примерно в 1744 г. Рихман приступил к проведению разнообразных экспериментальных исследований по электричеству. Уже в самом начале этих работ ему удалось сконструировать новый электронизмерительный прибор — «указатель электрической силы».

Для более полного представления обстановки, в которой проходили пер-

вые работы Г. В. Рихмана по электричеству, напомним некоторые особенности той эпохи. Занятие опытами по электричеству считалось в то время модным. Императрица Елизавета «милостиво» распорядилась отвести в Зимнем дворце специальную «камору», где бы профессор Рихман мог «чинить эксперименты по электричеству» и демонстрировать их двору.

Таким образом, на Рихмана в угоду прихоти великосветского окружения Елизаветы была возложена незавидная обязанность развлекать царницу и ее двор эффектными экспериментами. Но Рихман использовал эту ситуацию в интересах науки и проводил в находившейся в его распоряжении лаборатории научные исследования и физические опыты.

Михаил Васильевич Ломоносов проявлял большое внимание исследованиям Рихмана по электричеству. Они были однолетками и крепко подружились. В 1745 г. Ломоносов был утвержден в звании профессора химии. На протяжении всех последующих лет профессор химии Ломоносов и профессор физики Рихман вели свои

исследования по электричеству в самом тесном контакте.

Начиная с 1752 г., Рихман развернул экспериментальное изучение природы атмосферного электричества. Опыты эти подробно освещались в академической газете «Санкт-Петербургские Ведомости» и пользовались широкой известностью.

Помимо научных работ Рихман читал лекции по математике и физике студентам академического университета.

Некоторые из студентов помогали ему в постановке физических экспериментов и в подготовке его работ к печати (например, С. К. Котельников, впоследствии академик).

Наряду с научной и педагогической деятельностью Рихман вел большую популяризаторскую работу, систематически публикуя в академическом научно-популярном журнале «Примечания на Ведомости» статьи и заметки по самым различным вопросам естествознания. В этих статьях и заметках он сообщал русским читателям обо всех новинках русской и иностранной науки.

В бумагах Г. В. Рихмана, хранящихся в архиве Академии наук СССР, имеется толстая тетрадь, содержащая краткие конспекты прочитанных им статей в научной периодике. Заметки Рихмана в «Примечаниях на Ведомости» свидетельствуют о его очень широком образовании и разносторонних интересах.

Предпринятые Рихманом и Ломоносовым опыты по атмосферному электричеству были чрезвычайно опасными. «Он не отвращал, а притягивал к себе молнию и многие предупреждали его, чтобы он действовал осторожнее», говорится в официальном некрологе, посвященном гибели Рихмана. Оба исследователя несомненно сознавали эту опасность. Так, например, Ломоносов писал в 1752 г.: «Чинил электрические и воздушные наблюдения с немалой опасностью». В посмертно опубликованном последнем труде Рихмана по электричеству мы находим следующие, его собственные, слова: «...Именно теперь, в настоящее время, также и физикам дан повод проявить некую смелость и дерзновение в рискованном деле. Поэтому, так как моя обязанность состоит, насколько это в моих силах, в исследовании законов природы, ничто не могло меня отвлечь от этого рода наблюдений».

Трагическая гибель Рихмана заставила ученых всего мира задуматься о методах предупреждения подобных несчастий в будущем. Недаром Британское королевское общество на двух заседаниях обсуждало вопрос обо всех обстоятельствах этой катастрофы.

В то же время гибель Рихмана использовалась реакционными кругами в России и за рубежом для борьбы против науки и просвещения. Мракобесы твердили о том, что «бог наказал нечестивого ученого» за его попытку постигнуть природу грома и молнии, являющихся, дескать, проявлением «божественного гнева». Повидимому, в результате этой реакционной кампании

официальные круги оставили семью Рихмана в всякой поддержки.

В память друга за его семью вступил М. В. Ломоносов. В трогательном письме по этому поводу, обращенном к И. И. Шувалову, Ломоносов писал: «...Умер господин Рихман прекрасною смертью, исполняя по своей профессиональной должности. Память его никогда не умолкает. Чтобы сей случай не был протолкован против приращения наук, всепокорнейше прошу махвать науки...» Ломоносову пришлось выдержать немалую борьбу, но в конце концов точка зрения Ломоносова восторжествовала, и когда вышел том «Новых комментариев Петербургской академии наук», содержащий посмертные сочинения Рихмана, то в официальном некрологе было сказано, что судьба Рихмана оказалась подобной судьбе «Орфея, Эскулапа и Зороастра, погибших как и он от удара молнии».

«И если окажутся в дальнейшем, — продолжал некролог, — другие мученики науки, которые примут смерть при самом исполнении своих профессиональных обязанностей и вследствие не исполнения, то первое место среди них будет принадлежать нашему Рихману».

Значение исследований Г. В. Рихмана по электричеству становится особенно ясным при учете положения этой области физики в начале XVIII в. Очень характерны с этой точки зрения известные слова М. В. Ломоносова «...электрическая сила... начала в ученом свете возрастать славою и приобретать успехи около 1740 года». В самом деле, в эти годы были достигнуты значительные успехи в области методики получения и изучения электрических эффектов: электризация стеклянных трубок движением рук стали заменять вращением стеклянных шаров; впервые был применен металлический кондуктор для отвода электричества; было обнаружено, что электризация тел не меняет их веса; в 1744 г. впервые было опубликовано сообщение о возможности зажигания спирта или эфира посредством искры; наконец, в 1745 г. была изобретена «лейденская» или «мушенбрёкова» банка, позволившая значительно усилить на опыте электрические эффекты; при этом было открыто стекание электрического заряда с острия и было установлено различие между разными телами в отношении их способности проводить электричество.

Однако, несмотря на эти относительные успехи, все экспериментальные исследования в области электричества не имели количественного характера. Ни одна электрическая величина фактически не измерялась. Французский физик Дюфэ предложил вешать на заряженные тела льняные нитки, концы которых расходились тем сильнее, чем больше была электризация. Но в таком грубом виде метод служил скорее для наглядности демонстрационных опытов, чем для какой бы то ни было количественной оценки. При таких условиях нельзя было, очевидно, обнаружить ни одной количественной закономерности, на которую могла бы опираться в дальнейшем научная теория электричества.

Таким образом, опыты приводили лишь к накоплению разнообразных распылчатых наблюдений, а теории заключались в весьма произвольных догадках и допущениях и нередко содержали самые фантастические, заведомо нелепые выдумки.

Таково было положение науки об электричестве в 1744 г., когда Рихман осуществлял свои опыты по электричеству. Систематические исследования начались, как указывает сам Рихман, в начале февраля 1745 г.

Исследования по электричеству за период с 1745 по 1746 г. опубликованы Рихманом в большой статье на латинском языке «Новые данные о возбуждении в телах электричества», напечатанной в «Комментариях» Петербургской академии наук<sup>1</sup>. Продолжение этих работ вплоть до лета 1753 г. изложено Рихманом в посмертно опубликованной статье, озаглавленной «Рассуждение об указателе электричества и его применении к определению искусственных и естественных электрических явлений».

Приступая к систематическим исследованиям по электричеству, Рихман сразу же обратил внимание на два обстоятельства: на методику возбуждения электрического состояния и на методику его измерения.

Вначале он применял стеклянные трубки для возбуждения электричества. При этом, «нередко испытывая усталость и боль в кистях и в руках от натирания трубок», Рихман «усиленно думал» над усовершенствованием описанной голландским физиком Гравезандом электрической машины с вращающимся стеклянным шаром. Устройство таких машин было по словам Рихмана еще крайне несовершенным. «При быстром вращении шара машины приходило в сотрясение все устройство, и даже стены деревянной пристройки», где Рихман проводил свои опыты, «а смола, посредством которой укреплялись оси, размягчалась от нагревания», и «движение становилось колеблющимся». «То и дело приходилось, — говорит Рихман, — менять стертые и изорванные веревки или потуже связывать распутившиеся веревки», служившие для связи и в качестве приводного ремня. «Это отнимало половину рабочего времени».

И Рихман переконструировал машину. Он устранил ее разбалтывание, подобрал размеры шкивов. «Когда я вращал сферу, — сообщает он с торжеством о своей усовершенствованной машине, — то колесо делало за две минуты два оборота, а сфера — двенадцать». Усовершенствование, кажущееся теперь столь простым, представляло тогда заметный шаг в деле улучшения техники эксперимента.

Получив таким образом надежный источник «электрической силы», Рихман приступил к разработке методики ее количественного измерения. Вспоминая в своей второй статье об этом периоде своей деятельности, Рихман писал: «Поскольку безупречный электрометр или инструмент

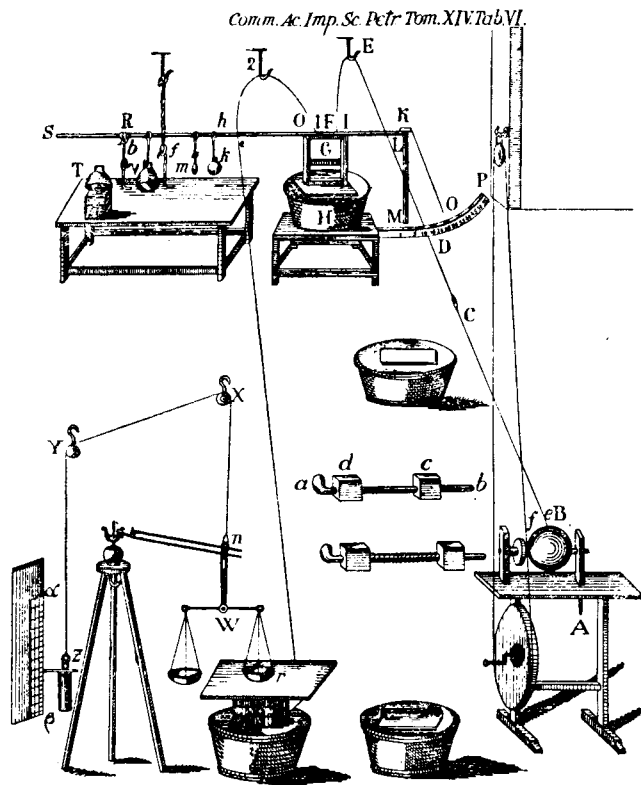


Рис. 2. Первая экспериментальная установка Г. В. Рихмана для исследования электризации и методов измерения электрической силы.

для определения электрической силы без всякого сомнения очень много содействовал бы развитию науки об электричестве, я начал с размышления о наиболее удобном способе определения электрической силы».

В своей первой работе Рихман рассказывает о трех испробованных им методах. Первый метод измерения электрической силы заключался в следующем. Рихман укрепил на подставке *G* (рис. 2), которая «была расположена на смоле», т. е. на изоляторе, посредством перекладки *SK* вертикальную металлическую линейку *LM*. «Вблизи линейки *K* я привязал льняную нить *KO* длиной в 2 лондонских фута<sup>2</sup> и такой толщины, что при длине в 456 лондонских дюймов она весила 16 гран. Таким образом льняная нить *KO*, будучи взвешена, должна была обнаружить вес в  $\frac{384}{456}$  грана<sup>3</sup>. Нить свисала параллельно линейке.

Когда линейка заряжалась электричеством, то нить отклонялась от вертикали. Угол между нитью и линейкой измерялся на деревянном квадранте *P*, укрепленном на столе и снабженном делениями. Рихман ясно понимал, что угол наклона нити определяется равновесием между «электрической силой» отталкивания нити от линейки и силой тяжести, поэтому подчеркивал, что показания указателя будут повторимыми при неизменности веса и длины нити. Иными словами, Рихман правильно рассматривал свой инструмент не как электроскоп, а как особого вида электрометр,

<sup>1</sup> „De electricitate in corporibus nova tentamina“, Commentarii Acad. Sc. Imp. Petropolitanae, t. XIV, p. 299—324.

<sup>2</sup> Около 60 см (А. Д.).

<sup>3</sup> Около 45 мг (А. Д.).



измеряющий «электрическую силу». Но он понимал также, что без знаний закона зависимости электрической силы от расстояния, без теории того, что мы называем электрическим полем, а в те времена называли «электрическим вихрем», уточнить прибор невозможно.

Второй метод измерения «электрической силы», впервые испробованный Рихманом, заключался в применении обычных весов. Для этой цели он подвесил на изолирующем шелковом шнуре «большие весы  $W$ , вес которых составлял 12 русских фунтов». «Весы возвышались над железными грузами, ... погруженными в смолу». На одном из грузов покоилась металлическая плита, расположенная под чашей весов. Шелковый шнур, на котором были подвешены весы, был связан с конопляной веревкой и укреплен на блоках  $XU$ . Таким образом, имелась возможность регулировать расстояние между уравновешенными весами и металлической пластиной. Рихман говорит: «Я пользовался также весами для взвешивания электрической силы; наибольшей степенью электризации, которую я мог бы возбудить силами моей сферы<sup>4</sup>, я поднял полторы драхмы<sup>5</sup> на два лондонских дюйма».

Идея применения весов для абсолютных измерений «электрической силы», впервые осуществленная Рихманом, была впоследствии использована В. Томсоном (1867) и Кирхгофом (1883) для измерения малых разностей потенциалов и Абрагамом и Лемуаном (1895), а также А. А. Чернышевым (1910) для больших разностей потенциалов.

Третий метод измерения «электрической силы», примененный Рихманом, заключался в следующем. «Я укрепил, — говорит он, — на столе на стеклянной опоре, на расстоянии полудюйма от висящего железного молотка металлический колокол  $T$ ». Молоток был подвешен на льняной нити так, что его конец отстоял на расстоянии от железной проволоки, соединенной с машиной. Как только молоток электрически заряжается, он притягивается к колоколу и ударяет о него; «став менее наэлектризованным», он возвращается назад и снова электризуется. Это происходит периодически. «Начинаются удары молота о колокол и по мере увеличения электризации удары происходят чаще. Этот метод не привел к изобретению электроизмерительного прибора. Заканчивая описание этого метода, Рихман писал: «Я не сомневаюсь, что можно создать музыкальный инструмент из различных колоколов и молотков, надлежащим образом расположенных вблизи электризуемого аппарата». Но эта задача не интересовала Рихмана и к ней он больше не возвращался.

В вышеупомянутой первой работе Рихмана по электричеству описано множество любопытных опытов, имевших целью выяснить: 1) некоторые особенности «электрической силы» и 2) способность различных тел проводить электричество. Эти разнообразные наблюдения не представ-

ляют большого интереса для историка, хотя многие из них и были осуществлены Рихманом впервые.

В последующие годы Рихман направил свои усилия прежде всего на дальнейшее усовершенствование его «Указателя электрической силы». Впрочем, никаких принципиальных изменений не потребовалось. Прибор получил практическое применение почти в том виде, в каком он был впервые предоставлен общему собранию Петербургской академии наук 29 марта 1745 г. Интересно, что в эту эпоху в Западной Европе не имелось еще никаких электроизмерительных приборов. Все исследования крупнейших западноевропейских физиков по электричеству того времени являлись только качественными.

Таким образом, хотя в Западной Европе исследования электричества велись уже с конца XVI в., а в России они были начаты Г. В. Рихманом и М. В. Ломоносовым лишь в 1744 г., т. е. на полтора десятилетия позднее, тем не менее они уже с первых шагов велись в России на более высоком уровне.

В апреле 1749 г., т. е. через 5 лет после демонстрации Рихманом «Указателя электрической силы», Парижской академии наук был представлен электроизмерительный прибор Ж. П. ле-Руа и П. Д'Арси. «Электрическая сила» измерялась в нем по глубине погружения ареометра в сосуд с водой, стоящий на металлической пластине, соединявшейся с наэлектризованным телом. Описание этого прибора было впервые опубликовано в 1753 г. Это описание стало известным Рихману незадолго до его смерти. Теперь мы хорошо знаем, что электрометр ле-Руа и Д'Арси оказался мало пригодным для количественных измерений и широкого применения не получил. Между тем электрометр Рихмана применяется в модификациях в самых различных областях науки и техники по сей день (отметим, например, вариант электрометра Рихмана — современную модификацию последнего, выполненную Лоуритсеном для исследований космических лучей).

Вторая и последняя опубликованная работа Рихмана по электричеству «Рассуждение об указателе электричества и его применении к определению искусственных и естественных явлений электричества» была написана Рихманом незадолго до его кончины и напечатана посмертно в 4-м томе Новых комментариев Петербургской академии наук (за 1753—1754 гг.)<sup>\*</sup>. Как указано в некрологе: «Знаменитейший автор предназначал эту диссертацию для академической речи на торжественном собрании Академии 6 сентября 1753 года, но по воле рока не произнес ее».

Г. В. Рихман должен был выступить с докладом о своих опытах и вытекающих из них принципах, а М. В. Ломоносов в том же собрании должен был выступить после Рихмана с теоретическими выводами и обобщениями о природе электричества. 10 июня (30 мая) 1753 г. Ломо-

<sup>\*</sup> «De indice electricitatis et de ejus usu in definiendis artificialis et naturalis electricitatis phaenomenis dissertatio». Novi Commentarii Acad. Sc. Imp. Petropolitanae, t. IV p. 241—269.

<sup>4</sup> То-есть машины с вращающейся сферой (А. Д.).

<sup>5</sup> Около 6 г (А. Д.).

иков сообщил о предстоящем выступлении на Собрании академии Шувалову: «Оный акт я буду отправлять с господином профессором Рихманом, он будет предлагать опыты свои, а я теорию и пользу, от оной происходящую, к чему уже я приготавлиюсь». В протоколе Собрания академии в мае 1753 г., когда назначались доклады Ломоносова и Рихмана, было записано, что Рихман «изъяснит явления и законы электричества».

Как известно, в связи с трагической гибелью Рихмана публичный акт Академии был отложен и состоялся 7 декабря (26 ноября) 1753 г. Пронесение публичного доклада после долгой борьбы из-за интриг, направленных против М. В. Ломоносова, было возложено все же на Ломоносова, который выступил со своим знаменитым «Словом о явлениях воздушных, от Электрической силы происходящих», освещавшим теорию атмосферного электричества и некоторые практические выводы из нее. Доклад Рихмана оглашен не был. Однако чтение обоих текстов убедительно показывает, что доклады, подготовленные Рихманом и Ломоносовым, находились в тесной связи друг с другом.

В своей работе Рихман уделит внимание прежде всего некоторым деталям конструкции электрического указателя как лабораторного переносного прибора и проверке его работы (рис. 3). Как строгий и требовательный к себе экспериментатор, Рихман подчеркивал, что прибор его нельзя еще считать безупречным. Он считал крайне важным, «чтобы можно было, наконец, открыть закон убывания электричества и исследовать строение возбужденной электрической материи».

Особое внимание он уделял потере электрического заряда телами и правильно констатировал, что действие влажного воздуха сводится к увлажнению поверхности изолирующих подставок. Эти свои соображения он подтвердил «отличным опытом, возможность осуществить который дал уважаемый коллега, достойный Ломоносов». Рихман «послал ему три порции стекла, растертого в порошок различной тонкости», с целью исследовать, становятся ли они проводящими от влаги. Оказалось, что мелкий порошок во влажном воздухе становится проводящим быстрее, чем более крупный. «Это, вероятно, указывает, что более мелкий порошок из-за большей поверхности в один и тот же промежуток времени притягивает большее количество влажных паров, чем более крупный порошок». Таким образом, Рихман уже в 1753 г. совершенно ясно понимал адсорбцию водяных паров активной поверхностью стеклянного порошка.

Далее Рихман провел исследование зависимости быстроты потери заряда в воздухе заряженными телами различной массы и пришел к выводу, что быстрота эта не связана с массой. Он ставит перед собой задачу в дальнейшем выяснить роль поверхности в этом явлении.

Исследуя электризацию капелек ртути при ударе о стекло, Рихман обнаружил с помощью своего указателя, что эти капельки электризо-

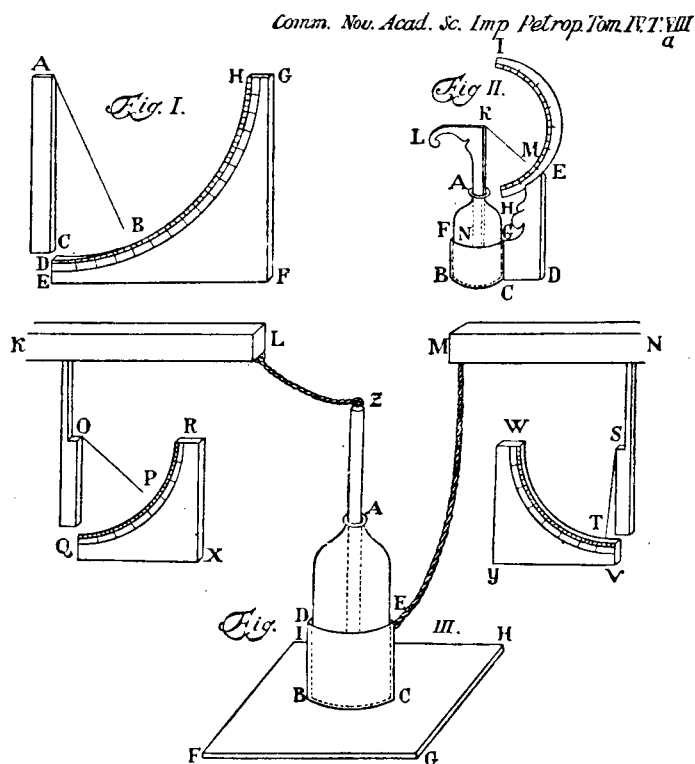


Рис. 3. Различные конструкции электрометра Рихмана в сочетании с лейденской банкой.

вали ртуть, лежащую на дне бутылки. «Но если наблюдать внимательно, — говорил Рихман, — то можно убедиться, что капельки ртути, ударяющиеся о стеклянные стенки, нисколько не касаются ртути, лежащей на дне бутылки»; таким образом, «частицы ртути, возбуждающие электричество, отделены от частиц ртути, воспринимающих электричество». Иными словами, Рихман впервые наблюдал и описал явление электрической индукции, которое приписывается неправильно английскому физiku Кэнтону, описавшему это явление лишь в 1754 г. Хотя Рихман, подобно Кэнтону, не мог еще правильно объяснить это явление, однако он высказал предположение, что электростатическая индукция должна играть важную роль наряду с трением в процессах электризации проводящих и непроводящих частиц, находящихся в атмосфере. Он описал в этой работе и ряд других электрических явлений, вызванных электростатической индукцией. Но объяснить их он не смог и терялся в догадках.

Применяя свой электрический указатель, Рихман в этой работе впервые показал, что водяной туман, который он называет водяным паром, не проводит электричества.

Далее полагая, что молния представляет собой разряд между чередующимися проводящими частицами и непроводящими промежутками между ними, Рихман попытался изготовить искусственно модель такого тела, вдавливая гвоздики с бронзовыми головками в массу из воска, смешанного со смолой. На этой модели он наблюдал, что «может быть получена змеящаяся линия молнии, подобная той, которая возникает при

столкновении различно наэлектризованных облаков».

Особое внимание было уделено Рихманом в этой работе повторению опытов Франклина с остроконечными телами в атмосфере. Известно, что когда в 1752 г. в Петербурге были получены очень скудные известия об опытах Франклина по атмосферному электричеству, Рихман и Ломоносов соорудили в своих домашних лабораториях грандиозные по тому времени установки — «громовые машины» — для строгой проверки результатов Франклина. Установки были снабжены специально приспособленными для этой цели электрическими указателями Рихмана.

Имеет важное значение, что впоследствии Ломоносов по этому поводу отмечал: «...Покойному Рихману, который всецело отдался изучению электричества, до самой смерти не удалось получить сочинений Франклина», «так как произведения ученых столь поздно доходят до нас, особенно из Америки».

«...Естественное электричество, только что открытое, — писал Рихман, — достойно нашего пристального внимания... Так как моя обязанность состоит, насколько в моих силах, в исследовании законов природы, ничто не могло меня отвлечь от этого рода наблюдений; поэтому я не пропустил ни одного случая, когда можно было не только наблюдать явления естественного электричества, но также объяснять их хотя бы отчасти. Уже в прошлом году, не имея удобного указателя, я испытал действие естественного электричества. В этом году я приготовил всё, чтобы при определенных обстоятельствах иметь возможность «исследовать явления».

«Я избрал две железные цепи длиной в 66 лондонских футов и весом в 9 фунтов. Одни концы обеих цепей я повесил на шелковом шнуре на высоте, примерно, 40 лонд. футов над поверхностью реки Невы и все устроил таким образом, чтобы шелковые шнуры не увлажнялись дождевой водой, и чтобы я мог удобно поднимать и опускать цепи, другие концы обеих цепей я с необходимой предосторожностью протянул в комнату, где хотел устроить наблюдение и соединил их вместе, прибив гвоздем шелковый шнур к стене. К обеим цепям я присоединил одинаковые указатели». «Я присоединил к концу одной цепи остроконечную железную палку и заметил, что цепи, с которой была соединена остроконечная палка, было сообщено большее электричество, чем другой».

Записывая свои наблюдения, Рихман одновременно отмечает: «Достойный Ломоносов также сделал наблюдение, что огромное электричество было сообщено правильно изолированному железу без всякого грома и молнии». Это наблюдение Ломоносова было подтверждено Рихманом.

Особое внимание уделяется Рихманом тому факту, что во время грозы, в промежутке между двумя атмосферными разрядами, показания прибора нередко падают до нуля. Уже передавая текст статьи в Академию, Рихман вписывает 22 (11) июля и еще позднее, т. е. буквально за несколько

дней до катастрофы, свои дальнейшие замечания и наблюдения по этому вопросу.

Таковы экспериментальные факты и выводы из них, сделанные Рихманом. Мы видим, что окончательных теоретических обобщений Рихман не отваживался высказывать. Будучи страстным экспериментатором, Рихман всегда относился весьма скептически к различным, нередко взаимно исключаящим друг друга, теориям, которые поспешно высказывались в те времена физиками. В одной из своих работ он писал: «Выставляя гипотезы, из них извлекая следствия и объясняя явления природы согласно новейшим ученым, мы скорее показываем свое остроумие, чем способствуем развитию естествознания». Рихман утверждал, что науки требуют «главным образом упорных экспериментов и неустанных исследований».

Приведенные работы Рихмана по электричеству показывают, что он в 1753 г. держался тех же теоретических воззрений на природу электричества, что и в 1745 г. Эти воззрения были близки к идеям немецкого физика Гаузена, утверждавшего, что наэлектризованные тела окружены «кружащейся в вихре» электрической материей. Рихман добавлял, что у положительно и отрицательно заряженных тел направления вращения должны быть противоположны.

Тесная дружба Рихмана с Ломоносовым опиралась на тот факт, что они поразительным образом дополняли друг друга. Рихман был прежде всего блестящим экспериментатором, великий же ум Ломоносова был склонен по преимуществу к широким теоретическим обобщениям. «Слово о явлениях воздушных, от Электрической силы происходящих» Ломоносова в отличие от «Рассуждения об указателе и его применении к определению искусственных и естественных явлений электричества» Рихмана содержит большое число смелых, гениальных теоретических идей, гипотез и экстраполяций.

Ломоносов выдвинул в «Слове» принципиально новую концепцию природы электрического поля, показав несостоятельность всевозможных теорий истечения электрической материи, в том числе и теории Гаузена. Ломоносов первый ввел представление о том, что движение, присущее электрическому полю, является внутренним, микроскопическим движением частиц эфира. Теория Ломоносова, рассматриваемая в исторической перспективе, явилась крупным шагом от картезианских теорий XVIII в. к теориям поля XIX в.

Рихман первый ввел точные количественные измерения в экспериментальную технику исследований по электричеству. Он открыл физическую природу действия влаги на электростатические опыты. Он же открыл явление электростатической индукции.

Гибель Рихмана преждевременно оборвала замечательное содружество двух выдающихся ученых и несколько затормозила исследования по электричеству в Петербурге. Петербургская Академия наук усиленно искала человека, который бы мог заменить Рихмана. Его нашли в лице

Ф. У. Т. Эпинуса, который продолжил исследования Рихмана по электростатической индукции и впервые дал им правильное объяснение. Знаменитый трактат Эпинуса, опубликованный в Петербурге в 1759 г., «Опыт теории электричества и магнетизма» содержит приложение «Объяснение одного явления в лейденской банке, открытого знаменитейшим Рихманом»<sup>6</sup>. Теория Эпинуса явилась фундаментом всех дальнейших математических работ по электро- и магнетостатике. В 1755 г. Петербургская академия наук по пред-

ложению Ломоносова премировала работу своего академика Л. Эйлера «О физической причине электричества», в которой Эйлер впервые рассматривал электрическое поле как результат разрежений и сгущений эфира. Гипотеза Эйлера явилась дальнейшим шагом к воззрениям Фарадея и Максвелла.

Выдающиеся труды Ломоносова и Рихмана, Эпинуса и Эйлера явились ценным вкладом Петербургской академии наук в мировую науку об электричестве и положили основу блестящим успехам их преемников — В. В. Петрова, Э. Х. Ленца, Б. С. Якоби и многих других русских ученых, исследователей электричества и изобретателей в области электротехники.

<sup>6</sup> Ф. У. Т. Эпинус. «Теория электричества и магнетизма» (Классики науки), изд. Акад. наук СССР, 1951 г. См. также рецензию, «Электричество», № 5, 1952.



## Об изобретении расщепленных проводов

Доктор техн. наук В. И. ПОПКОВ и инж. Л. З. СИДЛИК  
Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Осуществление сверхдальних передач электроэнергии трехфазным током при напряжениях 400 кВ стало возможным в значительной мере благодаря применению для линий передачи так называемых расщепленных проводов, т. е. подвески на каждую фазу нескольких (2...4) параллельных проводов, удаленных друг от друга на расстояние в несколько десятков сантиметров. Такой расщепленный провод, обладая повышенной по сравнению с одиночным проводом емкостью и меньшей индуктивностью, позволяет передать при прочих равных условиях большую мощность (уменьшение волнового сопротивления линии и увеличение натуральной мощности передачи).

С другой стороны, расщепление, как бы увеличивая эффективный диаметр провода, позволяет существенно повысить критическое напряжение короны. Тем самым при соответствующем выборе диаметра составляющих проводов и расстояния между ними открывается возможность применения столь высоких рабочих напряжений передачи, как 400 кВ, при экономически и технически приемлемом уровне потерь энергии на корону и уровне радиопомех при коронировании линии.

Одиночные провода даже при диаметре гладкого полого провода до 50 мм не могут обеспечить, как показывают производившиеся исследования, тех же приемлемых условий. Наиболее эффективное использование расщепленные провода находят в самой мощной, дальней и высоковольтной передаче нашего времени — Куйбышевская ГЭС — Москва; каждая фаза этой передачи расщеплена на три провода диаметром 30,2 мм, расположенных по треугольнику со стороной 400 мм.

Расщепление проводов находит также применение в ряде зарубежных передач, причем даже в тех случаях, когда вопрос об уменьшении волно-

вого сопротивления линии играет второстепенную роль и когда выбор расщепленных проводов обусловлен в основном требованиями борьбы с короной. Можно утверждать, что применение расщепленных проводов является прогрессивным и составляет одну из наиболее характерных особенностей современных и будущих линий дальней передачи энергии трехфазным током.

В иностранных статьях и работах последних лет, посвященных исследованию короны на расщепленных проводах, идея и изобретение расщепленных проводов с целью устранения или уменьшения потерь на корону приписываются американским инженерам Томасу, Уайтхеду или Фачиоли [Л. 1].

Однако рассмотрение документальных данных об изобретении расщепленных проводов доказывает, вопреки иностранным претензиям, что расщепление проводов с целью снижения потерь на корону изобретено русским ученым академиком Владимиром Федоровичем Миткевичем в марте 1910 г.

Напомним историю вопроса. Впервые именно школой русских электротехников была не только высказана в открытой печати целесообразность применения расщепленных проводов с точки зрения явления короны, но и проведены исследования, экспериментально доказавшие возможность существенного повышения таким методом критического напряжения короны и снижения потерь на корону. На прогрессивную роль этого метода и важность его для будущих высоковольтных электропередач было впервые указано В. Ф. Миткевичем в его статье «Явление тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи», опубликованной в журнале «Электричество», № 7, 1910 г., причем статья датирована мартом 1910 г. [Л. 2].

Итак, остановимся на истории. Рабочее напряжение линий электропередач к 1908—1910 гг. в ряде стран достигло 60...110 кв. При таком напряжении на проводах линий стало возможным возникновение короны, а связанные с нею потери энергии приобретали существенное значение.

Это обстоятельство побудило электротехников и физиков заняться с указанного времени все более широким изучением короны переменного тока, с одной стороны, с целью выяснить влияние короны на работу линий электропередачи высокого напряжения и найти пути борьбы с этим явлением, а с другой стороны, с целью выяснения физического механизма короны переменного тока.

Наиболее обстоятельное для этого времени исследование короны переменного тока было проведено в России с 1910 г. по 1914 г. в Петербургском политехническом институте профессорами М. А. Шателеном и В. Ф. Миткевичем, при участии инженеров А. А. Горева и А. А. Чернышева. В период организации М. А. Шателеном в 1909—1910 гг. в Петербургском политехническом институте лаборатории высокого напряжения В. Ф. Миткевич выполнил исследование короны, результаты которого изложены им в упомянутой выше статье.

Это пионерское исследование, проведенное В. Ф. Миткевичем в период, когда техника электропередачи впервые столкнулась с явлением короны, значительно опередило иностранные работы в теоретическом и экспериментальном отношении, а также правильно, на много лет вперед определило перспективу развития вопроса о короне на проводах линий и способов устранения короны.

В своей статье В. Ф. Миткевич писал: «В современных высоковольтных линиях передачи практика уже подошла к тем условиям, при которых могут появиться тихий разряд и обусловленная им потеря энергии в линии». В работе был дан исчерпывающий обзор состояния вопроса о короне на 1910 г., были критически рассмотрены противоречивые экспериментальные данные иностранных авторов — Скотта, Мершона, Риана (Scott, Mershon, Ryan) и др.

На основе исследований, проведенных в Политехническом институте, В. Ф. Миткевич дал первую обоснованную формулу для расчета критического напряжения короны.

Следует заметить, что обзорные статьи по тому же вопросу в иностранной технической литературе появились позже статьи В. Ф. Миткевича и в значительной степени повторяли его выводы [Л. 3]. Отметим попутно, что в 1910 г. М. А. Шателен, базируясь на экспериментальных данных В. Ф. Миткевича, принимал участие в литературной дискуссии по короне, проводившейся на страницах трудов AIEE — Американского института инженеров-электриков [Л. 4].

В своей работе В. Ф. Миткевич в первую очередь пришел к выводу, который позже был повторен и иностранными исследователями: «...применение повышенного рабочего напряжения нала-

гает известные условия при выборе диаметра проводов, заставляет увеличивать этот диаметр» [Л. 2].

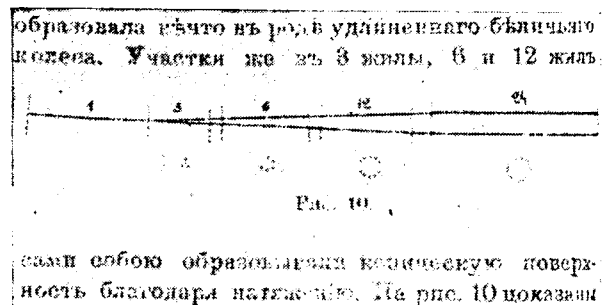
Говоря о дальнейших перспективах развития линий электропередач, В. Ф. Миткевич с большой научной прозорливостью в своей статье указывал:

«Рано или поздно придется выработать такие типы проводов, которые при относительно малом сечении были бы эквивалентны проводам с очень большим диаметром. Одно из многих возможных решений этой задачи состоит в следующем. Провод составляется из ряда отдельных жил, отстоящих одна от другой и расположенных по некоторой цилиндрической поверхности в качестве образующих этой поверхности. Электрическое поле у поверхности каждой жилы будет в этом случае не то, что в случае одной жилы, примененной отдельно в качестве самостоятельного проводника. Должно ожидать, что критическое напряжение для группы жил данного диаметра будет больше, чем для каждой такой жилы в отдельности». [Подчеркнуто нами Л. и С.].

Следует особенно подчеркнуть, что В. Ф. Миткевич уже в начале 1910 г. четко сформулировал мысль о снижении градиентов на поверхности проводов путем их расщепления, которое вызывает повышение критического напряжения и соответствующее снижение потерь на корону.

Для экспериментального подтверждения целесообразности расщепления проводов В. Ф. Миткевичем был проделан следующий остроумный опыт:

«Из медных проволок диаметром в 1 мм был приготовлен сложный провод длиной около трех метров. Вначале была одна проволока, далее она разветвлялась на три. Еще дальше каждая из этих трех проволок раздваивалась, так как на третьем участке было всего 6 проволок — жил. Точно так же путем раздваивания на четвертом участке получалось 12 жил и на пятом — 24 жилы. Все эти проволоки натягивались и при помощи особых дисков с зарубинками на окружности все 24 жилы пятого участка располагались на цилиндрической поверхности с диаметром основания, равным 100 миллиметрам. Проволоки, конечно, равно отстояли одна от другой. Эта часть образовала нечто вроде удлинненного беличьего колеса».



Приводим рисунок, заимствованный из указанной статьи В. Ф. Миткевича.

На этот сложный проводник подавалось напряжение, и по началу свечения короны производилось определение критического напряжения для каждой части проводника. Очевидно, что конечная форма части расщепленного проводника давала возможность наблюдать продвижение свечения короны слева направо по мере повышения напряжения (см. рисунок).

В результате этого опыта В. Ф. Миткевич пришел к выводу: «...раздвигая отдельные жилы, мы увеличиваем при том же сечении величину критического напряжения более, чем в 2 раза. Конечно для того, чтобы практически осуществить подобного рода проводник, необходимо выработать его конструкцию, т. е. необходимо разработать и проверить на опыте способ сборки такого проводника, способ его подвески и т. д. Все это, однако, не представляет на мой взгляд непреодолимых трудностей».

Как известно, советскими инженерами созданы конструкции расщепленных проводов и арматура для их подвески, т. е. трудности, о которых говорил В. Ф. Миткевич в своей статье в 1910 г., в наше время были успешно преодолены.

Уже после опубликования упомянутой статьи В. Ф. Миткевича, Уайтхед 15 сентября 1910 г. запатентовал в США расщепленные провода (опубликовано 18 ноября 1913 г. в *Official Gazette*). При этом Уайтхед повторил идею В. Ф. Миткевича в том, что «...при этом точка пробоя изоляции повышается по сравнению с одним проводником...» [Л. 5].

Еще позже, 27 апреля 1911 г., патент на расщепленные провода как «способ предупреждения потерь на корону» получил в США Фачиоли (опубликовано 4 июля 1916 г. в *Official Gazette*) [Л. 6]. При этом интересно заметить, что в своей патентной заявке Фачиоли при описании расщепленного проводника воспользовался дословным выражением В. Ф. Миткевича о том, что расщепленный проводник имеет вид «беличьего хвоста».

До Уайтхеда и Фачиоли предложение о расщеплении проводов высказывалось в США Томасом, предлагавшим путем расщепления воздействовать на емкость и индуктивность линии. При этом Томас явление короны не рассматривал и о расщеплении проводов с целью устранения короны не высказывался. Факт выдачи патентов Уайтхеду и Фачиоли указывает на то, что американское Патентное бюро (*Patent Office*) также не связывало предложение Томаса в его статье 1909 г. с явлением короны. И это действительно подтверждается при чтении статьи Томаса, в которой явление короны даже не упоминается [Л. 7].

Подробно приведенный выше материал статьи В. Ф. Миткевича и простое сопоставление даты ее опубликования с датами американских патентов неоспоримо свидетельствуют, что применение расщепленных проводов с целью повышения критического напряжения короны на проводах линий является изобретением русских ученых; впервые оно было описано в открытой печати, доступной, конечно, и иностранным инженерам, русским академиком Владимиром Федоровичем Миткевичем в марте 1910 г.

#### Литература

1. В. L. Tremaine, A. R. Jones, O. Naef. Потери на корону при сверхвысоких напряжениях. *Westinghouse Eng. Sept.* стр. 144, 1951.
2. В. Ф. Миткевич. Явление тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи. *Электричество*, стр. 185, № 7, 1910.
3. P. Weidig und A. Jaensch. Явление короны на проводах. *Electrotechn. Zeitschrift*, т. 34, стр. 637, № 23 и стр. 679, № 24, 1913.
4. M. A. Chatelaine. Письменное выступление в дискуссии. *Transac. A. I. E. E.*, т. 29, ч. II, стр. 1231, 1910.
5. J. B. Whitehead. Система электрической передачи. Американский патент № 1, 078, 711 от 15/IX 1910. *Official Gazette* от 18/XI 1913.
6. G. Faccioli. Способ предупреждения потерь на корону. Американский патент № 1, 190, 135 от 27/IV 1911. *Official Gazette* от 4/VII 1916.
7. P. H. Thomas. Расчет высоковольтной линии. *Transac. AIEE*, т. 28, ч. I, стр. 641, 1909.



## К пересмотру правил защиты подземных металлических сооружений от коррозии

Кандидат техн. наук Н. А. ЦЕКУН

Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова

На базе существующих правил 1940 г. и опыта многих научных коллективов по внедрению электрической защиты подземных сооружений от коррозии вполне своевременно приступить к составлению новых Правил:

а) по электрической защите подземных металлических сооружений от коррозии (в зонах блуждающих токов и вне этих зон) и б) по содержанию и эксплуатации сети обратных токов электрического рельсового транспорта.

Независимо от того, в каком виде будут оформлены новые Правила, считаем необходимым сделать ряд замечаний по Правилам 1940 г.

1. Глава ж Правил рекомендует осуществлять защиту на «существующих и вновь устроенных подземных металлических сооружений при обнаружении на них опасных зон». Теория коррозионных явлений настолько разработана у нас в Союзе, а практика исследований коррозионного состояния отдельных трасс настолько совершенна, что проектирование всех защитных устройств может быть выполнено одновременно с составлением общего проекта сооружения, и все защитные устройства возможно смонтировать одновременно со строительством объекта.

2. Все мероприятия по защите подземных сооружений от коррозии в зонах действия блуждающих токов должны быть разбиты на три группы и им должны соответствовать три главы Правил, содержащие изложение мероприятий: а) по уменьшению блуждающих токов, б) по защите подземных сооружений от проникновения в них блуждающих токов, в) по нейтрализации и отводу проникших в подземное сооружение блуждающих токов.

Мероприятия, входящие в каждую из приведенных групп, указаны на рисунке.

3. Правила должны иметь разделы: I. Область применения. II. Терминология. III. Мероприятия по уменьшению блуждающих токов. IV. Мероприятия по защите подземных сооружений от проникновения в них блуждающих токов. V. Мероприятия по нейтрализации и отводу проникших в подземное сооружение блуждающих токов. VI. Методика обследования коррозионного состояния подземного сооружения. VII. Методика исследования взаимного влияния сооружений, защищенных электрическими методами, и нормативы

*Состояние разработки вопросов теории и практики защиты металла от коррозии позволяет одновременно с уточнением Правил [Л. 1] приступить к созданию «Правил по электрической защите подземных металлических сооружений от коррозии» как основного, наиболее экономичного и эффективного метода защиты.*

влияния. VIII. Методика обследования состояния сети обратных токов электрического рельсового транспорта как источника блуждающих токов.

4. § 1,6 распространяет Правила на троллейбусные линии, в которых один из троллейбусных проводов имеет заземление или металлическое соединение с рельсами трамвайных линий.

Как показывает практика, подключение троллейбусного провода к рельсам обычно осуществляется на окраинных участках сети для отвода тяговых токов троллейбусной сети через рельсы на подстанцию, от которой совместно питаются трамвайная и троллейбусная сети. Подключение приводит к значительному увеличению токов в рельсовой сети, на которые она не рассчитана и, значительно возрастанию блуждающих токов. Такое питание троллейбусной сети, как способствующее резкому возрастанию блуждающих токов, должно быть запрещено.

5. § 2,б. Вместо термина «питающие фидеры» (§ 3,б) следует применить термин «питающий кабель», пояснив его: «кабель, отходящий от положительной шины тяговой подстанции и подключаемый к контактному проводу».

6. Термин «отсасывающие фидеры» (§ 3,в) также надо заменить термином «отсасывающий кабель», пояснив его: «кабель, отходящий от отрицательной шины тяговой подстанции и подключаемый к рельсам». Слово фидер всюду следует заменить словом кабель. Термин должен быть дан в единственном числе.

7. Термин «изолирующая муфта» (§ 3,ж) характеризует конструктивное выполнение изолирующего стыка на металлической оболочке кабеля. При наличии всеохватывающего термина «изолирующий стык» нет необходимости приводить как термин частное конструктивное выполнение.

8. Термин «электроизолирующее основание» (§ 3,н) неудачен. Нельзя практически создать основание рельсового пути, полностью изолирующее рельсы от окружающих слоев земли. Следует заменить этот термин новым: «электроизолированное основание», пояснив его как основание рельсового пути, обладающее малой электропроводностью. Также неудачен термин «изолирующая канализация» (§ 3,р), который целесообразно заменить термином «электроизолированная канализация».



9. Анодные и катодные зоны на подземных сооружениях возникают не только вследствие блуждающих токов электрических железных дорог, они возникают и на сооружениях, расположенных вне зон блуждающих токов. Эти термины целесообразно уточнить следующим образом (§ 3,п):

Анодная зона — зона подземного металлического сооружения, в которой сооружение обладает более высоким потенциалом, чем окружающие его ближайшие слои почвы.

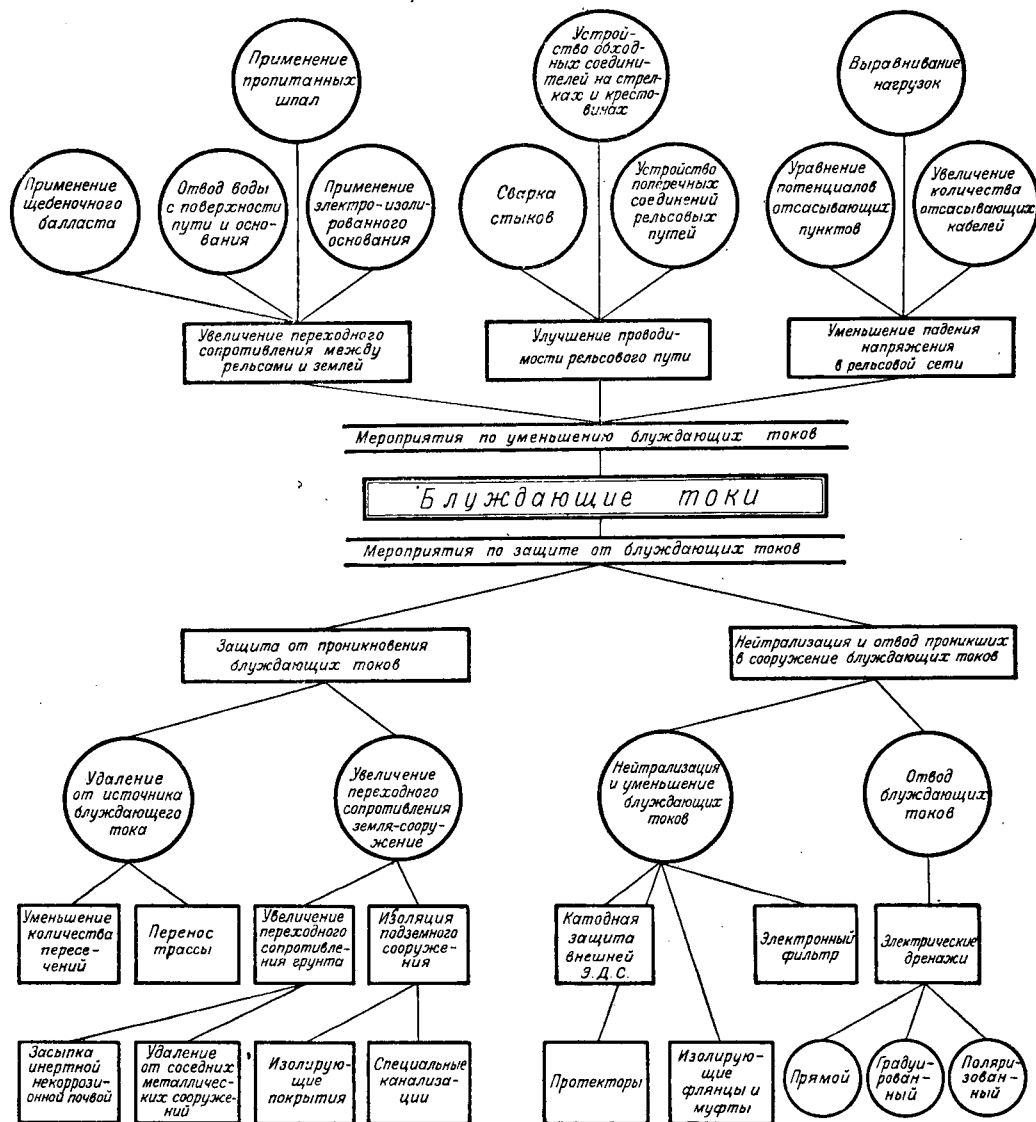
Катодная зона — зона подземного металлического сооружения, в которой сооружение обладает более низким потенциалом, чем окружающие его ближайшие слои почвы.

10. Все электрические методы защиты предусматривают создание отрицательного потенциала на подземном сооружении относительно окружающих его слоев почвы, т. е. обеспечивают катодную защиту металла. Но

для того, чтобы охарактеризовать, каким методом достигнуто катодное состояние металла, надо сохранить термины: дренажная защита, катодная защита и протекторная защита, уточнив содержание каждого из них.

11. При электрическом дренировании из подземного сооружения отводятся проникшие в него (в катодной зоне) блуждающие токи обратно не только в рельсовую сеть (§ 3,т), но и к отсасывающим кабелям, а также и непосредственно к отрицательным шинам тяговых подстанций. В правилах термин сформулирован не точно, его надлежит сформулировать так: «электрический дренаж — отвод блуждающих токов, проникших в подземное металлическое сооружение, в сеть обратных токов электрического рельсового транспорта, путем металлического соединения подземного сооружения через дренажное устройство с элементами этой сети (отрицательной шиной тяговой подстанции, отсасывающим кабелем, тяговым рельсом)».

12. Термин «дренажное устройство» может быть пояснен следующим образом: «сово-



купность элементов токопроводящей цепи, предназначенной для отвода блуждающих токов с подземного сооружения в сеть обратных токов электрического рельсового транспорта и состоящее из регулирующего реостата, амперметра, рубильника и предохранителя, смонтированные в общем кожухе, и соединительных кабелей».

13. Термин катодная защита (§ 3,ф) следует пояснить так: «защита металла от коррозии с помощью постоянного тока от специального источника, при которой защищаемый объект присоединяется к отрицательному полюсу источника (в качестве катода), а в качестве анода применяется металл, слабо подвергающийся разрушению и легко заменяемый».

14. Термин «пункт дренирования» (§ 3,у) должен в своем определении быть увязан с методами электрической защиты и его следует пояснить так: «место присоединения к защищаемому сооружению кабеля от дренажного или катодного устройства».

15. Коррозионное состояние подземного сооружения характеризуется в основном двумя элек-



трическими величинами: а) потенциалом относительно земли, б) плотностью токов утечки. Эти два понятия должны быть уточнены (§ 3,ю):

Потенциал относительно земли — потенциал подземного металлического сооружения относительно окружающих его ближайших слоев почвы или другой среды, имеющий контакт с почвой.

Положительный потенциал относительно земли указывает, что сооружение имеет более высокий потенциал, а отрицательный потенциал относительно земли, — что сооружение имеет более низкий потенциал, чем ближайшие слои почвы, окружающие сооружение.

Плотность токов утечки — ток, выходящий с подземного сооружения или входящий в него через  $1 \text{ дм}^2$  для поверхности.

Положительный знак плотности токов утечки указывает на выход тока из подземного сооружения и разрушения его, отрицательный — соответствует зоне входа тока в подземное сооружение.

16. В § 18 должно быть указано, что увеличение переходного сопротивления между рельсами и землей достигается и применением щебеночного балласта.

17. В § 75 указано, что «в местах, где уровень грунтовых вод находится выше подземных сооружений, канализация должна быть изолирующая». Стоимость специальной электроизолированной изоляции очень велика. Между тем, полная защита кабелей и трубопроводов от коррозии вполне возможна электрическими методами и в зонах с высокими грунтовыми водами. С точки зрения коррозионной защиты строительство специальной канализации не вызывается необходимостью.

18. Целесообразность установки изолирующих стыков (§ 83) должна быть доказана предварительными измерениями и поэтому не следует рекомендовать их установку на всех пересечениях с рельсами электрических железных дорог.

19. § 97 должен быть уточнен следующим образом: «Отрицательный потенциал по отношению к ближайшим слоям почвы сообщается подземному сооружению с помощью электрических дренажей, катодных установок или протекторов».

20. Критерий безопасности влияния, установленный Правилами (§ 99), недостаточен [Л. 8]. Определение характера влияния сооружения, защищенного электрическими методами, на соседние подземные сооружения должно устанавливаться на основе непосредственных измерений на этих сооружениях. В качестве критерия отсутствия опасного влияния предлагается следующее:

а) Если потенциал подземного сооружения относительно земли при отключенной защите отрицателен, он не должен изменяться на положительный под влиянием включения электрической защиты соседнего сооружения.

б) Если потенциал подземного сооружения относительно земли положителен и при включении электрической защиты на соседнем сооруже-

нии величина его возрастает, — это возрастание не должно превосходить  $+0,1 \text{ в}$ .

в) Всякое снижение потенциала подземного сооружения вследствие включения электрической защиты на соседнем сооружении в пределах до  $-0,5 \text{ в}$  является допустимым.

21. Электрические методы защиты полностью себя оправдали на практике. Их эффективность и экономичность доказаны и они должны быть широко рекомендованы для защиты подземных металлических сооружений от коррозии.

В Правила надлежит внести следующие уточнения.

Пункт 103: «подземные металлические трубопроводы в зонах действия блуждающих токов должны обязательно защищаться электрическими дренажами».

Примечание. Электрическая защита теплопроводов и чугунных водопроводов, имеющих изолирующие стыки, может быть осуществлена только после устройства шунтирующих перемычек.

22. Пункт 104 должен быть дополнен: «для контроля эффективности действия электрической защиты подземных сооружений, не имеющих смотровых колодцев, на сооружениях должны быть оборудованы контрольные пункты и проводники».

23. В разделе ж должны быть добавлены пункты следующего содержания:

а) Включение электрической защиты на подземном сооружении может быть разрешено междуправительственной комиссией по борьбе с коррозией при городском совете после установления отсутствия опасного влияния этой защиты на другие сооружения.

б) В городских условиях для защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами рекомендуется применение электрических дренажей и протекторов.

в) Катодная защита должна применяться на подземных сооружениях вне зон действия блуждающих токов и на участках отсутствия сложного переплетения сетей подземных сооружений.

Приведенные замечания, конечно, не исчерпывают всех уточнений, подлежащих внесению в Правила.

#### Литература

1. «Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами», утвержденные Наркоматом коммунального хозяйства 23 марта 1940 г. Связьиздат, 1940. Госэнергоиздат, 1943.
2. В. А. Кистяковский. Коррозия металлов. ОНТИ, 1931.
3. Г. В. Акимов. Теория и методы исследования коррозии металлов, 1945.
4. Г. В. Акимов. Основы учения о коррозии и защите металлов. Металлургиздат, 1946.
5. Н. Д. Томашов. Коррозия металлов с кислородной деполяризацией. Изд. АН СССР, 1947.
6. Н. Д. Томашов. Теория коррозии металлов. Металлургиздат, 1952.
7. Резолюция научно-технического совещания по защите трубопроводов и кабелей от коррозии 21—23 ноября 1949 г. Баку, АЗНИТОЭ и АЗИИ, 1950.
8. В. С. Кальман. О нормативах безопасности влияния электрической защиты подземных сооружений от коррозии. Электричество, № 7, 1948.

## К статье М. И. Гитмана „Вопросы электроснабжения сельского хозяйства в зонах крупных гидроэлектростанций“

(Электричество, № 9, 1952)

Доктор техн. наук И. А. БУДЗКО

МИМЭСХ

Электрификация в районах крупных гидроэлектростанций на Волге, Днепре и Дону требует сооружения сплошных сетей, охватывающих все населенные пункты и снабжающих электроэнергией всех полевых потребителей. Потребность в проводниковых материалах и лесу для таких сетей весьма значительна; следует принять все меры к ее уменьшению, а работу сетей сделать более надежной и экономичной.

В статье М. И. Гитмана поставлены и в ряде случаев правильно решены многие вопросы электроснабжения сельского хозяйства. Применение трех ступеней напряжения 110/35/10 кВ является, по видимому, целесообразным. Справедливо также пожелание о выпуске электродвигателей для крупных насосных станций на напряжение 10 кВ. Можно согласиться с предлагаемой упрощенной схемой соединений сельских подстанций 110 кВ. Правда, возможность применения одного трансформатора вместо двух на таких подстанциях весьма сомнительная, так как бесперебойность электроснабжения электротракторов, комбайнов, насосных станций орошения и тому подобных потребителей должна быть высокой.

Наряду с правильными положениями М. И. Гитман допускает и ряд сомнительных выводов. Прежде всего неправилен самый подход к расчетам сельских сетей. Исключительно важное значение здесь имеет выбор допустимой потери напряжения во всех звеньях электрической сети. Известно, что ее определение можно сделать только на основе тщательного расчета, исходя из допускаемых отклонений напряжения. Такой расчет должен предварять все остальные расчеты электрической сети. Этого в работе не сделано, а просто взяты произвольные величины допускаемых потерь напряжения (6% в сети 35 кВ и в сети 10 кВ для электропахоты 15%).

Отсутствие обоснования важнейшей величины — допустимой потери напряжения — ставит под сомнение все числовые выводы работы. Можно с уверенностью сказать, что при регулировании напряжения на подстанциях 110/35 кВ величины допускаемых потерь напряжения могут быть увеличены против принятых в работе, а следова-

тельно, могут быть значительно облегчены сети. Регуляторы же для трансформаторов 110 кВ изготавливаются нашей промышленностью.

Автор статьи правильно ставит вопрос о повышении плотности тока в сельских сетях, но считает возможным для этого уменьшить радиус действия сетей 10 кВ и, следовательно, увеличить число подстанций 35/10 кВ. Это дорогой путь. Можно добиться желаемого результата значительно дешевле путем применения реулирования напряжения на трансформаторах 35 кВ, 10 кВ и в сети низкого напряжения. Однако этот вопрос затронут в статье лишь в выводах; никакого обоснования при этом ему не дается и не показывается экономическая целесообразность таких устройств.

Из статьи неясно, какая абсолютная величина экономической плотности тока принята при расчетах. Следовало бы четко указать, что для сельских сетей такая величина не установлена, а потому рассуждения о приближении к ней действительных плотностей тока по меньшей мере неопределенны. Необходимо провести соответствующие исследования с целью установления экономической плотности тока для сельских сетей.

Основным путем для снижения действительной потери напряжения в сельских сетях М. И. Гитман считает применение параллельно включенных и регулируемых под нагрузкой статических конденсаторов. Это путь возможный, но не единственный. Следует сравнить его с применением конденсаторов, включаемых последовательно. Предварительные расчеты показывают, что во многих случаях это более экономичный способ.

В заключение следует отметить, что Гипросельэлектро проводит работу по проектированию сельских сетей в районе крупных гидроэлектростанций почти в полном отрыве от широких кругов научной и инженерной общественности, научных институтов, вузов и других организаций. Подавляющее большинство замечаний, содержащихся в передовой статье «Правды» от 16 июня с. г. «Долг работников сельскохозяйственной науки» вполне приложимы с этой точки зрения и к Гипросельэлектро. Обсуждение статьи М. И. Гитмана должно быть первым шагом для привлечения к разработке этого вопроса значительно большего количества специалистов по электрификации сельского хозяйства.

## Правила устройства электротехнических установок<sup>1</sup>

Инж. М. Д. ГОРЕНШТЕЙН

Новосибирскэнерго

Считаю необходимым внести следующие изменения и дополнения по второму выпуску Правил устройства электротехнических установок.

**Общая часть.** § 15. Желательно дать в виде приложения таблицу активного действия наиболее распространенных химических веществ на металлы и изоляционные материалы электроустановок с указанием предельных концентраций, при которых допускается установка электрооборудования в нормальном исполнении.

§ 29. В связи с многочисленными недоразумениями следует специально выделить вопрос об огнестойкости пластических масс.

§ 42. Необходимо изменить редакцию второго абзаца, относящегося к электрооборудованию на напряжение свыше 1000 В, исключив требование об установке ограждений, предотвращающих доступ к электрооборудованию. Должны быть недоступны лишь токоведущие части. Соблюдение § 42 требует установки ограждений вокруг открытых электродвигателей компрессоров, насосов и т. п., где может находиться ремонтный персонал, не имеющий квалификации электриков, что излишне.

§ 44. Необходимо дополнить примечанием, что это требование не относится к мелким тупиковым подстанциям.

§ 49. Применение счетных ограждений в производственных помещениях следует ограничить, так как они более дороги, трудоемки и менее надежны.

§ 50. Необходимо добавить примечание, что для электропомещений высокого и низкого напряжения, доступных только обслуживающему персоналу, устройство специальных ключей и инструментов для открывания ограждений не требуется.

<sup>1</sup> См. Электричество № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; № 7 и 12, 1951; № 1, 2, 5 и 11, 1952.

Раздел *Защита от перенапряжений*. § 4. Дополнить понятием о защитном угле троса.

§ 10. Необходимо изменить редакцию, устранив противоречие с § 3 раздела «Автоматика электрических систем».

Устройство АПВ в целях грозозащиты на всех воздушных линиях электропередачи излишне. В частности совершенно не требуется АПВ точки зрения грозозащиты для воздушных неотвеченных линий 2...10 кВ.

§ 13. Рекомендацию о выполнении деревянных траверс на металлических опорах линий 35 кВ, проходящих по незастроенной местности, следует исключить вследствие больших конструктивных неудобств в креплении деревянных траверс к одноцепным металлическим опорам и увеличения объема ремонтных работ, связанных с загниванием древесины. Наличие АПВ на линиях 35 кВ и выше, требуемое § 10, обеспечивает достаточную надежность таких линий.

§ 14. Расстояние по дереву между изоляторами на линиях 6...10 кВ не менее 1 м чрезмерно увеличено и приводит к ненужному повышению одноцепных опор с двойным креплением проводов при установке изоляторов на крючках. Как показывает опыт эксплуатации таких линий, даже в районах с интенсивной грозовой деятельностью расстояние между изоляторами по дереву может быть уменьшено до 0,5...0,6 м.

§ 18. Необходимо для ясности указать, на какой из линий (верхней, нижней или на обеих) должны устанавливаться разрядники. Практически достаточно установить по одному комплекту трубчатых разрядников на ближайших опорах каждой из пересекающихся линий.

Раздел следует дополнить указаниями о минимальных расстояниях между фазами вентильных и трубчатых разрядников для разных напряжений, о расположении зоны выхода трубчатых разрядников и о способе заземления (раздельное или общее) отдельных фаз трубчатых и вентильных разрядников для разных напряжений.

Раздел *Нагрузки на кабели и шины*. Нормы должны быть рассчитаны на применение не только в средней полосе, но и в районах холодного климата. Поэтому таблицы 7, 8 и 16 поправочных коэффициентов на температуру почвы и воздуха необходимо расширить в сторону отрицательных температур до  $-40^\circ$ . Расчетные максимальные нагрузки часто соответствуют периодам низких температур и учет повышающих коэффициентов будет способствовать экономии цветных металлов. Следует также уточнить понятие расчетной температуры при прокладке как внутри, так и вне помещений.

## Инж. В. А. КАРАМАН

### Уралэлектромонтаж

Раздел *Объем и нормы приемосдаточных испытаний* не свободен от существенных недостатков, вызвавших уже ряд замечаний в периодической литературе.

Указание § 5 возлагает всю ответственность за принятие решений на персонал монтирующей или эксплуатирующей организации, т. е. на субъективное мнение лиц, не всегда могущих оказывать достаточно компетентными для решения возникающих в этом случае вопросов. Поэтому в нормах следует дать хотя бы общие рекомендации или границы приемлемых величин.

Подраздел 2 «Релейная защита и автоматика» целесообразно переработать, расположив материал аналогично другим подразделам с указанием, в чем должны заключаться проверки трансформаторов тока и напряжения, катушек приводов и выключателей, а также другой аппаратуры. Это вызывается тем обстоятельством, что в подразделе 10 даны указания по испытанию измерительных трансформаторов, в подразделе 7 — указания по испытанию приводов масляных выключателей, и остается неясным, какие еще проверки этих аппаратов предусматриваются подразделом 2.

В § 8 следует указать, что проверка защиты и автоматики производится при полностью собранной схеме, чтобы могли быть выявлены ложные цепи, достаточная мощность трансформаторов тока и другие параметры и особенности схемы.

В § 10 в графе «нормы испытаний» следует дать рекомендации, которые бы характеризовали состояние изоляции машин, например, в такой редакции: «коэффици-

циент абсорбции должен быть не ниже  $\frac{R_{60}}{R_{15}} \geq 1,3$  (при температуре машин  $15...30^\circ\text{C}$ ), где  $R_{60}$  — сопротивление изоляции, измеренное мегомметром по истечении 60 с от момента приложения напряжения, а  $R_{15}$  — по истечении 15 сек. Кроме того, изоляция обмоток должна быть испытана напряжением, повышенным на 10% против номинального.

§ 14 целесообразно дать в такой редакции: «должно отсутствовать замыкание на корпус». Замечания о надежности самых ориентировочных или общих нормативных данных касаются также §§ 18, 29, 31, 32.

По подразделу 5 «Электродвигатели переменного тока» следует заметить, что электродвигатели небольших напряжений и мощностей не имеют заводских характеристик с которыми можно было бы сравнивать результаты испытаний напряжений и, в частности, по § 40. В данном случае подобно § 293 «Правил технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий» следует принять нижний предел сопротивления изоляции, равный (для температуры, близкой к рабочей):

$$R_{из} = \frac{U_{ном}}{1000 + 0,01 P_{ном}},$$

где  $R_{из}$  — сопротивление изоляции,  $\text{МГом}$ ;

$U_{ном}$  — номинальное напряжение, в;

$P_{ном}$  — номинальная мощность,  $\text{кВт}$ .

§ 42 следует оговорить, что для электродвигателей напряжением до 380 в при отсутствии испытательного оборудования допускается испытание изоляции производя мегомметром напряжением до 1000 в с длительностью приложения напряжения не менее 1 мин и дать примечание о том, что подъем и снятие испытательного напряжения должны производиться плавно или ступенями.

В § 56 включено в объем испытаний измерение сопротивления изоляции обмоток, причем сама величина сопротивления изоляции не нормируется. Для того чтобы это испытание не превращалось в формальность, следует отворить минимально допустимый коэффициент абсорбции

$\frac{R_{60}}{R_{15}} \geq 1,3$ , где обозначения такие же, как и выше.

Эта величина является еще недостаточно обоснованной, но дальнейшие практические исследования дадут возможность ее уточнить. Кроме того, в нормах должна быть указана предельная допустимая величина снижения сопротивления изоляции трансформатора по сравнению с заводскими испытаниями. Эта величина может быть принята в соответствии § 250 «Правил технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий» не более 30%.

В § 57 указано, что «изоляция должна быть сухой». Определение увлажнения изоляции трансформаторов производится в настоящее время путем сопоставления результатов измерения емкости обмоток трансформатора, либо при различных частотах на специальном приборе контроля влажности, либо другими способами при разных температурах трансформатора. Этот метод нашел всеобщее признание, и в нормативной части § 57 могут быть даны рекомендуемые приемлемые пределы отношений емкостей при разных частотах или разных температурах, а именно:

$$\frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,2 \text{ при температуре } 10^\circ\text{C},$$

$$\frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,3 \text{ при температуре } 20^\circ\text{C},$$

где  $C_2$  — емкость при 2  $\mu\text{Ф}$ , а  $C_{50}$  — при 50  $\mu\text{Ф}$ .

В § 66 и § 94 должно быть указано, что ток холостого хода трансформаторов не должен превышать величину, установленную соответствующими ГОСТ.

В § 70 величина сопротивления контактов должна нормироваться с указанием максимальных абсолютных значений.

В подразделе 8 «Разъединители и шины» должен быть расширен объем испытаний включением дополнительного испытания: «проверка правильности фазировки».

Подраздел 13 следует дополнить определением целостности жил кабеля.

## Инж. М. Д. ГЛЕЙЗЕР

## Узбекское отделение ВНИТОЭ

Вопрос об использовании конструкций открытых подстанций 110 кВ и выше для установки молниеотводов всегда положительно решался в «Правилах устройства электротехнических установок». Поэтому совершенно неправильной является практика осуществлять грозозащиту этих подстанций отдельно стоящими молниеотводами.

Что же касается подстанций 35 кВ, то вопрос об устройстве их грозозащиты в «Правилах», выпускавшихся в разное время, решался различно. Нам кажется необоснованной та категоричность, с которой «Правила» последнего выпуска [Л. 1] требуют осуществления грозозащиты подстанций 35 кВ, включая вводные пролеты линий, отдельно стоящими молниеотводами. При хорошо проводящих грунтах и малых расчетных токах молний (в горных районах или там, где эти малые токи молний установлены замерами или на основании многолетних наблюдений) использование конструкций подстанций 35 кВ для установки молниеотводов и линейных порталов для подсоединения к ним тросов линий электропередачи вполне возможно. Ниже сделана попытка доказать это расчетом.

Составим эквивалентные схемы замещения цепей, пользуясь расчетным методом форсирования тока молний через полное сопротивление поражаемого объекта.

Схема замещения для линейного портала с отходящими от него тросами представлена на рисунке. Схема предусматривает худший случай одиночного двухстоечного портала. При подстанционном портале со стержневым молниеотводом нижняя ветвь в приведенной схеме отпадает.

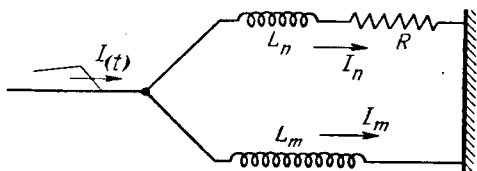


Схема замещения для линейного портала с отходящими от него тросами.

$L_n$  — индуктивность портала,  $L_m$  — индуктивность тросов,  $R$  — действующее импульсное сопротивление заземления портала.

Для схемы, относящейся к случаю одиночного двухстоечного портала, при единичном толчке тока действительны следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} 1 &= I_n + I_m; \\ \frac{dI_m}{dt} L_m &= \frac{dI_n}{dt} L_n + I_n R; \\ p L_m (1 - I_n) &= p I_n L_n + I_n R, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

откуда

$$I_n = \frac{p L_m}{p L_m + p L_n + R} = \frac{L_m}{L_m + L_n} \cdot \frac{p}{p + \frac{R}{L_m + L_n}}. \quad (2)$$

При  $I(t) = at = \frac{a}{p}$ , где  $a$  — крутизна тока молнии,

$$I_n = a \frac{L_m}{L_m + L_n} \cdot \frac{1}{p + \frac{1}{T_k}}, \quad (3)$$

где  $T_k = \frac{L_m + L_n}{R}$  — постоянная времени схемы.

В результате решения уравнения (3) получаем:

$$I_n = a \frac{L_m}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T_k}}). \quad (4)$$

Напряжение на портале

$$U_n = I_n R + \frac{dI_n}{dt} L_n = a L_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{L_n}{T_k R} \right) e^{-\frac{t}{T_k}} \right]. \quad (5)$$

Напряжение на заземлении

$$U_R = I_n R = a L_m (1 - e^{-\frac{t}{T_k}}). \quad (6)$$

Для схемы, относящейся к portalу со стержневым молниеотводом,

$$U_{n1} = \frac{a}{p} (p L_n + R) = a (L_n + R t); \quad (7)$$

$$U_{R1} = a R t. \quad (8)$$

Задача сводится к определению участвующей в ответвлении токов молнии величины сопротивления заземления портала, при которой обратное перекрытие с портала на провода или с заземляющего устройства на расположенный рядом с порталом разъединитель или выключатель не будет иметь места.

Как известно, при прямом ударе молнии на изоляцию линии электропередачи ложится не все напряжение, устанавливающееся на тросе (или опоре), а только часть его, равная разности потенциалов между проводом и тросом. Эта разность

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 - \varphi_1 \frac{C_{21}}{C_{22}}. \quad (9)$$

Если емкость провода линии электропередачи относительно земли  $C_{22}$  соизмерима с емкостью между проводом и тросом  $C_{21}$ , то емкость провода на подстанции относительно земли вследствие большой емкости трансформаторов, втулок выключателей и пр. во много раз больше емкости провода относительно троса, а отношение  $\frac{C_{21}}{C_{22}}$  весьма мало. Следовательно,

$$\varphi_1 - \varphi_2 \approx \varphi_1,$$

т. е. все напряжение, устанавливающееся на тросе, следует считать приложенным к изоляции проводов. Это обстоятельство значительно снижает эффективность тросов на подстанции по сравнению с их эффективностью на линии электропередачи. Если к тому же учесть размер последствий при маловероятном, но возможном обрыве троса, то защита подстанции тросовыми молниеотводами вряд ли может считаться целесообразной.

Из сказанного следует, что напряжение на портале  $U_n$ , определяемое по формуле (5), следует считать целиком приложенным к изоляции проводов на портале.

Приведем числовой пример.

Волновое сопротивление двухстоечного портала

$$z_n = 0,5 \cdot 150 = 75 \text{ ом [Л. 2]}.$$

При высоте портала 8 м и длине траверсы 6 м

$$L_n = \frac{75}{300} (8 + 0,5 \cdot 6) = 2,75 \text{ мкгн}.$$

Собственное волновое сопротивление одного троса

$$z_{11} = 400 \text{ ом [Л. 2]}.$$

Взаимное волновое сопротивление тросов при высоте подвеса 11 м

$$z_{12} = 138 \lg \frac{2 \cdot 11}{6} = 84 \text{ ом}.$$

Волновое сопротивление двух тросов

$$z_m = \frac{400 + 84}{2} = 242 \text{ ом}.$$

При вводном пролете  $l = 37$  м

$$L_m = \frac{242}{300} \cdot 37 = 30 \text{ мкГн.}$$

Удельное сопротивление грунта

$$\rho = 1 \cdot 10^4 \text{ ом. см.}$$

Пусть расчетный ток молнии

$$I_m = \frac{150}{2} = 75 \text{ кА [Л. 2].}$$

Тогда

$$t = 2 \text{ мксек [Л. 2]} \text{ и } a = 37,5 \text{ кА.}$$

Разрядное напряжение гирлянды из четырех элементов П-4,5

$$U_p = 550 \text{ кВ при } t = 2 \text{ мксек,}$$

а для наиболее слабой изоляции на подстанции

$$U_{p1} = 200 \text{ кВ.}$$

Подставим приведенные данные в уравнения (5) ... (8). Тогда для уравнения (5) получим:

$$550 = 37,5 \cdot 30 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2,75}{T_k R} \right) e^{-\frac{2}{T_k}} \right],$$

откуда

$$T_k R = L_m + L_n = 30 + 2,75; \quad T_k = 3,39; \quad R_1 = 9,65 \text{ ом.}$$

Для уравнения (6):

$$200 = 37,5 \cdot 30 \left( 1 - e^{-\frac{2}{T_k}} \right), \text{ откуда } T_k = 10,25;$$

$$R_2 = 3,2 \text{ ом.}$$

Для уравнения (7):

$$550 = 37,5 (2,75 + R_3 \cdot 2), \text{ откуда } R_3 = 6,0 \text{ ом.}$$

Для уравнения (8):

$$200 = 37,5 \cdot R_4 \cdot 2, \text{ откуда } R_4 = 2,67 \text{ ом.}$$

Согласно [Л. 3] действующим заземлением следует считать участки заземления подстанции, удаленные от молниеотвода на расстояние не более 40 м. При этом требуемые нашим расчетом величины сопротивлений заземления вполне обеспечиваются обычным контуром заземления подстанции, состоящим из пелос и труб. Например, расчет заземления из 80-метровой полосы и труб, расположенных в 10 м одна от другой, в соответствии с [Л. 2] дает величину сопротивления заземления порядка 2,5 ом.

Таким образом, во многих случаях оказывается возможным завод тросов линий на подстанции 35 кВ. Благодаря этому становится ненужной установка специальных молниеотводов, число или высота которых могут оказаться довольно значительными, особенно при длинных вводных пролетах. Возможность завода тросов на подстанции устанавливается расчетом, аналогичным приведенному выше.

В некоторых случаях установка молниеотводов возможна на конструкциях подстанций 35 кВ. Допустимость такой установки должна быть доказана расчетом.

Сказанное особенно справедливо для районов Средней Азии, где интенсивность и повторяемость грозозовых разрядов, безусловно, меньше тех, из которых исходили "Правила устройства электротехнических установок".

#### Литература

1. Правила устройства электротехнических установок, вып. II, Госэнергоиздат, 1950.
2. Руководящие указания по защите от перенапряжений. Госэнергоиздат, 1946.
3. М. В. Костенко. Атмосферные перенапряжения и грозозащита высоковольтных установок. Госэнергоиздат, 1949.

## Термины и определения в Правилах изготовления взрывозащищенных машин и электрических аппаратов

Инж. С. М. ЛИВШИЦ

Тяжпромэлектропроект Министерства строительства

Временные правила изготовления взрывозащищенных электрических машин и аппаратов (ВПИ), разработанные в 1939 г. комиссией на ХЭМЗ и утвержденные НКЭП и НКХП, были опубликованы в 1949 г. в виде приложения к Правилам устройства электротехнических установок; с этого времени они стали обязательными для всех ведомств.

Правила эти в значительной мере устарели и требуют пересмотра. При этом серьезного внимания заслуживает терминология указанных Правил. Улучшения требуют важнейшие специальные термины и определения, а также сама структура Правил, что имеет значение не только для рационализации проектирования (выбора оборудования и материалов), но и в эксплуатации.

1. Определения категорий взрывоопасных помещений. От формулировки определений категорий, на которые разделяются взрывоопасные помещения, зависит принятие необходимых мер по обеспечению безопасности людей и государственного имущества и рациональное использование средств в строительстве и эксплуатации. Нечеткость формулировок является, как это показывает практика, одной из причин излишеств в проектировании опасных по взрыву электроустановок.

Важнейшим достижением отечественных Правил устройства (в отличие, например, от правил VDE) является классификация помещений по категориям, которые могут быть разделены на две основные группы: а) помещения, где взрывоопасные смеси могут образовываться в нор-

мальном режиме эксплуатации (категории В-I и В-II) и б) помещения, где взрывоопасные смеси могут образовываться лишь в результате аварий, как, например, разрывов технологических трубопроводов, повреждений производственных машин и т. д. (категории В-Ia и В-IIa). Целесообразность разделения помещений на указанные две группы объясняется существенным отличием требований к электрооборудованию и к материалам для разных групп: в помещениях категорий В-Ia и В-IIa, где взрыв может произойти лишь в результате наложения аварии электрической (например, пробой изоляции) на технологическую аварию (аварийный выход опасных по взрыву газов из замкнутых систем), степень вероятности взрыва неизмеримо меньше и потому требования к электрооборудованию могут быть менее жесткие, чем в помещениях категорий В-I и В-II, где взрыв может произойти в результате наложения электрической аварии (пробой изоляции) на нормальный технологический режим работы (наличие взрывоопасных газов в нормальных эксплуатационных условиях). Согласно § 5 ВПИ электрооборудование для помещений категорий В-I и В-II не изготавливается.

Однако разделение взрывоопасных помещений на категории, являющееся, как сказано, важнейшим достижением наших Правил, в значительной мере обеспечивается неудачной и нечеткой формулировкой § 3, согласно которому условием для отнесения помещений к облегченной категории В-Ia являются: постепенность появления газов при неисправностях, легкая возможность их

заблаговременного (т. е. до достижения взрывоопасной концентрации) обнаружения и, таким образом, заблаговременного предотвращения опасности. Однако требование о заблаговременном обнаружении в подавляющем большинстве случаев невыполнимо, так как опасность обычно возникает в результате аварийного, т. е. непредвиденного появления газов. Поэтому, если строго следовать формулировкам Правил, то практически почти все опасные по газу помещения следовало бы относить к категории В-I, со всеми вытекающими отсюда излишествами в отношении требований к электрооборудованию. На практике же обычно для возможности осуществления установок и их эксплуатации инженеры вынуждены отходить от строго формального понимания указанного требования Правил. Так, например, все многочисленные взрывоопасные помещения крупнейших предприятий по производству искусственного жидкого топлива относятся технологами и электриками к категории В-Ia, а не В-I.

Для того чтобы привести требования Правил в соответствие с реальными условиями эксплуатации, в новых Правилах следует формулировки изменить и говорить не о «заблаговременном предотвращении опасности», как об условии отнесения помещения к облегченной категории В-Ia, а о возможности быстрого обнаружения уже возникшей опасности взрыва и быстрого устранения ее, в частности, путем устройства надежной вентиляции, соответствующей требованиям Правил ЭВП, § 15, п. «б».

**2. Термины «взрывобезопасный» и «взрывонепроницаемый».** Эти термины обозначают одно и то же исполнение, когда оболочка машины или аппарата выдерживает внутреннее давление взрыва и не передает взрыва в окружающую среду<sup>1</sup>. Существование двух терминов ничем не может быть оправдано и зачастую приводит к путанице на практике, поэтому эти термины должны быть унифицированы.

Из двух названных терминов, одинаково хороших в смысловом отношении, мы рекомендуем оставить термин «взрывобезопасный» как значительно более привычный на практике, в первую очередь в горном деле и в отечественном электромашиностроении: он применен во всех каталогах МЭСЭП.

**3. Термин «взрывозащищенное исполнение»** применен в Правилах в качестве общего термина для обозначения всех исполнений оборудования, применяемых во взрывоопасных помещениях, и для отличия их от «нормального» исполнения. Но этот общий термин из-за смысловой близости зачастую даже у квалифицированных специалистов ассоциируется с частным термином «взрывобезопасное (взрывонепроницаемое) исполнение», что ведет к путанице на практике. Термин «взрывозащищенное исполнение» является необоснованно многообещающим: наряду с действительно безопасными в отношении взрыва исполнениями (взрывобезопасное, маслонеполненное), одним из исполнений, объединяемых общим термином «взрывозащищенное», является, например, исполнение «с повышенной надежностью против взрыва». Последнее, как показано ниже, не может обеспечить полной взрывобезопасности, а дает лишь пониженную вероятность аварийного искрения по сравнению с нормальным исполнением.

Удобство иметь один общий термин для различных исполнений, допускаемых в опасных по взрыву помещениях, не преобладает над теми вредными последствиями, которые влекут за собой путаница в терминах и создание у технологов и электриков необоснованной успокоенности. Необходимости иметь объединяющий термин «взрывозащищенное исполнение» мы также не видим: подтверждением этому мнению является практика горного электрооборудования, где с успехом обходятся без общего термина. От термина «взрывозащищенный» следует, безусловно, отказаться.

**4. Термин «исполнение с повышенной надежностью против взрыва»**, впервые введенный в Правилах изготовления в 1939 г. (§ 4 в и раздел IV), является также

неудачным и встречает справедливые возражения со стороны заводов-изготовителей.

Согласно Правилам у машин и аппаратов с повышенной надежностью против взрыва «должна быть исключена возможность искрений, дуги и опасных температур в тех местах, где эти факторы не должны иметь места в нормальной работе». Это требование путаное: если оно относится к нормальному режиму, то оно просто лишено смысла; если же оно относится к аварийным случаям, то оно практически невыполнимо, так как ни у взрывобезопасных (взрывонепроницаемых) машин, ни тем более у машин в исполнении «с повышенной надежностью против взрыва», закрытых или защищенных, возможность аварийного искрения, разумеется, не может быть полностью исключена.

Не обеспечивая полностью отсутствие аварийных искрений, машины «повышенной надежности», с другой стороны, не снабжены устройствами для защиты от последствий искрений, которые имеются у машин во взрывобезопасном или продуваемом исполнении. Повышенная надежность их работы во взрывоопасной среде достигается лишь косвенным путем: недопущением опасных по взрыву температур, исполнением крыльчаток вентилятора из цветного металла; применением, где это возможно, подшипников качения; увеличением междужелезного пространства у машин больших мощностей с подшипниками скольжения; выполнением у некоторых низковольтных машин (типа МАРП) изоляции на микаленте, проходящей компаундировку, применяемую в нормальных машинах лишь при высоком напряжении; более надежной пайкой соединений и т. п. Все эти добавочные мероприятия имеют целью не исключить, а лишь понизить вероятность аварийного искрения. Поэтому двигатели с пониженной вероятностью аварийного искрения допускаются (или могут быть даже рекомендованы, если это дает большой экономический эффект), но лишь в помещениях категории В-Ia, где вероятность появления взрывоопасных смесей мала. Таким образом, допущение применять во взрывоопасных помещениях электроизделия в исполнении «с повышенной надежностью» обусловливается наличием по совокупности: с одной стороны изделий более надежной конструкции, с другой — благоприятных условий их эксплуатации.

Во избежание неправильного понимания и применения этому исполнению не следует приписывать тех качеств, которыми оно не обладает. Его следует именовать «исполнением с повышенной надежностью против аварийного искрения» или, при повторном применении термина, сокращенно: «с повышенной надежностью». В определении термина следует указать, что электроизделия этого исполнения: 1) не должны иметь нормально-искрящих частей (в том числе ротора с искрением при луске), 2) не должны иметь частей, подверженных опасным по взрыву температурам в нормальных и переходных режимах; они должны отвечать некоторым дополнительным требованиям, изложенным в Правилах (следует дать перечень соответствующих параграфов Правил).

**5. Термин «специальное исполнение»** имеет обычно в виду исполнение, когда внутренняя полость машины или аппарата путем искусственной вентиляции исключается из общего объема помещения, опасного по взрыву, где находится машина или аппарат. Наиболее ходовым из этих исполнений является исполнение «с независимой вентиляцией», которое осуществляется продуванием машины наружным (находящимся вне взрывоопасной среды) воздухом или инертным газом. К этому же разделу относится исполнение «с замкнутым циклом вентиляции» при условии поддержания внутри замкнутой системы избыточного давления, что достигается непрерывной подачей внутрь замкнутой системы воздуха или газа, компенсирующих утечку через неплотности. Оба термина — «независимой вентиляцией» и «с замкнутым циклом вентиляции» — следует ввести в Правила взамен лишнего физического содержания термина «специальное исполнение».

**6. Термины «герметическое исполнение» (§ 25, 40, 43 ЭВП), «пылеводонепроницаемое» (§ 40, 56, 58, 62, 63), «непроницаемое для пыли» (§ 25), «уплотненное» (§ 38).** В § 25 говорится, что «соединительные и ответительные части проводки должны быть либо непроницаемы для пыли, либо герметичны». Можно думать, что под термином «герметическое» понимается исполнение, непроницаемое для газов, противопоставляемое непроницаемому для пыли.

<sup>1</sup> Для такого исполнения в зарубежной технической терминологии также установились определенные термины druckfest (прочный на давление) в Правилах VDE — DIN 51710, 1947 и explosionproof (взрывопрочный) в Правилах N. El. Code, 1947.



Однако в другом месте (§ 40) о герметическом исполнении говорится как о синониме пылеводонепроницаемого исполнения, что противоречит § 25.

В Правилах следует применять лишь строгие термины, ссылаясь на ГОСТ, в которых даны определения этих терминов. Термины «герметический», «уплотненный» должны быть заменены терминами «пыленепроницаемый», «водонепроницаемый», «газонепроницаемый», имеющими точный смысл и четкие определения.

**7. Область применения.** В действующих Правилах имеется оговорка, что они не распространяются на помещения производств и складов взрывчатых веществ, но нет указания, что они не распространяются также на крупнейшую и ответственнейшую область взрывоопасных помещений — каменноугольные шахты. На самом же деле для шахт действуют особые Правила технической эксплуатации угольных шахт Минуглепрома. Исправление этой важной неточности, разумеется, необходимо и оно при переиздании Правил не представляет затруднений.

При сопоставлении различных нормативных документов в области электрооборудования взрывоопасных помещений напрашивается вывод о желательности объединения всех Правил устройства взрывоопасных электроустановок в угольной, нефтяной, химической и других отраслях промышленности в единый документ. Общие для всех отраслей требования (а таких большинство) должны иметь единые формулировки, а по тем вопросам, где в различных областях применения требования друг от

друга отличаются, все требования, относящиеся к одному вопросу, должны быть изложены в одном параграфе Правил с указанием, для каких областей применения какие из них действительно.

Также желательно объединить в одном документе Правила изготовления электрооборудования для подземных работ каменноугольных шахт с аналогичными правилами для химической, нефтяной и других отраслей промышленности.

Объединение различных Правил устройства и Правил изготовления, безусловно, будет способствовать взаимному переносу богатого опыта эксплуатации электрооборудования во взрывоопасных установках в шахтах и других отраслях, а также унификации и расширению номенклатуры электрооборудования для них.

В отличие от действующих ВПИ, в которых рассматриваются лишь требования к электрическим машинам и к аппаратам низкого напряжения, будущие объединенные Правила изготовления должны охватывать также аппараты высокого напряжения, измерительные, сигнальные и осветительные приборы, кабельную продукцию, установочные электроизделия, электротехнические трубы и фитинги. В состав Правил следует включить требования к трансформаторным подстанциям и распределительным устройствам, пристраиваемым к взрывоопасным помещениям и встраиваемым в них, а также требования к вентиляционным устройствам во взрывоопасных помещениях.

#### ОТ РЕДАКЦИИ

*Опубликованием выступлений гг. М. Д. Горенштейна, В. А. Карамана, М. Д. Глейзера и С. М. Лившица редакция журнала «Электричество» заканчивает обсуждение второго выпуска «Правил устройства электротехнических установок».*

*Выступления читателей журнала и результаты обсуждения в первичных организациях ВНИТОЭ показали, что «Правила» в ряде разделов нуждаются в уточнениях и дополнениях, которые следует внести в новое издание «Правил», подготовливаемое в настоящее время Техническим управлением МЭСЭП СССР совместно с Государственной инспекцией по промэнергетике и энергонадзору и Главэлектромонтажем Министерства строительства СССР.*

## Заметки и письма

### О РЕГУЛИРУЮЩЕМ ЭФФЕКТЕ НАГРУЗКИ

\* \* \*

В редакцию поступил запрос от читателя журнала о том, можно ли применять так называемый регулирующий эффект нагрузки, т. е. кратковременно (на 10—20 мин) снижать на 2—5 кВ напряжение в энергосистеме, имеющей в часы прохождения вечерних пиков дефицит мощности, если нагрузка энергосистемы в это время примерно на 30% активная (освещение и электролиз), пропорциональ-

ная квадрату напряжения ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). С точки зрения ста-

тической устойчивости предельно возможное снижение напряжения в отдельных контрольных точках энергосистемы составляет 10...20 кВ.

Кратковременное снижение напряжения на 2—3 кВ дает увеличение частоты на 0,1—0,2 гц, которых и не хватает до допускаемого предела (49,5 гц), чтобы избежать брака. Дело в том, что согласно инструкциям работа с частотой ниже 49,5 гц в течение 0,5 час считается браком в работе, а в течение 1 час — аварией по частоте.

Не лучше ли, пишет далее автор запроса, с государственной точки зрения вместо отключения части потребителей для избежания «брака» в работе (при дефиците мощности, но при относительном запасе по напряжению) кратковременно снижать напряжение, не будет ли это меньшим злом, чем отключение потребителей?

Ниже помещаем ответ на поставленный вопрос кандидата техн. наук В. Г. Горнштейна.

Рассматриваемое предложение вносилось некоторыми инженерами и ранее.

Сущность его сводится к тому, чтобы в системе, допускающей из-за дефицита мощности частоту 49,5 гц, применить еще большее снижение частоты с целью избежать взыскания за брак в работе, которым согласно действующим инструкциям считается снижение частоты ниже 49,5 гц в течение более 30 мин. С этой целью авторы подобных предложений считают возможным каждые 30 мин кратковременно повышать частоту за счет понижения напряжения.

Несостоятельность подобного рода предложений настолько очевидна, что они могли бы рассматриваться как курьез, не заслуживающий опубликования в печати, если бы авторы таких предложений не думали, будто снижение частоты или напряжения при дефиците мощности является «меньшим злом», чем ограничение всех потребителей.

Правилами технической эксплуатации длительная работа с частотой ниже 49,8 гц вообще запрещена для всех систем, имеющих регистрирующие частотомеры, т. е. практически для всех энергосистем.

Льготное время, в течение которого понижение частоты не считается браком или аварией, дано диспетчеру для того, чтобы он мог принять необходимые меры по вводу

резерва или регулированию графика при авариях. Использование же этого исключения в иных случаях, например при дефиците мощности, является нарушением ПТЭ и указаний правительства.

Снижение нагрузки, достигаемое в результате снижения частоты и напряжения, является ограничением потребителей. При этом вместо организованных временных ограничений менее важных потребителей будут страдать потребители и наиболее чувствительные к колебаниям напряжения и частоты, а в их числе могут оказаться и наиболее ответственные потребители энергосистемы.

Кроме того, при систематических длительных снижениях частоты и напряжения многие потребители приспособляются к этому, устанавливая у себя более мощные лампы и электродвигатели, бустер-трансформаторы и т. п. В результате агрегаты потребителей работают менее экономично, расходуя не меньшую мощность, чем в нормальных условиях; а при восстановлении нормальной частоты и напряжения они расходуют излишнюю энергию на освещение и на вращение двигателей.

Таким образом, даже с этой точки зрения, не говоря уже о снижении надежности работы оборудования и энергосистемы в целом, подобные приемы оказываются большим злом, а не меньшим злом, чем временное отключение потребителей.

Нельзя упускать из виду, что любое нарушение принципа — не ухудшать качество энергии — порождает у персонала энергосистем и станций стремление к дальнейшим еще большим отклонениям от нормативов. В самом деле, автору рассмотренного предложения кажется уже недостаточным допускаемое в виде исключения в строго установленных случаях снижение частоты до 49,5 гц и он изыскивает способ снижать частоту еще больше, дополнив снижение частоты снижением напряжения.

Очевидно существующая инструкция по учету и анализу аварий должна быть пересмотрена таким образом, чтобы исключить возможность обхода ее положений.

**Кандидат техн. наук  
В. Г. ГОРНШТЕЙН**

## ДВА ТЕРМИНА ПО ЭЛЕКТРОТЯГЕ

На страницах журнала «Электричество» без надобности упоминаются два написания одного и того же понятия, именно: «энергоснабжение» в статьях, посвященных тяге, и «электроснабжение» в статьях по электроэнергетике. Никакое своеобразие питания электроэнергией разнообразных средств электротяги, на мой взгляд, не может оправдать применения термина «энергоснабжение» вместо «электроснабжение».

В настоящее время мы уже имеем ощутительные результаты упорной борьбы за очищение нашей технической терминологии от злоупотреблений иностранными словами. Эти результаты мы видим и на примерах электротехнических терминов. В частности, выражение «мотор» совершенно вытеснено (и справедливо!) термином «двигатель». Однако в электротяговой литературе до сих пор встречаются довольно часто термины: «мотор-компрессор», «мотор-вентилятор», «мотор-генератор», «мотор-вагон». Сколько сильна инерция в этом отношении, показывает недавно вышедший проект терминологии электротяги (Бюллетень комитета технической терминологии. Выпуск LX. Терминология электротяги. Москва, 1952). Здесь авторы, отказавшись в ряде случаев от термина «мотор», оставили его все же в некоторых терминах: «мотор-компрессор», «мотор-вентилятор», «моторный вагон» и др.

Ни о какой специфике здесь речи также идти не может. Кроме того, традиция русской электротяговой литературы как раз подтверждает необходимость окончательного изъятия термина «мотор». В начале нынешнего столетия в русской технической литературе в подавляющем большинстве случаев термин «мотор» не употреблялся. В работах одного из основателей русской школы электрической тяги проф. А. В. Вульфа нет выражения «мотор» для обозначения двигателя. Для обозначения вагона, приводимого в движение электродвигателем, в русской технической литературе вскоре после опытов Пирожского появился удачный термин «вагон-двигатель», который употреблялся многими отечественными учеными, инженерами и техниками.

На мой взгляд, журнал «Электричество»<sup>1</sup> должен в статьях по электротяге привести указанные термины, а также и прочие термины в соответствие с принятыми в журнале электротехническими терминами.

**Инж. В. А. ГОЛОВАНОВ**

<sup>1</sup> Редакция журнала «Электричество» согласна: предложение В. А. Голованова (Ред.).





## НОВОЕ В ТЕХНИКЕ ОСВЕЩЕНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Попытки устроить освещение в очистных забоях шахт, опасных по газу или пыли, при помощи светильников, питаемых от кабелей сети, до сих пор не имели успеха. Это объясняется как недостатками самой сети, так и недостаточным соблюдением требований техники безопасности. Макеевский научно-исследовательский институт проверил возможность освещения очистных забоев шахт посредством индукционных светильников.

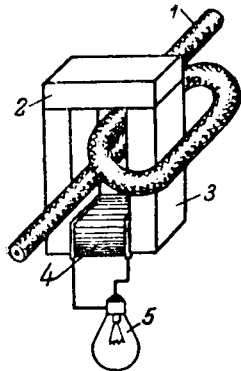


Схема индукционного светильника.

1 — осветительный кабель; 2 — ядро; 3 — сердечник; 4 — обмотка; 5 — лампа накаливания.

Принцип такой системы освещения состоит в том, что вместо многожильного кабеля в лавах прокладывается гибкий одножильный изолированный провод, нагруженный переменным током при частоте 50 гц. Питание от него к лампе накаливания светильника передается индуктивным способом при помощи трансформатора, конструктивно связанного со светильником. Первичной обмоткой служит сама осветительная линия (рисунок).

Разъемная магнитная система позволяет присоединять светильник к сети в любой точке без разделки кабеля и применения тройниковых и штепсельных муфт.

В качестве источника света использовались лампы накаливания мощностью 4,25 вт при напряжении 2,5 в. Вес опытных образцов светильников примерно 1 кг. Испытания дали благоприятные результаты: значительно улучшились условия безопасности работ в лавах и поднялась производительность труда.

В настоящее время светильники этого типа эксплуатируются в очистных забоях трех шахт комбината Сталин-уголь.

(Уголь, стр. 32, № 1, 1953, Л. А. Сальцевич, В. П. Чебанов)

## ЗА РУБЕЖОМ

### НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Несмотря на высокую стоимость, диэлектрический нагрев находит все большее применение, проникая в ряд новых областей. Так оказалось выгодным осуществить диэлектрический нагрев сыпучих материалов и добиться экономичной сушки пряжи, сочетая высокочастотный нагрев с использованием горячего воздуха от системы охлаждения генератора [Л. 1, 2].

**Нагрев сыпучих материалов.** Диэлектрический нагрев сыпучих материалов удобно производить, пропуская их между вертикальными электродами.

Пример устройства, обеспечивающего такой нагрев, приведен на рис. 1. Загрузка материала в рабочий конденсатор и его выгрузка осуществляются с помощью двух конвейеров. Из питающего бункера 1 через отверстие 2 с помощью первого конвейера материал поступает в вертикальную камеру, изготовленную из изоляционного материала типа стекла или микалекса 3 с двумя вертикально установленными электродами 6 и 7. Выгрузка материала производится через отверстие 8. Скорость выгрузки задается размерами этого отверстия и скоростью ленты второго конвейера. Для облегчения высыпания материала камера изготавливается несколько расширяющейся книзу или заземленный электрод снабжается специальным вибратором.

Один из электродов рабочего конденсатора (например заземленный) выполняется регулируемым и с его помощью можно согласовать нагрузку с генератором. В данном слу-

чае (как и вообще при конвейерном нагреве) нагрузка генератора в процессе его работы остается практически постоянной.

Для удобства регулирования загрузки камеры материалом высокопотенциальный электрод выполняется не всю ее высоту, а лишь на часть, оставляя сверху некоторое нерабочее пространство 5, в пределах которого может изменяться верхний уровень загружаемого материала без влияния на режим нагрева.

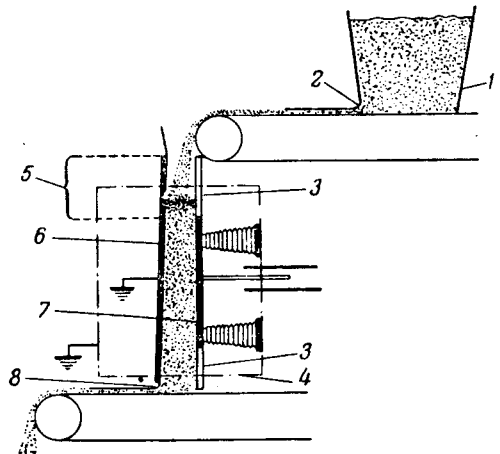


Рис. 1. Диэлектрический нагрев сыпучих или порошкообразных материалов.

1 — бункер; 2 — питающее отверстие; 3 — изоляция; 4 — экран; 5 — резервуар; 6 — заземленный электрод; 7 — высокопотенциальный электрод; 8 — выходное отверстие.

Отсутствие воздушного зазора в этой системе позволяет получить в нагреваемом материале значительно большие удельные мощности, чем в случае обычного конвейерного нагрева при наличии воздушного зазора между материалом и верхним электродом.

Принципиальная схема генератора с регулируемой анодной и обратной связью показана на рис. 2. Описанная

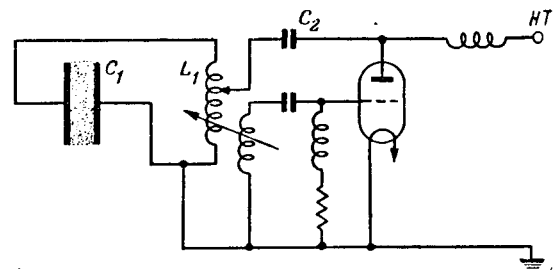


Рис. 2. Принципиальная схема высокочастотного генератора.

система высокочастотного нагрева оказывается очень удобной, когда нагрев материала необходимо производить при его транспортировке с верхнего этажа в нижний.

Примерами материалов, которые могут быть нагреты таким образом, являются: пробка, крахмал, зерно, мука, различные химикаты и т. п. Одним из примеров подобного устройства может служить впервые разработанная в СССР установка для дезинсекции зерна [Л. 3].

**Сушка с использованием воздуха, охлаждающего генераторные лампы.** Вопрос повышения производительности высокочастотных сушильных установок за счет использования мощности, рассеиваемой в генераторе, не раз поднимался в печати [Л. 4, 5]. Ниже дается описание установки для сушки пряжи с использованием горячего воз-

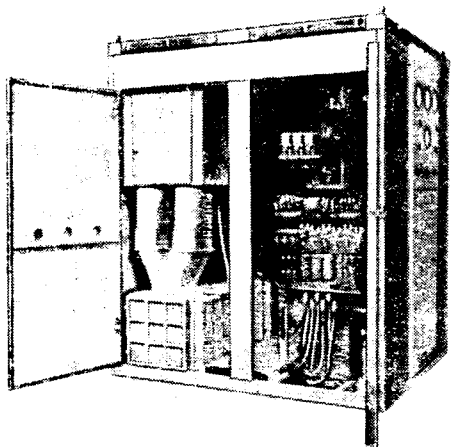


Рис. 3. Общий вид генератора мощностью 30 кВт с воздушным охлаждением, воздух которого используется для сушки материалов.

духа, охлаждающего аноды генераторных ламп и колебательный контур генератора [Л. 1, 2].

Общий вид такого генератора мощностью 30 кВт показан на рис. 3. Холодный воздух поступает через отверстие в нижней части генераторного шкафа и, проходя через камеру генераторных ламп и колебательного контура, нагревается в соответствии с отбираемым им теплом. Это количество тепла в обычных промышленных генераторах составляет величину порядка 30...40% от общей мощности, питающей генератор.

Конечно температура отходящего из генератора воздуха ниже, чем температура материала, сушимого токами

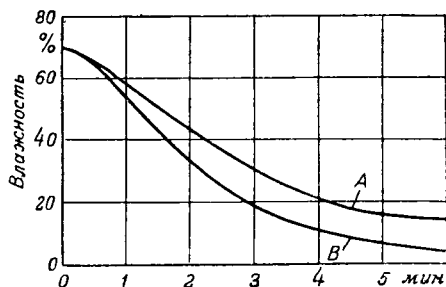


Рис. 4. Снижение скорости сушки материала при его обдуве воздухом от в.ч. генератора.

A — при обдуве воздухом от генератора; B — чисто диэлектрический нагрев.

высокой частоты (100°С). Тем не менее рациональное использование этого сухого нагретого воздуха может дать существенное ускорение сушки и снижение расхода высокочастотной энергии.

Первые опыты применения обдува этим воздухом материала, сушимого токами высокой частоты, привели к обратному эффекту.

На рис. 4 показаны две кривые сушки пряжи, одна из которых B соответствует обычной высокочастотной сушке, а вторая A — сушке при обдуве воздухом системы охлаждения генератора. Как видно из графика, обдув материала отходящим от генератора воздухом не ускоряет сушку, а, наоборот, замедляет ее. Объясняется это тем, что воздух, обдувающий поверхность материала, не в состоянии поглотить всю выделившуюся воду при высокочастотной сушке. При охлаждении поверхности материала обдувающим ее воздухом часть насыщенных паров конденсируется, и эта влага за счет капиллярных явлений ингрирует обратно в глубь сушимого материала, замедляя процесс сушки.

Значительно лучший эффект получается при применении секционной сушки. Такую секционную сушку схематически можно представить в виде трех этапов сушки, соответствующих трем секциям конвейерной установки.

Схема конвейерной секционной сушки с использованием горячего воздуха от высокочастотного генератора представлена на рис. 5. Там же показан график сушки материала в процессе его прохождения через три различные секции сушильной установки.

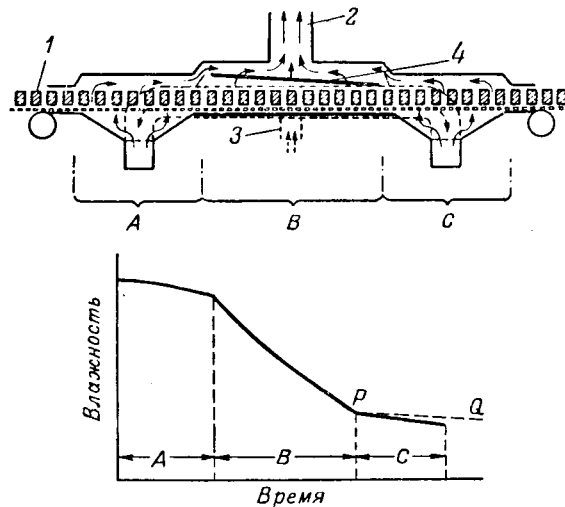


Рис. 5. Сушка материала при его обдуве воздухом от в.ч. генератора.

A — первый период сушки горячим воздухом от в.ч. генератора; B — период высокочастотной сушки; C — заключительный период воздушной сушки нагретого материала; P — Q сушка при естественном охлаждении материала без обдува нагретым воздухом. 1 — сушимый материал; 2 — вытяжное отверстие; 3 — сухой теплый воздух от генератора; 4 — электрод.

**Начальная секция воздушной сушки.** В этой секции материал обдувается воздухом, нагретым от генератора. В то время когда пряжа проходит через эту секцию, из нее испаряется часть влаги. Скорость испарения контролируется по показаниям мокрого и сухого термометров и по скорости потока воздуха. Теплота испарения влаги возмещается теплом воздуха, который охлаждается, проходя через камеру. Процесс сушки в этой секции в основном не отличается от сушки в обычных воздушных сушильках за исключением того, что влажный воздух, выходящий из этой секции, используется для удаления водяных паров, получаемых в следующей секции.

**Высокочастотная сушильная секция.** Сушка в этой секции зависит от тепла, выделяющегося в материале за счет высокочастотного нагрева. Электроды состоят из регулируемой верхней пластины и заземленной нижней пластины, над которой проходит конвейерная лента.

Регулируемый воздушный зазор между верхней пластиной и материалом используется для согласования генератора с нагрузкой. Верхний электрод располагается с некоторым наклоном так, чтобы по мере прохождения материала через конденсатор он поступал в область с большей напряженностью поля. Последнее необходимо для того, чтобы возместить уменьшение угла потерь по мере высыхания материала. Удаление водяного пара из этой секции зависит от естественного движения воздуха, вызываемого воздушным потоком, выходящим из секции A и проходящим через верхнюю часть высокочастотной нагревательной камеры.

Этот поток воздуха направляется так, чтобы он не соприкасался с сушимым материалом и не давал влаги конденсироваться на поверхности материала. Воздух и воздушные пары выходят наружу через регулируемое с помощью шиберы вытяжное отверстие, находящееся над камерой высокочастотного нагрева.

Некоторая часть нагретого воздуха, поступающего от высокочастотного генератора, подается в высокочастотную камеру, как показано на рис. 5. Это создает более благоприятный для процесса сушки теплообмен между горячими парами воды в нагревательном конденсаторе и воздухом

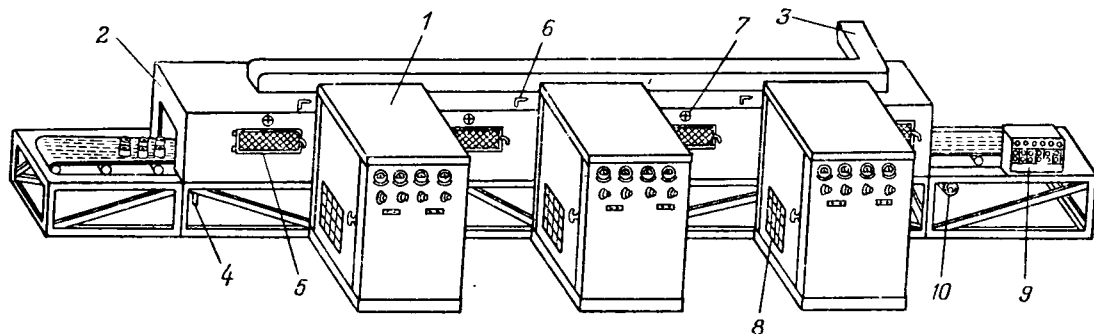


Рис. 6. Конвейерная установка для комбинированной сушки текстильных материалов и шерсти.

1 — генератор; 2 — камера; 3 — вытяжной вентилятор; 4 — выход конденсата; 5 — смотровое окно; 6 — управление потоком воздуха; 7 — управление верхним электродом; 8 — вход свежего воздуха; 9 — управление; 10 — двигатель конвейера.

в вытяжной шахте. Некоторое количество сухого воздуха направляется через верхний электрод для того, чтобы исключить конденсацию влаги на его поверхности и ее капель на сушимый материал. Влага, конденсирующаяся на стенках камеры, удаляется по специальным каналам. Это приводит к уменьшению количества пара, удаляемого через вытяжное отверстие.

**Конечная воздушная сушильная секция.** В конечной секции конвейера поток горячего воздуха направляется через материал сразу же после того, как материал выходит из рабочего конденсатора.

При обдуве поверхности нагретого материала воздухом с несколько меньшей температурой сушка происходит значительно интенсивнее, чем при естественных условиях. Быстрое снижение температуры поверхности сушеного материала приводит к уменьшению тепловых потерь и к ускорению миграции влаги из внутренних слоев к поверхности.

Таким образом, используя обдув горячим воздухом, поступающим от системы охлаждения генераторных ламп, можно сократить расход электроэнергии на высокочастотную сушку.

Общий вид производственной конвейерной установки для такой комбинированной секционной сушки пряжи представлен на рис. 6.

### Литература

1. L. Atkins, Metro Vickirs Gaz, № 401, p. 273, 1952.
2. Electronics Engineering, April, p. 200, 1952.
3. Применение ультракоротких волн для дезинсекции и термического воздействия на пшеницу. Госторгиздат, 1937.
4. А. Н. Мазнин и др. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, 1950.
5. А. В. Донской и А. А. Фрумкин. Об утилизации тепловой энергии, теряемой в высокочастотных электротермических установках. Промышленная энергетика, стр. 8, № 12, 1950.

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ

### РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ 380 кВ В ШВЕЦИИ

Недостаток природных запасов энергетического топлива в Швеции вызвал усиленное строительство гидроэлектростанций. То обстоятельство, что источники водной энергии находятся на севере, вблизи Полярного круга, а центры потребления энергии расположены на юге страны, потребовало передачи электроэнергии на очень большие расстояния.

Первая очередь строительства состоит из гидроэлектростанции Харспренгет и линии 380 кВ Харспренгет—Хальсберг [Л. 1]. При дальнейшем развитии системы предполагается установить на станции Харспренгет четвертый гидрогенератор мощностью 105 мвт и построить линию 380 кВ от Хальсберга до Хельсингборга общей длиной 450 км с промежуточной подстанцией вблизи Готенбурга. Ввод новой линии в эксплуатацию намечен на осень 1954 г. В течение первого года участок линии Готенбург—Хельсингборг будет работать при напряжении 130 кВ. В дальнейшем предполагается сооружение еще одной линии 380 кВ длиной около 700 км.

Для снабжения электроэнергией острова Готланд полярных гЭС разрабатывается проект передачи на полярном токе. Проект предусматривает прокладку одножильного подводного кабеля 100 кВ длиной 90 км и установок преобразовательных подстанций на концах передачи.

В качестве обратного провода предполагается использовать морскую воду. Проведенные опыты показали, что этот способ передачи не причиняет вреда рыбе. По окончании строительства этой электропередачи потребуются 2—3 года для ее налаживания [Л. 2] перед пуском в регулярную эксплуатацию.

На основе опыта проектирования первой очереди электропередачи 380 кВ в дальнейшем вносятся некоторые изменения в принятые проектные решения (снижение уровня изоляции, применение продольной компенсации и др.).

На основе подсчетов возможных динамических перенапряжений для первоначально сооруженных подстанций 380 кВ был принят уровень изоляции 1775 кВ. При этом предполагалось, что в дальнейшем, когда мощность короткого замыкания в системе возрастет, а сеть будет разделена на более короткие участки, величина уровня изоляции может быть снижена. Расчетные значения динамических перенапряжений были определены для различных длин линий и значений мощности короткого замыкания в питающей подстанции. На рис. 1 показаны кривые перенапряжений в зависимости от длины линии и предполагаемой мощности короткого замыкания для линии 380 кВ, работающей перед отключением с нагрузкой 400 мвт.

Корона на линии не оказывает влияния на величину перенапряжений, если амплитуда этих перенапряжений не превышает 800 кВ. Влияние насыщения стали в трансформаторах также оказывается незначительным, если повышение напряжения на питающем конце линии не превышает 30%.

Если отключение происходит на стороне низкого напряжения трансформатора, приключенного на удаленном конце линии, уровень перенапряжений на линии значительно снижается вследствие насыщения стали в трансформаторе при холостом ходе.

На рис. 2 приведены кривые повышения напряжения на неповрежденной фазе удаленного конца линии при отключении однофазного короткого замыкания на землю.

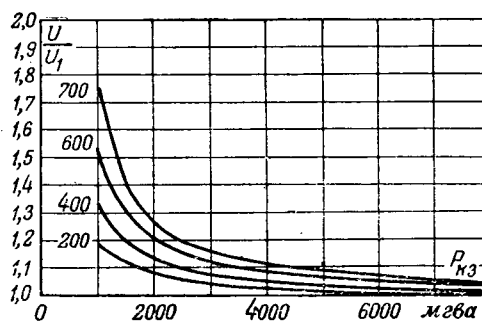


Рис. 1. Перенапряжения на питающей подстанции при выключении линии 380 кВ с нагрузкой 400 мвт в зависимости от мощности короткого замыкания и длины линии.

$\frac{U}{U_1}$  — перенапряжения в относительных единицах;  
 $P_{кз}$  — мощность короткого замыкания, мвт. Цифры около кривых показывают длину линии, км.

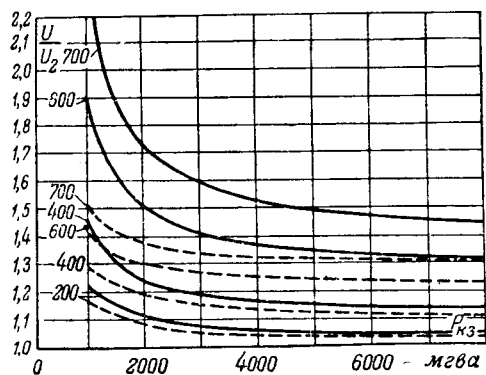


Рис. 2. Перенапряжения на удаленном конце при выключении линии 380 кв с нагрузкой 400 мвт в зависимости от мощности короткого замыкания и длины линии.

$\frac{U}{U_2}$  — перенапряжения в относительных единицах;  
 $P_{кз}$  — мощность короткого замыкания, мгва. Цифры около кривых дают длину линии, км.  
 Сплошные линии — отключение на стороне 380 кв, пунктирные — отключение на низкой стороне трансформатора.

Для выбора уровня изоляции в соответствии с характеристиками вентильных разрядников было определено наибольшее напряжение на разряднике частоты на разряднике в момент его работы при наиболее неблагоприятном соотношении длины линии и мощности короткого замыкания. В данном случае этим условиям соответствуют длина линии — 700 км и мощность короткого замыкания — 1700 мгва.

Характеристики вентильных разрядников, предназначенных для вновь проектируемых установок 380 кв, несколько отличаются от первоначальных. Наибольшее длительно допустимое напряжение на разряднике выбирается в зависимости от длины присоединенной к подстанции линии и составляет для линии 700 км 390 кв, а для линии 500 км 360 кв. Пробивное напряжение при промышленной частоте составляет 900 кв эффективного значения, а импульсное пробивное напряжение равно примерно 1250 кв, макс при волне 1000 кв/мксек.

Расчеты показали, что для трансформаторов и коммутационной аппаратуры экономически оправдывается выбор уровня изоляции 1500 кв. Это принято для подстанций, вводимых в эксплуатацию в конце 1954 г. и позже. Для выключателей, трансформаторов тока и напряжения было решено оставить уровень изоляции 1775 кв. При этом в соответствии со шведскими стандартами для внутренней изоляции вышеуказанных аппаратов выбирается одноступенчатое испытательное напряжение 781 кв при 50 гц. Защитное действие подстанционных разрядников при этом уровне изоляции обеспечивается на довольно большом расстоянии от места их установки. Меньшая надежность грозозащиты может быть допущена для обходной системы шин и разъединителей, так как их повреждение при перекрытии мало вероятно. По этим соображениям для внешней изоляции обходных устройств принят уровень 1500 кв, при котором сухоразрядное напряжение составляет 825 кв, а мокроразрядное 660 кв.

В целях дальнейшего увеличения пропускной способности линии до 800 мвт предполагается применение продольной компенсации. Это могло бы привести к возрастанию динамических перенапряжений, однако происходящее одновременно увеличение мощности короткого замыкания ограничивает рост перенапряжений. В результате величина принятого уровня изоляции не должна измениться.

Применение расщепления фаз на три провода позволяет увеличить пропускную способность линии по сравнению с расщеплением на два провода (при одной и той же степени продольной компенсации). На рис. 3 приведены кривые зависимости пропускной способности линии 380 кв от степени компенсации для различных проводов.

Наибольшие мощности, которые будут передаваться по линии в первые годы эксплуатации, позволяют ограничиться на первое время подвеской на линии двух сталеалюминевых проводов сечением 592 мм<sup>2</sup> на фазу с тем,

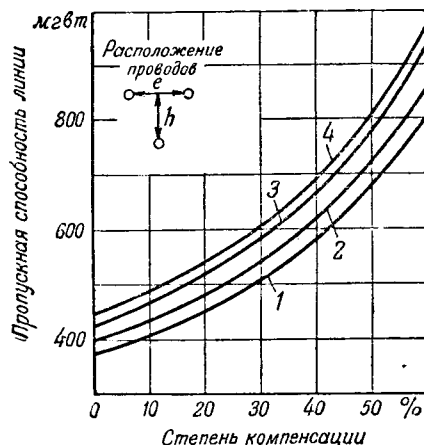


Рис. 3. Пропускная способность линий 380 кв в зависимости от степени продольной компенсации реактивного сопротивления линии.

1 — расщепленные на две части провода сечением 450 мм<sup>2</sup>. Расстояние между проводами  $l = 45$  см; 2 — расщепленные на две части провода сечением 592 мм<sup>2</sup>. Расстояние между проводами  $l = 70$  см; 3 — расщепленные на три части провода сечением 450 мм<sup>2</sup>. Расстояние между проводами  $l = 45$  см,  $h = 40$  см; 4 — расщепленные на три части провода сечением 450 мм<sup>2</sup>. Расстояние между проводами  $l = 45$  см,  $h = 70$  см.

что в дальнейшем будет добавлен третий провод. Никаких изменений конструкции опор при этом не предусматривается.

Необходимость решения вопроса относительно системы заземления нейтрали и конструкции трансформаторов 380 кв потребовала пересмотра прежних решений в отношении системы заземления нейтрали в сетях 110 и 220 кв.

Большие значения коэффициентов взаимной индукции между линией электропередачи с заземленной нейтралью и линией связи, обусловленные низкой проводимостью почвы, вызывали опасность появления значительных наведенных э. д. с. на линиях связи при коротких замыканиях на землю. Поэтому в сетях Швеции нулевые точки трансформаторов высокого напряжения обычно заземлялись через дугогасящие катушки. Ликвидация однофазных замыканий на землю без отключения линии при малой их протяженности не вызывала серьезных затруднений. Однако с течением времени общая длина сети 220 кв увеличилась настолько, что гашение дуги при однофазных замыканиях на землю с помощью дугогасящих катушек стало невозможным. Поэтому в 1950 г. сеть 220 кв была переведена на глухое заземление нейтрали.

Для сети 380 кв также была принята система глухого заземления нейтралей трансформаторов. Глухое заземление нейтралей в сетях 220 и 380 кв позволило применить на пониженных подстанциях автотрансформаторы 380/220 кв, изготовление которых обходится дешевле, чем двухобмоточных трансформаторов.

Накопленный с тех пор опыт показал, что для защиты линий связи серьезных затрат не требуется.

По условиям транспортировки предельная мощность одной фазы составляет 110 мвт для двухобмоточного трансформатора и 155 мвт для автотрансформатора.

Сравнение результатов показало, что стоимость единицы установленной мощности автотрансформатора на 25% ниже. Поэтому было принято решение о применении автотрансформаторов и для подстанций 380/130 кв.

Применение автотрансформаторов и глухого заземления нейтрали в сети 130 кв приводит к необходимости считаться с короткими замыканиями на землю. Это связано с некоторыми дополнительными расходами, вызываемыми усложнением релейной защиты и увеличением механических усилий в коммутационной аппаратуре.

Электрическая связь сетей 130 и 380 кв, осуществляемая через автотрансформаторы, при коротких замыканиях в сети 130 кв приводит к появлению токов нулевой последовательности в сети 380 кв. Однако полагают, что вероятность однофазных коротких замыканий на землю не-

лика, так как линии 130 кВ построены на деревянных опорах и имеют тросы только на подходах к подстанциям.

Глухое заземление нейтрали в сети 130 кВ вызывает появление на линиях связи опасных э. д. с., превышающих допустимую по нормам величину, что требует для их снижения ограничить количество заземленных нулевых точек.

Снижение токов нулевой последовательности с помощью заземления нулевых точек через реактивные сопротивления было признано нецелесообразным из-за необходимости повышения уровней изоляции оборудования 380 и 130 кВ и увеличения капиталовложений.

В связи с этим было решено ограничиться применением специальной защиты линий связи путем установки разрядников на воздушных линиях связи и экранировки кабелей связи медным проводником. Стоимость этих мероприятий покрывается экономией, получаемой благодаря замене трансформаторов автотрансформаторами.

**Выводы:** 1. Для новых подстанций 380 кВ уровень изоляции оборудования (за исключением выключателей, трансформаторов тока и напряжения) будет снижен с 1775 до 1500 кВ.

2. Благодаря применению продольной компенсации пропускная способность линий 380 кВ будет увеличена с 400 до 800 мвт.

3. Увеличение пропускной способности линии делает целесообразным расщепление фаз на три провода.

4. Для понижения напряжения с 380 до 130 кВ оправдывает себя применение автотрансформаторов мощностью  $3 \times 155$  мва.

5. Применение автотрансформаторов вызывает необходимость глухого заземления нейтрали в сети 130 кВ и требует применения защиты линий связи от опасного влияния [Л. 3].

### Литература

1. С. С. Рокотян. Проект шведской системы электропередачи 380 кВ (обзор). Электричество, № 1, 1951.

2. Шведская линия электропередачи 380 кВ. Power Engineering, № 4, 1951.

3. A. Rusck, B. Rathsmann, G. Jancke. Шведская система 380 кВ. Доклад № 404 на Парижской конференции по сетям высокого напряжения, 1952.

**Инж. А. И. ГЕРШЕНГОРН**

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ СЕВЕРНОЙ ФРАНЦИИ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ 50 Гц

Французские железные дороги электрифицируют рудно-углевозную линию Валансьенн—Тионвилль, идущую вдоль бельгийской границы. Длина линии между конечными пунктами 281 км. С ответвлениями полная длина электрифицируемого участка составит 363 км. Имеются многочисленные подъемы с уклоном 10‰.

Годовая работа линии по проектным расчетам составляет 7,25 млрд. ткм брутто (20 млн. ткм/км год). Годовой расход энергии на тягу по проекту должен составить около 160 млн. кВтч (440 000 кВтч/км год).

Линия электрифицируется на однофазном токе 50 Гц, 25 кВ в контактном проводе.

**Подвижной состав.** Выбор типов локомотивов был сделан, исходя из следующих предпосылок.

По условиям перевозок в парке для электрифицируемого участка требуются электровозы более тяжелые, для которых выбрана осевая формула СС, и более легкие с осевой формулой ВВ.

Для тяжелых электровозов не встречается затруднения в установке вращающегося агрегата, преобразующего однофазный ток либо в постоянный, либо в трехфазный. Такое решение обладает следующими преимуществами: 1) хороший коэффициент мощности, 2) легкость электрического торможения, 3) плавный разгон и уменьшение опасности буксования, 4) использование освоенной аппаратуры.

Для пассажирских поездов остановились на электровозах с «непосредственными» однофазными двигателями, удовлетворительно работающими при относительно больших ускорениях таких поездов.

Наконец, заказано несколько электровозов с инверторами, главным образом для изучения влияния гармонических выпрямленного тока на сети первичного энергоснабжения.

Всего в парке должно быть 105 электровозов. Рациональное их распределение по типам и характеристикам приведено в таблице. Машины заказаны в августе 1952 г. и должны поставаться, начиная с августа 1954 г.

### Французские электровозы для участка Валансьенн—Тионвилль

Осевая формула	ВВ	СС
Вес полный в рабочем состоянии, т . . . .	80	120
Максимальная скорость, км/час . . . .	105	60
Диаметр колес, м . . . .	1,25	1,10
Жесткая база тележек, м . . . . .	3,20	4,67
Расстояние между осями тележек, м . . . .	8,20	9,47
Полная длина, м . . . .	16	18,89
Рекуперативное торможение . . . . .	Нет	Имеется

Заказано, единиц . . . .	15	5	65	20
Длительная мощность на валу двигателей, л. с. . . . .	2 724	3 120	2 490	3 590
Скорость при длительном режиме, км/час . . . . .	53	47	27,9	39,2
Сила тяги на ободу, т . . . . .	13,5	17,6	23,2	24
Сила тяги при трогании, т . . . . .	24,5	24,5	42	40
К. п. д. (включая собственные нужды) . . . .	0,75	0,86	0,74...0,75	0,74...0,75
Коэффициент мощности локомотива, отстоящий . . . .	0,76	0,91	0,92	0,92
опережающий . . . .			0,98	0,98
Напряжение на контактах двигателя, в . . . .	250	675	600	930
Ток двигателя, а . . . .	3 200	950	550	333*

\* — ток на фазу.

Примечание. Указанные данные гарантируются при напряжении в контактной сети 22 500 в или более и при нормальной вентиляции.

15 единиц электровозов типа ВВ заказаны по системе с непосредственными двигателями, а 5 — по системе с инверторными выпрямителями. Электровозов типа СС заказано 65 единиц по системе однофазно-постоянной и 20 единиц по однофазно-трехфазной.

Механические части обоих типов электровозов СС почти одинаковы между собой. То же имеет место и для электровозов ВВ.

**Трансформаторы.** В электровозах СС трансформатор имеет 4 обмотки: первичную 2 200 кВА на электровозе однофазно-постоянного тока и 2 300 кВА на электровозе однофазно-трехфазного тока; вторичную, «тяговую» соответственно — 2 130 кВА и 2 150 кВА, вторичную вспомогательную — 76 кВА для однофазно-постоянного и 150 кВА для однофазно-трехфазного электровоза, присоединенную непосредственно к однофазно-трехфазному преобразователю собственных нужд; вторичную для отопления на 400 а при 1 500 и 1 000 в.

В электровозах ВВ трансформатор имеет регулирование напряжения на стороне высшего напряжения и состоит из помещенных в общем кожухе двух трансформаторов с соединенными магнитопроводами, а именно: 1) одного регулирующего трансформатора с переменным коэффициентом трансформации с максимальным напряжением вторичной обмотки 16 300 в (15 000 в в электровозах с инверторами), имеющего вторую вторичную обмотку, дающую 400 а при 1 500 и 1 000 в для отопления и питающую при 1 500 в первичную обмотку трансформатора

ра собственных нужд 150 кВа; 2) одного трансформатора для тяговых двигателей 14 630/300 в (15 000/2×900 в для электровазов с инверторами) с постоянным коэффициентом трансформации. Мощность вторичной обмотки 3150 кВа (4 580 кВа при инверторах).

Все трансформаторы масляные с искусственным охлаждением.

**Силовое оборудование.** Компонировка основного оборудования электровазов однофазно-постоянного тока показана на рис. 1, принципиальная силовая схема — на рис. 2.

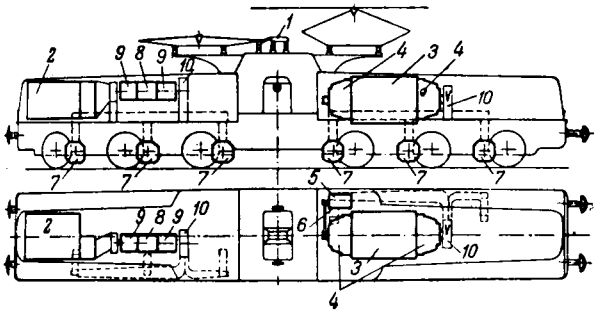


Рис. 1. Электроваз СС с преобразователем однофазно-постоянного тока.

1 — выключатель высокого напряжения; 2 — трансформатор; 3 — синхронный двигатель; 4 — главные генераторы; 5 — возбудитель генераторов; 6 — возбудитель тяговых двигателей; 7 — тяговые двигатели; 8 — преобразователь однофазно-трехфазного тока; 9 — вспомогательные генераторы; 10 — вентиляторы.

Преобразовательный агрегат электроваза включает:

1. Однофазный синхронный четырехполюсный двигатель 3 самоохлаждающийся, в длительном режиме имеющий скорость 1500 об/мин. Двигатель питается при напряжении 2700 в от вторичной «тяговой» обмотки трансформатора. Ток двигателя 875 а, коэффициент мощности при опережающем токе 0,97. Этот двигатель должен развивать полную мощность 2900 л. с. без риска выпасть из синхронизма при напряжении в линии, изменяющемся от 19 до 27,5 кВ.

2. Два главных генератора постоянного тока 4, посаженные на вал двигателя 3, являющиеся самовентилирующимися машинами с компенсацией, питающими каждая при напряжении, регулируемом возбуждением, от 0 до 700 в 3 тяговых двигателя 7, присоединенных параллельно (ток 1305 а при 700 в).

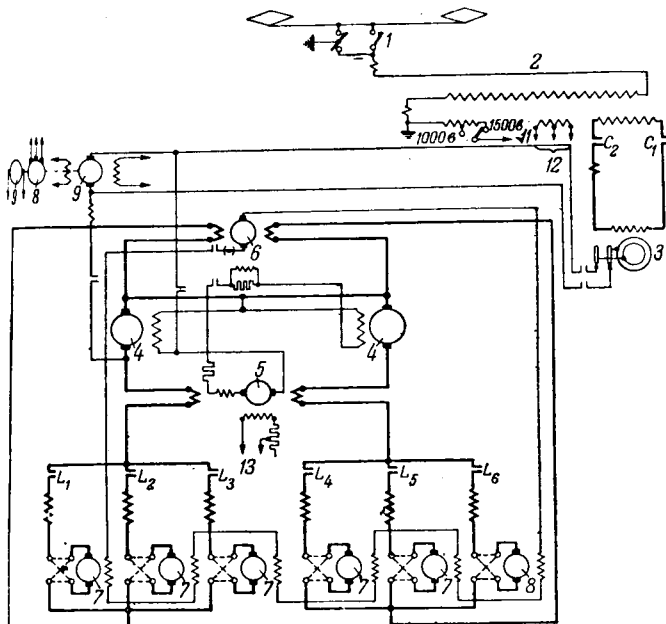


Рис. 2. Принципиальная схема однофазно-постоянного тока. 1-9 — обозначения те же, что на рис. 1; 11 — отопление; 12 — собственные нужды; 13 — к вспомогательному генератору.

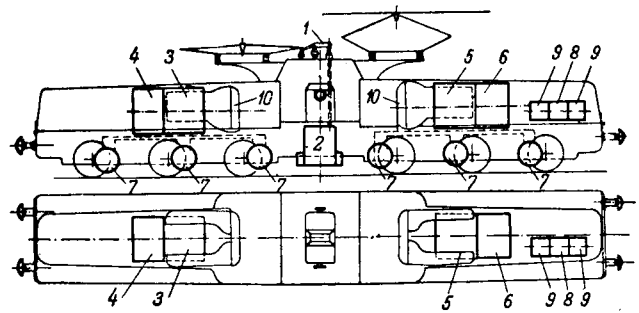


Рис. 3. Электроваз СС с преобразователем однофазно-трехфазного тока.

1 — выключатель высокого напряжения; 2 — трансформатор; 3 — синхронный двигатель; 4 — генератор постоянного тока; 5 — асинхронная машина; 6 — двигатель постоянного тока; 7 — тяговые двигатели; 8 — преобразователь однофазно-трехфазного тока; 9 — вспомогательные генераторы; 10 — вентиляторы.

Главный возбудитель 5 для генераторов, служащий для запуска и регулирования скорости, включает асинхронный двигатель, питаемый от специального вывода вторичной обмотки трансформатора на 380 в, и сидящий с ним на одном валу генератор постоянного тока с тремя обмотками, работающий при напряжении 250 в.

Возбудитель 6 с двумя обмотками, смонтированный на одной станине с главным возбудителем, и предназначен для возбуждения тяговых двигателей.

Шесть тяговых двигателей 7 с одной последовательной и одной независимой обмоткой возбуждения, вентилируемые принудительно (расход воздуха 50 м³/мин), в длительном режиме при скорости 1110 об/мин потребляют 550 а при 600 в (мощность 305 кВт). Сила тяги на ободу 3860 кг.

Компоновка оборудования электроваза однофазно-трехфазного тока показана на рис. 3, принципиальная силовая схема — на рис. 4.

Тяговые двигатели питаются трехфазным током переменной частоты. На электровазе установлены: фазообразователь, состоящий из: 1) шестиполюсного синхронного двигателя 3, делающего 1000 об/мин; двигатель питается от вторичной тяговой обмотки трансформатора при напряжении 1070 в, статорная обмотка — трехфазная, дающая 535/535/925 в, 3000/2000/1100 а при 50 гц; 2) генератора постоянного тока 4, сидящего на одном валу с восьмиполюсным двигателем, с тремя обмотками на 1000 в при 1700 а.

Преобразователь частоты состоит из:

1) двигателя постоянного тока 6, компенсированного, восьмиполюсного, потребляющего 1700 а при 800 в и скорости вращения 620 об/мин, питаемого от генератора преобразователя фаз при переменном напряжении, чем обеспечивается вращение с переменной скоростью ротора преобразователя частоты (от —750 до +1280 об/мин);

2) асинхронной трехфазной восьмиполюсной машины, ротор которой, сидящий на одном валу с двигателем 6, питается трехфазным током 50 гц от преобразователя фаз, а статор дает трехфазный ток с частотой, изменяющейся от 0 до 135 гц (при 91,3 гц статор дает 2000 а при 930 в).

Тяговые двигатели 7 — асинхронные десятиполюсные, с короткозамкнутым ротором. Охлаждение принудительное с расходом воздуха 40 м³/мин. При длительном режиме мощность двигателя равна 440 кВт (930 в, 333 а, 1055 об/мин, частота питающего тока 91,3 гц). Сила тяги на ободу 4000 кг.

Электроваз с непосредственными двигателями имеет 4 тяговых двигателя последовательного возбуждения без компенсационной обмотки. Обмотки дополнительных полюсов шунтируются омическим сопротивлением с параллельно присоединенной емкостью, что обеспечивает улучшение коммутации в широком диапазоне скоростей. В обмотки якоря включены соединения с сопротивлением.

Длительная мощность двигателя 500 кВт при 235 в, 200 а и 681 об/мин. Сила тяги на ободу 3390 кг. Принудительная вентиляция с расходом воздуха 180 м³/мин на двигатель.

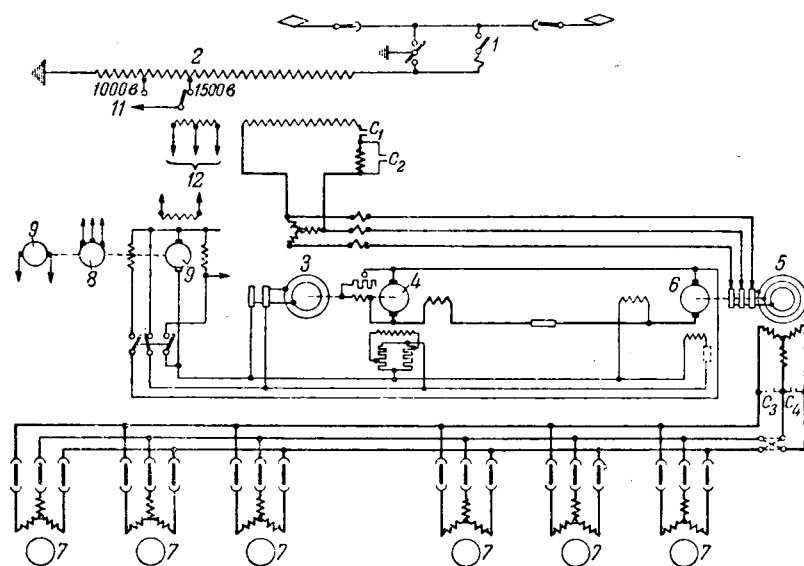


Рис. 4. Принципиальная схема электровоза с преобразователем однофазно-трехфазного тока.

1—9 — обозначения те же, что на рис. 3; 11 — отопление; 12 — собственные нужды.

На электровозе с игнитронами устанавливается 8 запаянных и охлаждаемых водой игнитронов.

Игнитроны дают выпрямленный ток 475 а при 750 в и питают 4 тяговых двигателя. Двигатели шестиполусные, некомпенсированные. Мощность двигателя при длительном режиме 575 квт, напряжение 675 в, ток 950 а, скорость вращения 880 об/мин. Сила тяги на ободе 4 400 кг.

Принудительная вентиляция с расходом 95 м<sup>3</sup>/мин на двигатель.

**Аппаратура управления.** Регулировка силы тяги и скорости осуществляется на электровозах однофазно-постоянного и однофазно-трехфазного тока с помощью пускового реостата с ручным приводом, воздействующего на возбуждение главных генераторов; на остальных электровозах — ручным двадцатиступенчатым регулятором на стороне высшего напряжения трансформатора.

Электровозы также имеют: однополюсный выключатель со сжатым воздухом, управляемый электропневматическим контактором, с разрывной мощностью 200 ква при 50 000 в; два однополюсных разъединителя к пантографам, замыкающих на землю отключенный пантограф; двухполюсный замыкатель для заземления крышевого оборудования; два реверсора, действующие на каждый из тяговых двигателей.

На электровозах однофазно-постоянного тока, кроме того, устанавливаются: шесть контакторов в цепях тяговых двигателей, предназначенных для быстрого отключения их в случае поломки пантографа; четыре контактора в цепях возбуждения синхронного двигателя главных генераторов независимого возбуждения тяговых двигателей и в цепи включения главного преобразовательного агрегата.

На электровозах однофазно-трехфазного тока устанавливаются два контактора для замыкания накоротко статорной обмотки преобразователя частоты в момент запуска агрегата и один тройной контактор в цепях запуска и возбуждения преобразовательных агрегатов.

На обоих типах локомотивов СС имеются два контактора для подсоединения статора синхронного двигателя ко вторичной обмотке трансформатора.

**Собственные нужды.** Компрессор, масляный насос и в некоторых случаях вентиляторы на всех электровозах имеют привод от трехфазных асинхронных двигателей 380 в, питаемых от однофазно-трехфазного преобразователя. Компрессор двухступенчатый на 2 400 об/мин и 8 ат с приводом от двигателя 26 л. с.

На электровозах устанавливаются аккумуляторные кадмиево-никелевые батареи 75/80 ач. Для зарядки служит вспомогательный агрегат.

**Прочие данные.** Электровоз каждого типа будет иметь одну центральную кабину машиниста, в которой оборудуется один пульт с двумя постами управления, что, между прочим, позволит для определенных видов обслуживания применить прямое управление вместо дистанционного, неизбежного при двух кабинках.

Каждый электровоз любого типа оборудуется двумя пантографами, устанавливаемыми так, как показано на рис. 1 и 3. Расстояние между осями пантографов 4,80 м. Вылет и рабочий ход пантографов рассчитаны на минимальную высоту контактного провода 4 580 мм и максимальную 6 500 мм.

На электровозе однофазно-постоянного тока тяговые двигатели закрепляются по обеим сторонам к картеру, который с одной стороны опирается на ось, с другой же эластично подвешен к траверсе.

На однофазно-трехфазном электровозе будут установлены двигатели с простым зубчатым приводом. На электровозах ВВ двигатели полностью поддресорены.

**Энергоснабжение, СЦБ и связь.** Снабжение электрифицируемого участка энергией будет производиться от 7 тяговых подстанций, из них 3 тупиковых. Одна из тупиковых подстанций оборудуется двумя однофазными трансформаторами по 10 мвга (один — резервный), две остальные — тремя однофазными трансформаторами по 5 000 ква (один резервный).

Четыре подстанции являются промежуточными. На них устанавливаются трехфазно-двухфазные трансформаторы.

Одна промежуточная и тупиковые тяговые подстанции совмещены территориально с подстанциями единой высоковольтной сети Франции. Остальные построены специально и питаются от трехфазных линий передачи 60 кв. Против каждой промежуточной подстанции в контактной сети устраивается нейтральная вставка. Примерно в середине между подстанциями монтируются посты секционирования. Между постом секционирования и подстанцией оборудуются посты объединенного включения. Подстанции посты секционирования и объединенного включения будут иметь телеуправление из специального регулирующего центра.

Цепная подвеска будет состоять из бронзового несущего троса 65 мм<sup>2</sup> и медного профилированного контактного провода 107 мм<sup>2</sup>. Сечение подвески по меди около 150 мм<sup>2</sup>. На второстепенных путях несущий трос будет иметь меньшее сечение.

Станции оборудуются в основном гибкими поперечинами.

Устройства автоблокировки будут подвергнуты следующим переделкам: 1) в районах, где можно ожидать блуждающие токи, рельсовые цепи постоянного тока будут заменены на цепи переменного тока 83 гц; 2) на отдельных участках двухниточные рельсовые цепи постоянного тока будут заменены однопутными; 3) во всех цепях будет применена двухпроводная система и возврат тока через землю устранен; 4) линии связи кабелируются.

**Стоимость электрификации.** Проектная стоимость стационарных устройств оценивается в 18 млрд. французских франков и распределяется в следующем процентном отношении по различным статьям расхода:

Питание электроэнергией (подстанции и дополнительный монтаж на подстанциях общего назначения)	7,3%
Контактная сеть	37,1%
Автоблокировка и сигнализация	27,3%
Связь	16,1%
Реконструкция станций	6,1%
Реконструкция туннелей, искусственных сооружений и т. д.	6,1%

Электровозный парк оценивается в 12,5 млрд. франков. При этом, если стоимость электровоза с непосред-



стенными двигателями принять за 100, то стоимости других типов выразятся следующими цифрами:

Электровазы с игнитронами . . . . .	102
Электровазы однофазно-постоянного тока . . . . .	126
Электровазы однофазно-трехфазного тока . . . . .	141

(Rev. Gen. des Chemins de fer, № 1, 1953, Lefort)

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

## УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В подавляющем большинстве практических расчетов реактивной составляющей напряжения короткого замыкания (напряжения рассеяния) пользуются общеизвестной формулой, основанной на допущении об однородности магнитного поля в зазоре между обмотками, о постоянстве поля по высоте обмоток и о трапециевидном распределении напряженности поля в радиальном направлении. При этих допущениях расчет приводит к понятию о приведенном расстоянии между обмотками

$$\delta_s = c + \frac{d_1 + d_2}{3}.$$

Для учета действительной картины поля вводится поправочный коэффициент (так называемый коэффициент Роговского)

$$K_R = 1 - \frac{c + d_1 + d_2}{\pi h_{об}},$$

где  $h_{об}$  — высота обмоток;  $c$  — радиальный размер зазора между обмотками;  $d_1$  — радиальный размер внутренней обмотки;  $d_2$  — радиальный размер наружной обмотки.

Упрощенный расчет пригоден при сравнительно малых значениях отношения ширины канала рассеяния к его высоте  $\frac{c}{h_{об}}$  и при малых значениях  $\frac{d_1}{h_{об}}$  и  $\frac{d_2}{h_{об}}$ . Кроме того, метод расчета не учитывает расстояния от обмоток до стержня и до яра магнитопровода.

Теоретические соображения, ход которых здесь опускается, приводят к удобному для практических расчетов уточненному поправочному коэффициенту:

$$K_F = 1 - \Delta K_d - (\Delta K_c - \Delta K_{\text{я}}) = 1 - \Delta K_d - \Delta K_M, \quad (1)$$

где

$$\Delta K_d = \frac{1}{6} \frac{d_1 + d_2}{x}$$

— учитывает радиальные размеры обмоток,  $x$  — радиальное расстояние между серединами поперечных сечений обмоток;  $\Delta K_M = \Delta K_c - \Delta K_{\text{я}}$  — учитывает влияние стали магнитопровода, а именно влияние стержня ( $\Delta K_c$ ) и яра ( $\Delta K_{\text{я}}$ ).

Практическое использование полученных результатов значительно облегчается применением кривых, приведенных на рисунке. Кривые дают зависимость значений  $K_c$  и  $K_{\text{я}}$

от отношений  $\frac{h_c}{x}$  и  $\frac{h_{\text{я}}}{x}$  ( $h_c$  и  $h_{\text{я}}$  — рисунок). Определив с помощью этих кривых значения  $K_c$  и  $K_{\text{я}}$ , находим:

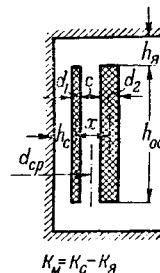
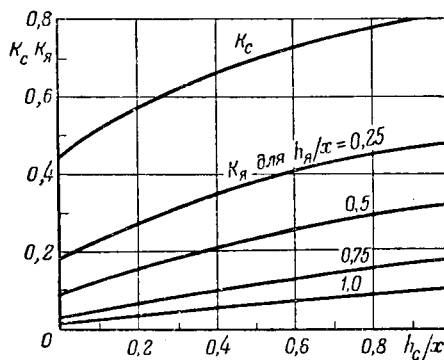
$$K_M = K_c - K_{\text{я}}$$

$$\Delta K_M = \frac{x}{h_{об}} (K_c - K_{\text{я}}).$$

Подставляя это значение в уравнение (1), получаем окончательно для уточненного поправочного коэффициента:

$$K_F = 1 - \frac{1}{6} \frac{d_1 + d_2}{x} - \frac{x}{h_{об}} K_M. \quad (2)$$

В большинстве случаев, как это видно из рисунка, влияние яра  $K_{\text{я}}$  сказывается значительно слабее, чем влияние стержня  $K_c$ . Если пренебречь влиянием яра и



ввести некоторые упрощения, то можно получить приближенное выражение для поправочного коэффициента, достаточно простое для вычислений и не требующее применения кривых:

$$K_F = 1 - \frac{1}{6} \frac{d_1 + d_2}{x} - \frac{x}{\pi h_{об}} \left( \ln 4 + \frac{4}{2 + \frac{3x}{h_c}} \right). \quad (2a)$$

При пользовании этим коэффициентом необходимо учитывать, что в формулу напряжения рассеяния следует подставлять не приведенную ширину канала рассеяния  $\delta_s$ , а расстояние между серединами сечений обмоток  $x$ .

**Пример.** Однофазный сухой трансформатор 26 кВА, 7 400/225 В, 3,52/115 А,  $P_c = 13$  кВА/стержень,  $f = 50$  Гц,  $U_{вт} = 3,3$  В/виток,  $h_{об} = 35,70$  см,  $d_1 = 0,65$  см,  $d_2 = 1,20$  см,  $c = 4,1$  см,  $\delta_s = 4,72$  см,  $x = 5,02$  см,  $h_c = 1,62$  см,  $h_{\text{я}} = 9,65$  см,  $d_{ср} = 21$  см — средний диаметр обмоток.

### 1. Существующая методика расчета

$$U_{кр} = \frac{4\pi^3}{100} \cdot \frac{2f}{100} \cdot \frac{d_{ср} \cdot \delta_s}{h_{об}} \cdot \frac{P_c}{U_{вт}^2} \cdot K_R,$$

где

$$K_R = 1 - \frac{5,95}{\pi \cdot 35,7} = 0,947,$$

$$U_{кр} = 1,24 \cdot \frac{21 \cdot 4,72}{35,7} \cdot \frac{13}{3,3^2} \cdot 0,947 = 3,89\%.$$

### 2. Результат измерения

Измерение дало  $U_{кр} = 3,74\%$ , что на 4 % меньше значения, вычисленного по существующей методике расчета.

### 3. Уточненный метод расчета

$$\Delta K_d = \frac{1}{6} \frac{d_1 + d_2}{x} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1,85}{5,02} = 0,062.$$

$K_c = 0,623$ ;  $K_{\text{я}}$  — мало (пренебрегаем);

$$K_M = K_c - K_{\text{я}} = 0,62,$$

$$K_F = 1 - \Delta K_d - \frac{x}{h_{об}} K_M = 1 - 0,062 - 0,14 \cdot 0,62 = 0,85;$$

$$U_{кр} = \frac{4\pi^3}{100} \cdot \frac{2f}{100} \cdot \frac{d_{ср} x}{h_{об}} \cdot \frac{P_c}{U_{вт}^2} K_F = 1,24 \cdot \frac{21 \cdot 5,02}{35,7} \cdot \frac{13}{3,3^2} \cdot 0,85 = 3,72\%.$$

Этот результат отличается от опытного лишь на 0,5%, что находится в пределах точности измерения.



Необходимо отметить, что в данном примере такая существенная разница между уточненным поправочным коэффициентом  $K_F$  и коэффициентом Роговского  $K_R$  обусловлена сравнительно большим расстоянием от обмоток до стержня и до ярма. Кроме того, обмотка не имела регулировочной обесточенной зоны и входных витков с усиленной изоляцией — факторов, которые привели бы к повышению измеренного значения напряжения рассеяния и к его лучшему совпадению с рассеянием, вычисленным с помощью коэффициента Роговского. Тем не менее, предлагаемый метод расчета может быть успешно использован для вычисления реактивной составляющей напряжения короткого замыкания, в особенности в сухих трансформаторах с тепловыми и изоляционными каналами большой ширины.

(Е и М, стр. 306, № 13, 1952, E. Feste)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## УПРОЩЕННЫЙ ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ДРОССЕЛЯ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

В целях оценки работы дросселя насыщения (Д. Н.) при различных подмагничиваниях и нагрузках предложен простой и наглядный способ графического анализа его работы, основанный на том, что для двух предельных случаев подмагничивания — нулевого и „предельного“ — переменное напряжение считают приложенным соответственно только к дросселю или нагрузке. Аналогично переменный ток  $I_{\sim}$  определяется только или характеристикой дросселя, или характеристикой нагрузки. Между предельными случаями подмагничивания расположена область регулирования.

Ниже приводятся графики, построенные на основании принятых допущений для некоторых типов нагрузок по графику напряжения и семейству обобщенных характеристик дросселя [Л.1].

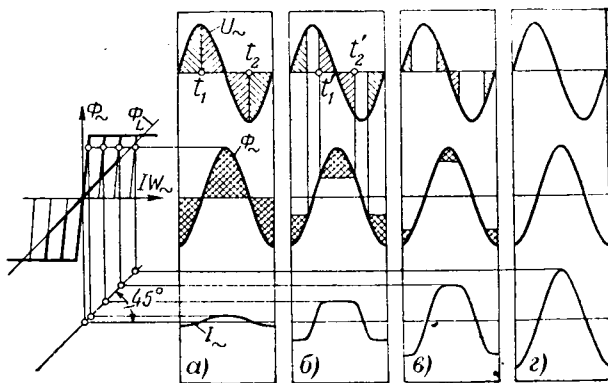


Рис. 1.

На рис. 1 представлены графики напряжения, потока и тока при индуктивной нагрузке. Здесь, как и на последующих рисунках, незаштрихованные участки кривых напряжения соответствуют режиму, определяемому характеристикой нагрузки, т. е. в данном случае  $\Phi_L = f(I_{\sim})$ , которую можно представить прямой, расположенной под углом  $45^\circ$ . Переменный ток при этом изменяется по синусоиде. Заштрихованные участки соответствуют времени, в течение которого напряжение приложено к дросселю, и переменный ток, определяемый характеристикой дросселя (в ее ненасыщенной части), практически постоянен (интервал  $t_2 - t_1$ ). Следовательно, при подмагничивании кривая тока получает трапециoidalную форму, превращаясь в пределе (рис. 2,г) в синусоиду; поток остается синусоидальным.

На рис. 2 даны графики напряжения, потока и тока при активной нагрузке  $r$ .

Согласно указанному выше при слабых подмагничиваниях (рис. 2,б) ток практически сохраняет прямоугольную форму, поток отстает от напряжения меньше чем на  $90^\circ$  и еще близок к синусоиде. При умеренном подмагничивании

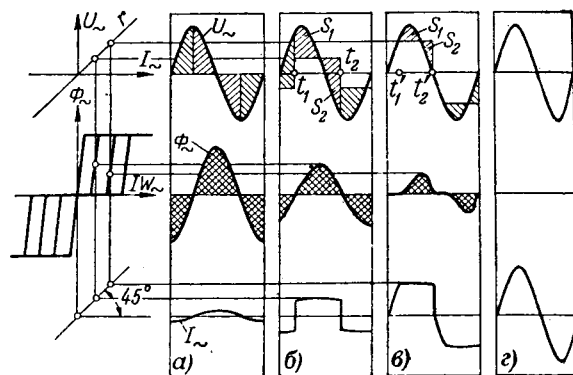


Рис. 2.

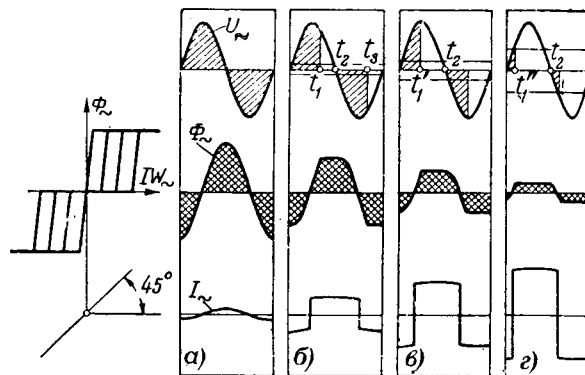


Рис. 3.

(рис. 2,б) ток во время  $t_1$  (незаштрихованный участок кривой напряжения) определяется нагрузкой (активным сопротивлением), т. е. синусоидален, магнитный поток равен нулю. В интервале  $t_2 - t_1$  (заштрихованный участок кривой напряжения) переменный ток определяется характеристикой дросселя, т. е. практически постоянен, спадая при  $t_2$  до нуля. Напряжение на дросселе устанавливается таким, что площадь  $S_1$  равна площади  $S_2$  (рис. 2,б и в), магнитный поток отличается от синусоиды и отстает на меньший угол, чем в случае рис. 2а. В пределе (сильное подмагничивание) ток имеет синусоидальную форму, совпадая по фазе с напряжением, а магнитный поток равен нулю (рис. 2,г).

На рис. 3 приведены аналогичные графики при работе на выпрямитель, нагруженный индуктивно-активной нагрузкой. При большой индуктивности постоянный ток нагрузки  $I_1$  определяется активным сопротивлением ее  $r$  и площадью кривой напряжения на выпрямителе, действующего за отрезок времени  $t_2 - t_1$  (рис. 3,б, в, г):

$$I_1 = \frac{2}{T} \frac{1}{r} \int_{t_1}^{t_2} U_{\sim} dt.$$

За время  $t_1$  и  $(t_3 - t_2)$ , соответствующее заштрихованным участкам синусоиды напряжения, поток изменяется по синусоиде, ток получает прямоугольную форму. В остальные части периода  $(t_2 - t_1)$  и  $(T - t_3)$  напряжение приложено к выпрямителю, но ток и поток вследствие большой индуктивности не изменяются. С увеличением подмагничивания график потока приближается к трапеции; ток, сохраняя прямоугольную форму, увеличивается, приближаясь по фазе к напряжению (рис. 3,г). В пределе аналогично случаю активной нагрузки ток совпадает по фазе с напряжением, а магнитный поток исчезает.

## Литература

1. Ю. Г. Толстов. Измерительные трансформаторы постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.
2. W. Walter. Применение магнитных усилителей в технике регулирования. Е и М, № 11, 1952.

Инж. В. Н. ИСТРАТОВ



# ЗАОЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

(Электричество, № 1, 1953, стр. 84—90)

## ПОЛНЕЕ ОСВЕЩАТЬ РАБОТЫ ЛАУРЕАТОВ СТАЛИНСКИХ ПРЕМИЙ

Перед ведущим научным органом в области электротехники, каким является журнал Академии наук СССР и Министерства электростанций и электропромышленности СССР «Электричество», стоят следующие три основные задачи:

1. Освещать в передовых и в других статьях главные вопросы политики партии и правительства в электроэнергетике.

2. Помещать описания новых научных работ по электричеству и достижений в различных отраслях электротехники, которые бы позволили читателям журнала, специально интересующимся данной отраслью, составить полное представление о рассмотренных вопросах, в частности, усичить новое, достигнутое автором работы, и то, что осталось еще для исследования и решения в дальнейшем.

3. Информировать читателей путем опубликования регулярных обзоров о состоянии широкого круга важнейших современных вопросов по теории электричества и практических вопросов в электротехнике для того, чтобы читатели журнала были в курсе развития не только современного состояния вопросов в своей специальности, но и в смежных областях.

С точки зрения этих задач необходимо отметить, что журнал «Электричество» за последние несколько лет значительно улучшил свою работу. Журнал стал наиболее содержательным из издаваемых во всем мире журналов по электротехнике. И это обстоятельство соответствует ведущей роли науки нашей страны.

Однако наряду с несомненными достижениями, а быть может именно вследствие этих достижений, журналу могут быть предъявлены читателями некоторые претензии как со стороны содержания, так и со стороны оформления.

Несомненно, что задача, поставленная журналу, — быть ведущим научным органом во всех отраслях электротехники — весьма сложна, ибо по мере развития объем вопросов каждой из отраслей электротехники становится все более и более обширным. В связи с этим своевременно еще раз поставить вопрос о переходе на большее число номеров в год, скажем, на 24 выпуска.

Возвращаясь к перечисленным выше задачам, можно отметить, что с первыми двумя задачами журнал справляется удовлетворительно, хотя и здесь можно сделать два замечания. Во-первых, следует полнее освещать ведущие работы лауреатов Сталинских премий. Во-вторых, следует избегать чрезмерной сжатости изложения, которая в некоторых статьях затрудняет иногда понимание хода рассуждений авторов.

Что касается третьей задачи, то она пока решается журналом лишь путем помещения рефератов в разделе «По страницам технических журналов», хотя значительно более ценным для читателей было бы периодическое помещение обзорных статей по отдельным отраслям электротехники со ссылками на книжную и журнальную литературу. Появление таких обзорных статей было бы встречено читателями с большим удовлетворением, тем более, что за многие десятилетия издания журнала «Электричество» такие обзоры в нем уже практиковались.

Редакция в 1952 г., видимо, встала на этот путь, опубликовав в № 1 и 2 обзор по гидроэлектростанциям большой мощности. Однако должного внимания к регулярным обзорам еще не заметно.

Полагаю общепризнанным, что составление обзорных статей должно поручаться лицам, обладающим наиболее высокой эрудицией в данной области, и должно намечаться редакцией по тематическому плану.

Просматривая содержание номеров за 1949, 1950, 1951 и 1952 г., нельзя не отметить, что замечается закономерное усиление внимания журнала к проблемам, связанным с крупнейшими энергетическими стройками, ведущимися в нашей стране.

На наш взгляд значительно большего внимания заслуживает раздел ионной и электронной техники.

Учитывая непрерывную связь электрификации с другими отраслями энергетики и народного хозяйства в целом, было бы желательно помещение хотя бы один раз в год обзоров и по общей энергетике.

Количество авторов, принимающих участие в журнале, судя по перечню авторов в двенадцатых номерах за ряд лет, снижается. Это едва ли можно считать положительной характеристикой журнала. На эту сторону дела редакционная коллегия должна обратить свое внимание.

В заключение хочу пожелать журналу «Электричество», имеющему столь большое значение для всех работников энергетики СССР, дальнейших успехов.

**Проф. А. В. ОРЛОВСКИЙ**

*Киевский политехнический институт*

## ПОВЫСИТЬ ПРАКТИЧЕСКУЮ ЦЕННОСТЬ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ПУБЛИКУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редколлегия журнала «Электричество» проявила в свое время исключительно ценную инициативу, проведя весьма содержательные и интересные конференции читателей журнала в ряде городов Советского Союза. Эти мероприятия оживили деятельность журнала и приблизили его к запросам читателей.

За последние годы как по тематике, так и по содержанию статей наблюдается прогресс в удовлетворении разнообразных требований читателей. В журнале напечатано много статей, освещающих вопросы новейших достижений в теории электромагнитных и электростатических явлений, много материала дано в виде рефератов по достижениям исследовательских работ, опубликованы новые инженерные работы в широких областях электроэнергетики, электропривода, по автоматике и электронике, развиты отделы хроники и библиографии.

В дальнейшем, в связи с обилием материала, нужно добиваться большего удельного веса оригинальных статей, еще более сжатых форм изложения и еще более тщательнее отфильтровывать узко ведомственный материал, пересылая его в специальные журналы. Это не значит, что в журнале «Электричество» не следует освещать вопросов, имеющих узко практическое значение, но освещение этих вопросов должно обобщаться и базироваться на углубленной проработке вопроса. По таким специальным вопросам в журнале «Электричество» более целесообразно помещать статьи-обзоры, подводящие итоги, систематизирующие и обобщающие результаты исследований, опубликованных в специальных журналах и сборниках. Подобные статьи по многим актуальным вопросам будут способствовать созданию объединенных школ изучения технических вопросов в практике и в научно-исследовательских институтах. Они, несомненно, будут полезны и в подготовке кадров, тем более, что уже в ближайшие годы тесное сотрудничество научно-исследовательских институтов и лабораторий вузов с заводами, проектными и эксплуатирующими организациями вызовет качественный рост издаваемых институтом и вузами сборников научно-исследовательских работ, обогатит их содержание.

Реферированию и обсуждению наиболее существенных работ ведущих советских заводов, научно-исследовательских институтов и лабораторий, в особенности исследовательских работ, связанных с крупнейшим строительством, осуществляемым в нашей стране, следует в будущем уделять особое внимание в целях получения надежных выводов из этих исследовательских работ для заводов и строительства.

Особое внимание следует обратить на нежелательность опубликования на страницах журнала «Электричество» даже в дискуссионном порядке недоработанных материалов, содержащих недостаточно обоснованные рекомендации.

**Доктор техн. наук Р. А. ЛЮТЕР**  
**кандидат техн. наук Е. Я. КАЗОВСКИЙ**  
**Завод „Электросила“**

### НАУЧНЫЕ ВОПРОСЫ ИЗЛАГАТЬ ПОНЯТНО ДЛЯ ШИРОКОГО КРУГА ЧИТАТЕЛЕЙ

Теоретические статьи журнала «Электричество» часто отличаются малой доступностью для широкого круга инженеров.

Авторы статей пользуются языком формул там, где по существу дела этого совсем не требуется. Содержание ряда статей не усваивается читателем из-за отсутствия введения в существо рассматриваемых вопросов. По этой же причине выводы статей не всегда достаточно ясны и конкретны, так как не ориентируют читателя в отношении практической или научной полезности приведенного в статье материала.

Желательно снабжать теоретические статьи введениями и выводами, ориентирующими рядового читателя в конкретной обстановке, вызывающей необходимость рассмотрения данных вопросов.

Необходимо упростить язык теоретических статей, памятуя, что самые сложные научные вопросы могут быть изложены языком, понятным широкому кругу читателей.

Не следует превращать журнал в трибуну для узко специальной полемики в тех случаях, когда обсуждение сводится к частным вопросам и становится совершенно непонятным для широких кругов инженеров и техников.

**Секция электростанций**  
**Саратовского отделения ВНИТОЭ**

### НЕ ОГРАНИЧИВАТЬ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СТАТЬИ

Подавляющее большинство статей, касающихся проблем проектирования электростанций, особенно проблем автоматики и релейной защиты, опубликованных в журнале «Электричество» за 1951 и 1952 гг., мне понравилось. При помощи журнала я имею контакт с новейшими достижениями советской и мировой электротехники.

Больше внимания следовало бы уделять на страницах журнала сетям коммунального назначения, автоматике мощных гидроэлектростанций, коммутационным схемам электростанций и др.

Весьма полезным было бы помещение в журнале каталожных данных по новой электротехнической аппаратуре и материалам.

Нужно и впредь развивать раздел дискуссий и не ограничивать статьи общего технико-теоретического значения.

**Инж. Эльмар ЯКОБСОН**  
**Эстонкоммунэнерго**

### ДАВАТЬ БОЛЬШЕ ПОЯСНЯЮЩИХ РИСУНКОВ И СХЕМ

Мне бы хотелось увидеть в журнале больше статей на следующие темы: 1) устройство, принцип действия, основы теории высокоскоростных асинхронных однофазных и трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором малой мощности; 2) теория, устройство и принцип действия инвертора; 3) история отечественной и зарубежной электротехники.

В статьях следует больше давать рисунков и схем поясняющих текст, особенно, когда идет речь об устройстве машин, приборов, аппаратов, коммутационных приспособлений.

Журнал «Электричество» оказывает читателям большую помощь, знакомя их с новыми вопросами теоретической электротехники.

**Инж. В. М. АНТОПОЛЬСКИЙ**  
**Саратовский индустриальный техникум**

### ЖУРНАЛ ПОМОГАЕТ В НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Журнал «Электричество» оказывает мне и моим коллегам очень большую помощь как в научной, так и в педагогической деятельности. Весьма ценным является в журнале раздел «Из истории электротехники».

Большинство статей по теоретической электротехнике, опубликованных за 1951 и 1952 гг., были на необходимом научном уровне и представляли безусловный интерес. Хотелось бы несколько чаще встречать в журнале статьи, посвященные исследованиям нелинейных электрических цепей.

По вопросам оформления журнала «Электричество» имеется пожелание, разделяемое многими и высказывавшееся также на читательских конференциях: на корешке каждого номера журнала печатать номер журнала и год издания. Технически это, по-видимому, не представляет затруднений и практикуется многими отечественными и зарубежными журналами. К журналу «Электричество» приходится прибегать не раз, а много раз на протяжении ряда лет после выхода журнала в свет и обозначения на корешках являются немаловажным элементом удобства для читателей.

**Доктор техн. наук Г. Е. ПУХОВ**  
**Томский политехнический институт им. Кирова**

### 24 НОМЕРА В ГОД

За последние два-три года в журнале «Электричество» стало появляться больше работ по измерительной технике, что следует приветствовать. Желательно поместить обзорных статей, которые осветили бы современное положение и тенденции развития в различных областях электроизмерительной техники в связи с развитием электротехники вообще.

Мне кажется, что печатание кратких реферативных обзоров по 3—4 статьям себя не оправдывает. Такой обзор естественно не может характеризовать состояние вопроса. В то же время он требует от автора большего труда, чем отдельные рефераты, что неизбежно приводит к более медленной информации читателей относительно появляющихся в литературе наиболее интересных новинок. В последнем можно убедиться по приводимым авторами ссылкам на литературные источники. Поэтому я считаю, что обзоры реферативного характера следует свести к минимуму и увеличить число отдельных рефератов.

Я вношу предложение отводить в каждом номере журнала одну полосу, на которой печатать очень краткие (3—4 строчки) аннотации по статьям, появляющимся в отечественной и зарубежной периодике. Такая хорошо подобранная информация серьезно помогла бы читателям, у которых нет возможности тратить много времени на просмотр многообразной и обильной литературы по электричеству и электротехнике.

Журнал «Электричество» за 73 года своего существования сыграл выдающуюся роль в развитии отечественной электротехники и электроэнергетики. Бурный рост этих важных отраслей народного хозяйства за годы Советской власти и особенно в настоящее время вызывает большой поток научных трудов, опубликование которых двигает дальше науку и технику. Однако редакционный портфель перегружен и статьи печатаются недостаточно быстро. Я надеюсь, что читатели журнала «Электричество» поддержат мое предложение о выпуске 24 номеров в год вместо 12.

В связи с выступлением проф. К. Б. Карандеева («Электричество», № 1, 1953 г.), в котором выражено его критическое отношение к четырем моим статьям в журнале «Электричество», могу указать на иное мнение о полезности данных моих работ со стороны Секции электронных и электромеханических приборов ВНИТОПРИБОР<sup>1</sup>.

**Инж. А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ**

## ВВЕСТИ РАЗДЕЛ „ДЛЯ МОЛОДОГО ИНЖЕНЕРА“

«Электричество» — хороший, интересный и ценный журнал, но он может и должен быть лучше, если устранить еще имеющиеся в нем недостатки.

В журнале необходимо возобновить печатание годичных обзорных статей по отдельным разделам теоретической и прикладной электротехники, как организовать эти обзоры наилучшим образом, я полагаю, редакционной коллегии журнала ясно.

В журнале нет статей по вопросам подготовки электротехнических кадров. За последние годы были лишь две статьи — моя в 1941 г. и В. А. Голубцов в 1946 г.

Редакция, повидимому, избегает острых дискуссий, поэтому, вероятно, не опубликована моя рецензия о книге Л. М. Пиотровского «Электрические машины» (1949 г.).

Желательно иметь в журнале раздел «Для молодого инженера» — одну или две страницы в каждом номере. Этот раздел должен повышать квалификацию молодых инженеров. Для этого раздела я предлагал в свое время цикл статей по операторному анализу в электрических машинах.

**Проф. А. Я. БЕРГЕР**

**Ленинград**

## ПОМОЩЬ ИНЖЕНЕРАМ НА ПЕРИФЕРИИ

Говоря о помощи, которую оказывает журнал «Электричество» читателям, в частности инженерам, находящимся на практической работе на периферии, я считаю необходимым отметить по крайней мере две стороны этого вопроса.

<sup>1</sup> Редакция журнала «Электричество» получила от Секции ВНИТОПРИБОР письмо, в котором дан положительный отзыв о статьях А. И. Фюрстенберга, опубликованных в журнале «Электричество» (Ред.).

Во-первых, журнал «Электричество» повышает научно-технический кругозор читателей.

Во-вторых, журнал «Электричество» способствует объединению творческой жизни огромного числа инженеров-электриков, работающих во всех районах нашей необъятной страны. Я лично, не представляю, как можно инженеру-электрику работать без этого журнала.

Следует уделить в журнале место освещению философских вопросов, связанных с последними достижениями в области познания природы материи и, в частности, электричества. Давно в журнале ничего не печатается по вопросам ядерной энергетики. Больше места необходимо выделить разбору типовых проектных решений, рефератам.

Желательно увеличить число помещаемых в тексте фотоиллюстраций.

**Инж. Г. К. ЦВЕРАВА**

**Тихвинский глиноземный завод**

## ПОПОЛНИТЬ СОДЕРЖАНИЕ СПРАВОЧНИКА

Я давно читаю журнал «Электричество». Журнал оказывает мне помощь, освещая ряд актуальных и практически весьма ценных вопросов по электрическим машинам, по электрическому приводу и т. д. Кроме того, журнал предоставлял мне консультацию по возникавшим в моей работе вопросам.

В прилагаемом к журналу «Календаре-справочнике» надо было бы дать сведения о расчетных формулах по электроприводу, по пересчету обмоток электрических машин и другие сведения, необходимые персоналу энергоцехов предприятий.

В журнале следует помещать портреты русских электротехников, исполненные в красках.

**Инж. К. И. КРАЙНИЙ**

**г. Котовск, Тамбовской обл.**

## ЖУРНАЛ ОПРАВДЫВАЕТ НАЗНАЧЕНИЕ

Полагаю, что выражаю не только свое отношение к журналу, принося благодарность старейшему русскому техническому журналу «Электричество» за действительную техническую помощь и за глубокие знания по электричеству, которые черпаются с его страниц. Журнал с 1880 г. и до наших дней является кафедрой многих корифеев русской электротехники.

С ленинскими словами на заглавной странице журнал постоянно освещает путь передовой советской электротехнической науки, являясь для многих читателей незыблемым спутником во всей творческой работе, связанной с электрификацией нашей Родины.

**Инж. В. Н. БЕЛОВ**

**г. Ульяновск**



## Конференция по осветительным установкам

В марте в Ленинграде состоялась конференция по осветительным установкам, созванная Светотехнической секцией ВНИТОЭ с целью популяризировать достижения в области техники освещения, обменяться опытом работы и обсудить ряд организационно-технических вопросов, связанных с дальнейшим улучшением осветительных условий в промышленности, в общественных зданиях и на открытых пространствах.

В работе конференции приняли участие 280 делегатов, в основном работники проектных организаций и заводских энергобюро. Участники конференции заслушали 20 лекций и докладов и 15 сообщений с мест. Делегатами было внесено в письменном виде около 50 предложений и дополнений.

Во вступительном слове, открывая конференцию, член-корр. АН СССР, проф. М. А. Шателен отметил прогресс советской светотехники за последние годы.

Проф. В. В. Новиков сделал доклад «Россия — родина электрического освещения». С обзором перспектив развития энергетики СССР в пятой пятилетке выступил инж. Г. О. Левит. Затем конференция заслушала сообщения М. М. Бударина, Н. В. Волоцкого, Б. И. Гурвича, Н. П. Дмитриевской, Д. А. Зильбера, А. А. Каплана, Г. М. Кнорринга, Д. Н. Лазарева, М. С. Рябова, В. М. Себрякова, В. В. Телятеева и А. С. Шайкевича.

В докладе, посвященном итогам работ по вопросам производственно-гигиенической эффективности люминесцентного освещения, отмечалось, что жалобы на новые источники света всецело объясняются непродуманной схемой их установки и неправильными условиями эксплуатации. Люминесцентное освещение создает благоприятные условия для функциональной деятельности человека. Преимущества люминесцентного освещения оказываются только при освещенностях не менее 75—100 лк, что должно учитываться при устройстве освещения. Можно считать доказанным, что при правильном устройстве люминесцентного освещения обеспечивается повышение производительности труда и постоянная работоспособность зрения в течение всего рабочего дня.

Частой причиной низкой оценки установок люминесцентного освещения является нарушение требований в отношении ограничения слепящего действия ламп и стробоскопического эффекта.

Поддавленное большинство выступлений и пожеланий делегатов было посвящено претензиям к работе светотехнической промышленности, которая очень медленно налаживает массовый выпуск рациональной осветительной аппаратуры. Нельзя мириться с тем, что в школах часто установлены открытые лампы, вызывающие ослабление зрения учащихся, что в современных высоких цехах редко имеются средства для рационального перераспределения потока ламп и по существу освещается не рабочая поверхность, а стены.

Делегаты отмечали необходимость организации массового производства люксометров, без чего невозможно соблюдение требований нормальной эксплуатации системы освещения.

Высокую оценку на конференции получила продукция Рижского завода электроустановочных изделий Главэлектромонтажа, освоившего производство светильников для высотных зданий Москвы. Было высказано пожелание о расширении выпуска этих светильников, которые должны стать доступными и для других строителей.

Конференция заслушала сообщения по вопросам нормирования осветительных установок и методике проектирования. В настоящее время ведутся работы по пересмотру норм освещенности. Проект новых норм, разработанный Ленинградским институтом охраны труда, предусматривает существенное повышение освещенности и более дифференцированный по сравнению с ГОСТ 3825-47 учет особенностей выполняемой работы.

На конференции было высказано пожелание о выпуске сводного каталога осветительной аппаратуры аппаратов низкого напряжения и установочных изделий.

В области подготовки кадров делегаты конференции отметили необходимость расширения подготовки светотехников в Московском энергетическом институте, укрепления соответствующей специализации в Ленинградском политехническом институте и организации светотехнической специализации в ряде других институтов.

С большим интересом было заслушано сообщение об освещении высотных зданий в Москве. Опыт, полученный в процессе строительства высотных зданий, должен быть использован для выпуска светотехнических изделий для массового строительства. Широкий обмен мнений вызвало сообщение представителя треста «Мосэлектромонтаж» о методах монтажа электрических сетей жилых и общественных зданий в стеклянных трубках. В 1953 г. выпуск стеклянных труб для прокладки проводов освещения увеличивается в несколько раз. Ведутся разработки по освоению многоканальных стеклянных труб на 2—4 отверстия с целью применить в них провода без изоляции.

В связи с непрерывным ростом механизации полевых работ и короткими сроками сева и уборки вопросы освещения ночных работ в поле являются чрезвычайно актуальными. Заслуживают внимания в этом отношении работы, выполненные Киевским институтом гигиены труда и профзаболеваний.

С сообщением о работах по установлению норм освещенности для предприятий текстильной промышленности и по разработке типовых способов освещения отдельных цехов выступил представитель Ивановского института охраны труда. Работа института получила положительную оценку в выступлениях делегатов.

В докладах, посвященных наружному (уличному) освещению и световому оформлению городов, было отмечено

но, что низкий к. п. д. существующих уличных светильников не позволяет создать необходимые освещенности на проездах без чрезмерного расхода электрической энергии. Академией коммунального хозяйства им. Памфилова разработаны более экономичные типы светильников с призматической и зеркально-призматической оптикой. Разработаны также способы применения люминесцентных ламп для уличного освещения в условиях широких колебаний температуры окружающего воздуха.

В области нормирования светового рекламного оформления проделана значительная работа Управлением по делам архитектуры при Ленгорисполкоме и Светотехнической секцией ВНИТОЭ. Разработанные нормативные указания по этому вопросу приняты в Ленинграде как обязательные, что позволило достичь существенного улучшения

светового оформления города. Разработанный материал представляет интерес и для других городов и может быть использован при составлении специального раздела Правил устройства.

К недостаткам проведенной конференции следует отнести, в частности, отсутствие докладов по проблеме развития источников света, по освещению в тяжелой промышленности и в горном деле и др. ВНИТОЭ не смогло в полной мере обеспечить делегатов печатными материалами по сделанным докладам и прочитанным лекциям.

Конференция наметила ряд технических мероприятий для дальнейших работ по рационализации осветительных установок.

**Кандидат техн. наук Н. В. ВОЛОЦКОЙ  
и инж. Г. М. КНОРРИНГ**



## От ИАТ АН СССР

*Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР созывает в октябре 1953 г. второе Всесоюзное совещание по теории и методам автоматического регулирования.*

*Оргкомитет совещания рассматривает в настоящее время список участников совещания и предлагаемые с мест доклады. Доклады могут быть посвящены изложению новых научных результатов в теории и методах автоматического регулирования, методике расчета, наладки и экспериментального исследования систем автоматического регулирования или содержать обзор развития определенного научного направления в области автоматического регулирования.*

*Второе Всесоюзное совещание по теории и методам автоматического регулирования будет проходить в Москве и рассчитано на 10 дней.*

*Справки по вопросам участия в Совещании выдаются Оргкомитетом по адресу: Москва 40, Ленинградское шоссе, д. № 9. Телефон Д 1-89-04.*



**Д. С. ЧУКАЕВ. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРОДОВ. 350 стр., ц. 9 руб. 40 коп.**  
**и Н. В. ВОЛОЦКОЙ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЖИЛЫХ ДОМОВ. 118 стр.,**  
**ц. 3 руб. 95 коп. Изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР**

Большой размах жилищного и гражданского строительства в городах нашей страны и все более глубокое проникновение электроэнергии во все области городского хозяйства и быта вызывают рост электропотребления и одновременно предъявляют новые повышенные требования к надежности электроснабжения.

Перед советскими энергетиками поставлены задачи создания наиболее рациональных систем электроснабжения городов и отдельных потребителей, в первую очередь жилых домов.

Эти задачи сейчас успешно разрешаются разными проектными и эксплуатационными организациями путем сочетания наименьших затрат средств и материалов с необходимой степенью надежности электроснабжения.

Ряд существовавших с дореволюционного времени систем электроснабжения городов подвергается капитальной реконструкции. Вопросы устройства сети, ее реконструкции и усиления переплетаются с вопросами планировки и благоустройства городов, с сооружением новых жилых и общественных зданий. В связи с этим необходимо, чтобы градостроители и работники городского хозяйства были хорошо осведомлены об устройстве электроснабжения городов и домов и были в курсе современных требований в этой области.

Однако до сих пор не было систематизированной литературы по этим вопросам. Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, восполняя этот пробел, выпустило в 1952 г. две книги: 1) «Электроснабжение городов» Д. С. Чукаева и 2) «Электрические установки жилых домов» Н. В. Волоцкой. Первая книга допущена быв. Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для студентов специальности «Городское хозяйство и строительство». Автор включил в нее большое количество тем и вопросов, не имеющих прямого отношения к электроснабжению городов или имеющих к нему только косвенное отношение. Например, городские телефонные станции, радиотрансляционные сети, сети электрофикации, применение электроэнергии в быту, отопление замороженных трубопроводов, грозозащита инженерных сооружений и др. Этим темам отведено около половины книги. В остальных главах книги имеются разделы, посвященные видам топлива электростанций, внутренней компоновке электростанций, электрофильтрам для очистки газов, описанию электроосветительной аппаратуры, расчету электрического освещения, электрооборудованию быстрходных пассажирских лифтов, оказанию помощи пострадавшим от электрического тока и другим вопросам, не имеющим прямого отношения к вопросам электроснабжения городов.

Таким образом, рассматриваемая книга Д. С. Чукаева превращена по сути дела в подобие справочника. После того как книга прочитана, становится непонятным, для кого она написана, на какой уровень подготовки читателей она рассчитана?

С одной стороны, мы находим в ней примитивное описание устройства котлов, турбин, бытовых электроприборов и не менее примитивное изложение вопросов производства коммутационных операций в распределительных устройствах и ряда других вопросов, явно рассчитанных на читателя неэлектрика. И вместе с тем в книге приводится ряд схем различного построения городских распределительных электросетей в такой сжатой форме, что даже достаточно грамотный в электротехническом отношении читатель — не специалист по сетям — не в состоянии будет разобраться в принципах построения и действия отдельных схем, в их достоинствах и недостатках и в областях их применения. Это относится, например, к описанию схем коммутации электростанций, устройству

электрофильтров, регулированию коэффициента трансформации трансформаторов под нагрузкой и к некоторым другим сложным техническим вопросам. Ряд специальных терминов и понятий дается без расшифровки и объяснения.

Глава I содержит краткую характеристику состояния и перспектив развития электроснабжения городов и характеристику потребителей электроэнергии в городе. В ней перечислены все категории потребителей электроэнергии в городе, но не дана такая их характеристика, которая заключала бы в себе не только удельные показатели электропотребления и нагрузки, но и современные требования к качеству и надежности электроснабжения по каждой категории потребителей в отдельности и характерные для каждой категории суточные графики нагрузки. В ней не показано, как формируется суммарный график электрической нагрузки города.

Автор почему-то ограничивается показом графиков механической прачечной, какой-то мастерской (у которой почему-то с 16 до 24 час плавно снижается нагрузка) и нехарактерного графика нагрузки жилого дома. Не показаны графики нагрузки трамвая, водопровода, промышленных предприятий с разным числом смен.

В главе II «Городские электрические станции» дается изложение чрезмерно многих вопросов, большинство которых не связано с основной темой книги. Выбором мощности, вида топлива, типа агрегатов, внутренней компоновки, золоудалением, очисткой дымовых газов и другими аналогичными вопросами занимаются специальные энергетические организации и им посвящены специальные курсы.

В то же время в этой главе отсутствует небольшой исторический обзор развития источников электроснабжения городов и не показано, как на базе местных и районных станций создаются энергосистемы, не выявлена роль энергосистем в электроснабжении больших и малых городов. В главе не подчеркнута, что источниками электроснабжения больших и многих малых городов являются не только станции но и районные понижительные подстанции, и не отмечена роль высокого напряжения для связи между электростанциями и для наиболее экономичного ввода электроэнергии в отдельные районы города. Автор дважды в различных местах книги употребляет термин «глубокий ввод высокого напряжения», не поясняя, что он означает, какими техническими мероприятиями он осуществляется и какой экономический эффект он дает. Между тем, знание этого вопроса намного важнее и полезнее для градостроителей и работников городского хозяйства, чем знание, например, вопросов внутренней компоновки электростанций или детального описания устройства электрофильтров для дымовых газов.

Наиболее важной для темы книги является глава III «Распределение электроэнергии и городские электрические сети». Однако автор напрасно уделяет внимание в этой главе сельскохозяйственным и тяговым троллейным сетям и тем более сетям радиотрансляции и электрических часов. В «Требованиях, предъявляемых к электрическим сетям» переписан один из параграфов Правил устройства электрических установок, посвященный распределению потребителей по категориям с точки зрения необходимой степени надежности электроснабжения. Эти весьма общие положения, конечно, не могут заменить читателю описание конкретных требований, предъявляемых к надежности электроснабжения отдельными городскими потребителями электроэнергии: к какой категории по надежности следует, например, отнести бани, зрелищные предприятия, радиотрансляционные узлы, больницы, светофоры регулирования уличного движения и т. п. На эти вопросы автор



ответа не дает, но ведь именно это нужно, в первую очередь, знать работнику городского хозяйства.

Вопросу качества электроснабжения в разделе посвящены два абзаца. Говоря о частоте, необходимо было пояснить, от чего зависит поддержание нормальной частоты и как частота регулируется, и уж во всяком случае нельзя сводить вред от работы с пониженной частотой к уменьшению выпуска продукции, как это делает автор.

Вопросу регулирования напряжения автор уделяет много места. Однако эти разделы книги изложены неудачно. Конечно, прочтя эти разделы, читатель в какой-то степени начинает понимать, что борьба за качество напряжения у потребителей — дело важное. Но работа об этом, как можно заключить из данного раздела, лежит на энергоснабжающей организации, а градостроителю и работнику городского хозяйства об этом беспокоиться нечего. Между тем основной смысл раздела должен заключаться в том, чтобы показать важнейшие технические правила и мероприятия, которые должны выполняться потребителями электроэнергии для поддержания качества напряжения. Как можно не сказать в таком разделе о необходимости автономного устройства сетей для потребителей с резко колеблющейся нагрузкой и для потребителей, чувствительных к колебаниям напряжения, и не дать конкретные примеры из практики?! Как можно ничего не сказать о коэффициенте мощности потребителей, его влиянии на регулирование напряжения и способах его улучшения?! Очевидно следовало сказать и о применении в ряде случаев местных стабилизаторов напряжения.

В книге по электроснабжению следовало рассказать о потерях электроэнергии в сетях как об одном из важнейших показателей. Необходимо было остановиться на вопросах экономичности работы сетей и показать основные технические мероприятия по уменьшению потерь (повышение коэффициента мощности, правильное разделение потоков мощности, повышение напряжения сетей и т. п.) и подчеркнуть необходимость разумного сочетания затрат цветных металлов и допускаемых потерь электроэнергии в сетях.

Вопросы коммутации городских электросетей изложены слишком сложно для читателя, неподготовленного специально, и слишком примитивно для специалиста-сетевика.

Сообщив о разделении сетей на питающие и распределительные, автор ничего не сказал о распределительных (фидерных) пунктах, не дал схем их питания, резервирования и автоматизации. Упомянув о возможности применения в городских сетях телеуправления, автор не объяснил, где и зачем оно может быть нужно.

Схемы сетей высокого и низкого напряжения рассматриваются раздельно. В результате читатель не получает представления о взаимном влиянии этих схем друг от друга. Между тем самым важным мероприятием по экономичному и в то же время надежному построению распределительных сетей является, как известно, перенос резервирования элементов сети высокого напряжения в сеть низкого напряжения. В этом же основной смысл всевозможных «сеток» и секционированных (например, двух лучевых) схем. Без такого взаимного рассмотрения списание схем «сеток» и других видов автоматизированных на низком напряжении сетей теряет смысл.

Приводя различные схемы, автор не сопоставляет их с требованиями надежности электроснабжения, предъявляемыми различными потребителями. Размер и значение населенного пункта, на которых останавливается автор, конечно, влияют на выбор схем электросетей. Но ведь и в небольших населенных пунктах имеются объекты, требующие особо надежного электроснабжения. Описание схем сетей плохо увязано с их конструктивным исполнением.

Нельзя говорить о том, что радиальные сети обычно выполняются воздушными из-за большей простоты и быстроты их ремонта. Нужно сказать, наоборот, о том, что в воздушных сетях, в которых возможно быстро устранить повреждения, допускается применение радиальных схем, в то время как в кабельных сетях, где устранение повреждений занимает очень много времени, применение радиальных схем, как правило, не допускается. Вместе с тем, переходя к сетям низкого напряжения, нужно указать на то, что при выполнении горизонтальных сетей внутри домов проводами в трубах или шинопроводами

(а такие сети получают сейчас большое распространение не только в многоэтажных, но и в малоэтажных домах) становится возможным их исполнение по радиальным схемам.

Показав схему так называемых «петлевых» вводов низкого напряжения, автор неправильно оговаривает, что применение ее целесообразно только при большом количестве вводов и малом сечении кабеля. Эта схема в действительности начала широко применяться в кабельных сетях низкого напряжения большинства крупных городов и она рекомендована руководящими указаниями.

Автор применяет ряд специальных технических терминов, недостаточно поясняя их: автомат повторного включения, селективная релейная защита, селективный предохранитель и т. д.

В разделе, посвященном конструктивному выполнению сетей, имеется ряд недостатков. Рассказывая о кабелях, автор ограничивается кабелем 6 кв, ничего не говоря о кабелях 20, 35, 110 и 220 кв. Приводя описание прокладок кабелей в бетонных блоках, автор не дает описания блочной кабельной канализации из асбоцементных труб, хотя именно такой вид канализации сейчас наиболее распространен.

При описании внутренних электропроводок автор не упоминает о новейших видах скрытой проводки в керамических блоках, стеклянных трубах и т. п. Между тем сведения о новейших, надежных и недорогих способах скрытой внутренней проводки очень нужны для градостроителя и работника городского хозяйства.

При описании схем и устройства трансформаторных подстанций применение ТП с одним и двумя трансформаторами не увязывается с ранее описанными схемами сетей.

Автор ориентирует читателя на возможность сооружения временных деревянных трансформаторных подстанций и в то же время не знакомит читателей (не приводит чертежей) с комплектными передвижными трансформаторными киосками, которые освоены отечественной промышленностью и уже становятся основным источником электроснабжения строительства жилых и коммунальных объектов в городах.

Сообщая о районных подстанциях 110, 35 кв, автор не упоминает, что эти подстанции могут быть выполнены полностью закрытыми и поэтому они могут быть размещены при кабельном присоединении на любой улице города.

Говоря о встроенных в дома ТП, автор неправильно ограничивает мощность этих подстанций величиной 400 квт. Сейчас допускается сооружение встроенных в жилые дома ТП с маслонаполненными трансформаторами мощностью  $2 \times 320$  квт. Книга не знакомит читателя с новой техникой. В рассматриваемом разделе нет чертежей и описаний устройства комплектных трансформаторных подстанций с безмасляными трансформаторами, нет комплектных распределительных устройств; отсутствуют сведения об автоматике, применяемой в сетях, нет данных о высоковольтных кабелях.

Раздел эксплуатации городских электрических сетей охватывает только часть эксплуатационных вопросов, о которых необходимо знать читателю. Уделяя излишнее большое внимание учету электроэнергии, автор ничего не говорит об организации технического и коммерческого обслуживания потребителей электроэнергии, что очень важно для работников городского хозяйства.

Как было уже сказано ранее, глава IV, названная «Электрическое освещение», по значительной части своего содержания не соответствует основной теме книги. При этом уровень изложения материала скорее соответствует подготовке студента электрика (сетевика, электроснабженца, промэнергетика), но не подготовке градостроителя и работника городского хозяйства. Близкими к теме книги являются только разделы, посвященные наружному освещению городов.

Раздел «Устройство осветительных электрических сетей» изложен очень сжато и малопонятно. В этом разделе следовало бы привести две-три примерных схемы устройства внутренней электросети жилых (мало- и многоэтажных) и общественных зданий, показав не только широко распространенные схемы, но и новейшие схемы внутридомовых сетей (например, схему расщепленных стояков). Глава V «Электрооборудование коммунальных предприятий» также в большей своей части не соответствует теме книги. При этом по существу текста главы следует отме-



тить ряд существенных недостатков. Рассказывая об электрическом приводе, автор ограничивается описанием асинхронных двигателей, даже не упоминая о существовании синхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Водопровод, канализация, трамвай и троллейбус, метрополитен являются важнейшими коммунальными предприятиями городов. Между тем в главе под таким общим названием ни слова не говорится об электрооборудовании этих коммунальных предприятий. Нельзя же сводить понятие об электроснабжении коммунальных предприятий только к прачечным и ресторанам.

Если содержание глав IV и V хотя бы частично относится к теме книги, то содержание главы VI «Применение электрической энергии в быту» по существу совершенно не имеет отношения к теме книги. Эту главу, возможно, полезно было бы издать в виде самостоятельной книги, популярно рассказывающей о современных бытовых электроприборах, конечно, расширив ее содержание описанием всех видов бытовых электроприборов. В разделе о бытовых электроприборах нельзя не сказать об электроприводе для швейной машины, об электрической бритве, о кондиционировании воздуха, о комнатных вентиляторах, об электрическом аппарате для протирки оконных стекол, о питании радиоаппаратуры и т. п. Разделы главы, относящиеся к конструктивному устройству и эксплуатации элементов электропроводки должны были войти в состав предыдущих глав, посвященных устройству и эксплуатации электросетей.

В книге, посвященной электроснабжению городов, должно быть, конечно, уделено внимание электроснабжению высотных зданий. Однако эту тему нельзя излагать так, как это делает автор. Он указывает на ряд общих положений, но не говорит о схемах электроснабжения зданий. Раздел «Электрическое оборудование быстроходных и скоростных пассажирских лифтов» сугубо специфический и не соответствует теме книги. Этот раздел к тому же содержит ряд спорных и даже неверных положений.

Содержание глав VIII, X и XI, посвященных сетям слабого тока, электрокафикации, отоплению заморозенных трубопроводов и грозозащите, не имеет никакого отношения к теме книги и нами по существу не рассматривается.

Резюмируя, следует признать, что разделы книги, посвященные основной ее теме — электроснабжению городов, по размещению материала, содержанию и стилю изложения написаны неудачно. Помещение в книгу ряда глав и разделов, посвященных вопросам, не относящимся к основной ее теме, засоряет книгу. Книга не знакомит читателя с новой техникой в области электроснабжения городов, городских и внутридомовых электросетей. Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР совершило ошибку, издав книгу в нынешнем ее виде, а Министерство высшего образования СССР, — допустив ее в качестве учебника. Тема электроснабжения городов, имеющая большое значение, еще ждет своей полной разработки.

Вторая из рассматриваемых здесь книг, изданных Министерством коммунального хозяйства РСФСР, «Электрические установки жилых домов» Н. В. Волоцкого, построена правильно и охватывает почти весь круг вопросов, знание которых необходимо проектировщику. Автору этой книги удалось избежать засорения ее лишним и второстепенным материалом, что делает ее еще более понятной и удобной для пользования. Следует отметить четкость

изложения материала. В простых и убедительных выражениях, сопровождаемых такими же простыми и понятными чертежами, рисунками и таблицами, автор ориентирует проектировщиков и монтажников на правильные технические решения во всех вопросах устройства электрических установок жилых домов.

Вместе с тем следует указать и на отдельные недостатки книги. Приведенные автором графики нагрузки отдельных категорий потребителей с сылкой на работу Ленинградского инженерно-экономического института Молотова, не совсем понятны и вызывают сомнения. Не понятно, например, почему в учреждениях максимум электрической нагрузки бывает и зимой и летом в 12 дня и до 24 час имеет почти прямолинейное снижение. Ведь основным потребителем электроэнергии в учреждениях является освещение. Непонятно также, почему в жилых квартирах и общежитиях зимой имеет место рост нагрузки с 22 до 23 час. Хорошо что в книге имеется глава, знакомящая читателя с устройством городской сети внешнего электроснабжения жилых домов. Однако ряд положений, изложенных в этой главе, является спорным или просто неправильным. Поскольку содержание этой главы не является основной темой книги, мы считаем излишним вдаваться в критику отдельных ее положений, являющихся к тому же сейчас предметом оживленной дискуссии в страницах журналов.

При описании устройства трансформаторных подстанций автор не приводит конструкций подстанций применительно ко всем описанным схемам наружной распределительной сети, а приведенные конструкции нельзя признать наилучшими.

Рассказывая о встроенных подстанциях и главных распределительных щитах, автор не показывает их составной компоновки. Следовало бы дать перечень важнейших технических условий для ТП, встраиваемых в дом, и показать конструкции комплектных трансформаторных подстанций для жилых домов. Кроме того, следовало дать описание устройства кабельных вводов в дома (в ТП, в щиты, в секции).

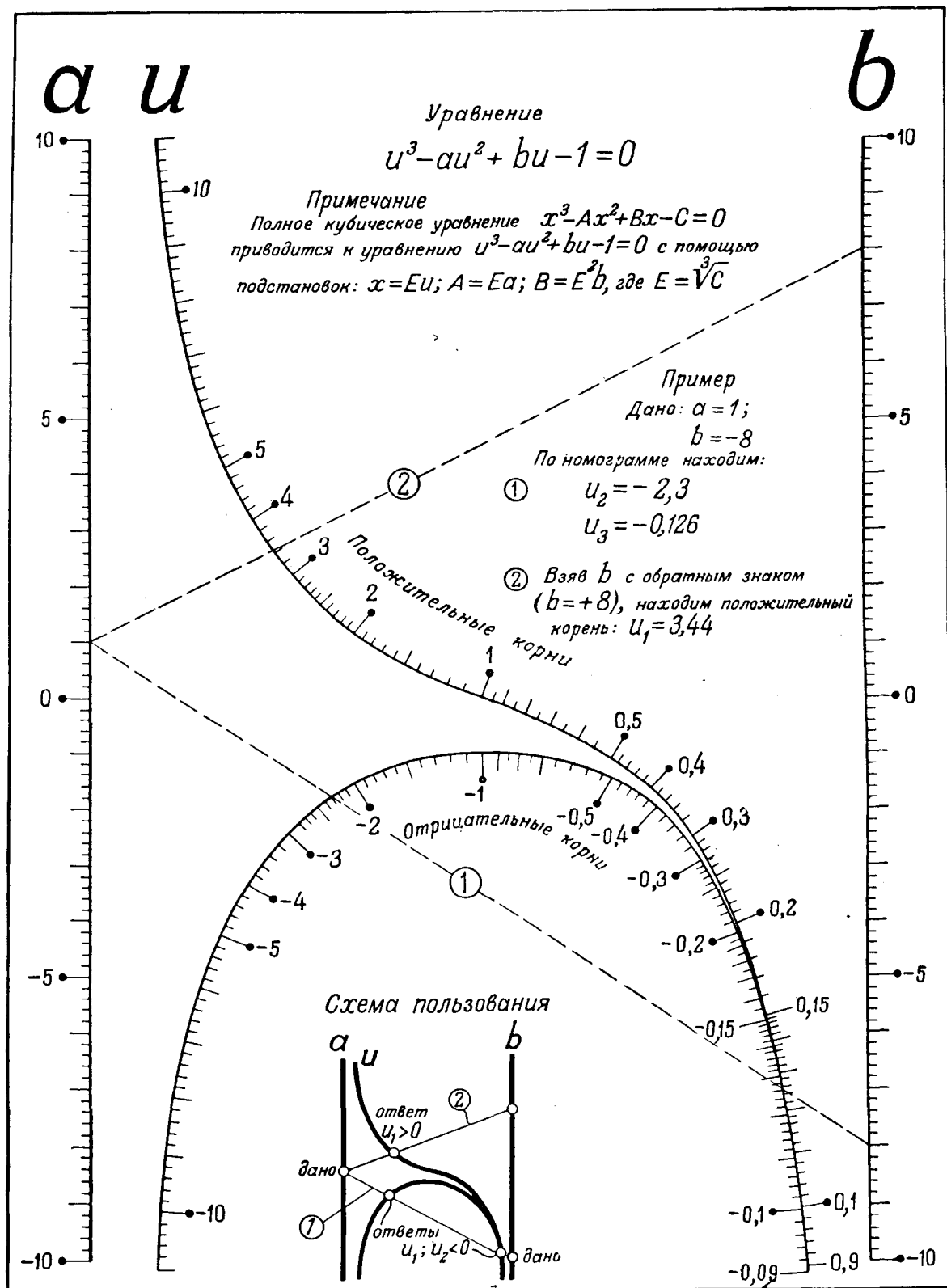
Конструкция шлейфового кабельного ввода в дом, показанная в книге, не является лучшей. В разделе, посвященном схемам устройства сетей, не рассказано о системе расщепленных стояков, начинающей внедряться в многоэтажных домах. Автор ограничился только кратким упоминанием о внедрении в жилых домах максимальных автоматов. Нужно было показать их преимущества, дать описание их конструкций и их влияния на схемы внутридомовых сетей.

Совершенно не отражен в книге вопрос перевода сетей на повышенное напряжение ( $3 \times 120$  на 220/127, 220/127 на 380/220 в), хотя такие работы проводятся во многих городах и существенно затрагивают устройство электрических установок жилых домов. Почему бы не рассказать автору о ленинградском опыте использования в качестве нулевого провода свинцовых оболочек кабелей и о московском опыте применения нейтраллеров? При описании конструкций внутридомовых сетей автор несколько отстает от фактического развития новых видов канализаций проводов (керамические блоки, стеклянные трубы).

В целом, однако, книга Н. В. Волоцкого получилась удачной.

Инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ  
инж. Э. С. ИОХВИДОВ

# НОМОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОЛНОГО КУБИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ



Составил Д. Е. Левит