

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1955

  
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

10

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Б. М. Плющ и В. О. Саркисян — Электропривод становков-качалок глубиннонасосных установок нефтяной промышленности . . . . .</b>		
<b>М. Н. Голоднов — О допустимой нагрузке при пуске синхронных двигателей с глоухо подключенным возбудителем . . . . .</b>	1	
<b>Н. В. Горохов и С. Е. Радин — О форме скоростной характеристики двигателя тепловоза . . . . .</b>	7	
<b>М. И. Земляной, А. А. Минаев и П. В. Чебышев — Экспериментальное исследование вентиляции гидрогенераторов . . . . .</b>	10	
<b>В. Б. Кулаковский — Современные методы контроля влажности изоляции . . . . .</b>	13	
<b>М. В. Хомяков — Опытные данные по оценке влажности трансформаторов . . . . .</b>	18	
<b>М. В. Костенко — Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле . . . . .</b>	24	
<b>Б. А. Ханов — Максимальное значение к. п. д. четырехполюсника . . . . .</b>	29	
<b>Н. П. Богородицкий и П. А. Муляр — Электрокерамика, стекло и органические пластические материалы . . . . .</b>	34	
<b>В. И. Калитвинский и А. В. Ковалевская — Продолжительность службы новых видов изоляции электрических машин . . . . .</b>	35	
<b>Г. С. Кучинский — Работа бумажно-масляной изоляции на переменном напряжении при наличии постоянной составляющей . . . . .</b>	40	
<b>М. Р. Найфельд и С. М. Зак — Учет сопротивлений трансформатора при определении сопротивления петли фаза — нуль . . . . .</b>	45	
<b>Б. Б. Тимофеев — Расчет режимов сосредоточенных электродов при магнитоупругих измерениях . . . . .</b>	49	
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	53	
<b>Н. В. Олехнович и В. К. Ясный — Автоматический контроль изоляции электрических установок 380 в . . . . .</b>	57	
<b>Г. К. Цверава и Е. Г. Гуревич — К вопросу о схемах управления электродвигателями . . . . .</b>	60	
<b>М. М. Некрасов и Л. А. Рахманов — Прибор для измерения напряженности электрического поля . . . . .</b>	61	
<b>СТАНДАРТЫ И НОРМЫ</b>		
<b>Л. Ш. Казарновский — Новый стандарт на листовую электротехническую сталь . . . . .</b>	63	
<b>Терминология электрических машин . . . . .</b>	66	
<b>ДИСКУССИИ</b>		
<b>Комплектные подстанции массового применения — В. А. Козлов, С. А. Кудряшов, А. А. Ермилов . . . . .</b>	68	
<b>О применении плоских металлических опор — Р. А. Голубцов . . . . .</b>	73	
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>		
<b>Применение высокочастотных каналов по линиям электропередачи и радиорелейных линий в энергосистемах. Измерение потерь холостого хода мощных трехфазных трансформаторов. Ртутные выпрямители фирмы Броун-Бовери. Влияние толщины бумаги на ионизацию кабелей высокого напряжения. Силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией . . . . .</b>	74	
<b>ХРОНИКА</b>		
<b>Диссертации Ленинградского политехнического института имени Калинина. С. О. Майзель . . . . .</b>	79	
<b>В. Н. Акимов . . . . .</b>		
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>		
<b>Ю. М. Галонен — Книга М. П. Кутыловского и В. Д. Сургучева „Электрическая тяга на городском транспорте“; Б. Т. Кузнецова „Тяговые сети трамвая и троллейбуса“ . . . . .</b>	86	
<b>В. Н. Голоушкин и А. А. Елисеев — „Павел Николаевич Яблочкин. Труды. Документы. Материалы“ . . . . .</b>	87	
<b>РЕФЕРАТИВНЫЕ КАРТОЧКИ</b>		

*В связи с исполнившимся 75-летием издания журнала «Электричество» в адрес редакции журнала поступили поздравления от организаций и читателей.*

*Редакция журнала «Электричество» выражает благодарность за поздравления.*

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

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

## Электропривод становков-качалок глубинонасосных установок нефтяной промышленности

Кандидат техн. наук, доц. Б. М. ПЛЮЩ и кандидат техн. наук, доц. В. О. САРКИСЯН  
Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова

В настоящей статье на базе точных кинематических зависимостей, полученных для четырехзвенного преобразующего механизма станка-качалки (рис. 1), решается уравнение движения электропривода, даются формулы для момента двигателя в функции угла поворота кривошипа, эффективного момента двигателя и определяются максимальные значения моментов.

Исходным является уравнение движения электропривода при переменном моменте инерции системы, зависящем от угла поворота кривошипа  $\varphi$ :

$$M_\theta - M_c = J\omega \frac{d\omega}{d\varphi} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi}. \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем все величины отнесены к угловой скорости вала кривошипа  $\omega$ .

Для установленвшегося движения момент статической нагрузки  $M_c$  и момент инерции системы  $J$  являются периодическими функциями угла поворота.

Статический момент изменяется в течение цикла (одного оборота вала кривошипа) не только из-за наличия четырехзвенного преобразующего механизма, но также и вследствие изменения действующих усилий на полированном штоке при ходе плунжера вверх и вниз. При ходе плунжера вверх на полированный шток передаются следующие статические силы: а) давление столба жидкости на плунжер; б) вес колонны штанг; в) сила трения плунжера, штанг и жидкости о стенки труб.

При ходе плунжера вниз отсутствует давление столба жидкости на него, а вес штанг уменьшается на величину веса столба жидкости в объеме штанг<sup>1</sup>.

Для выравнивания моментов, действующих на валу двигателя, применяется уравновешивание

при помощи специальных противовесов. Противовесы устанавливаются на балансире (балансирное уравновешивание), на кривошипе (роторное уравновешивание) либо часть груза помещается на балансире, а часть — на кривошипе (комбинированное уравновешивание).

Статический момент состоит из момента полезных сопротивлений и момента потерь от сил трения:  $M_c = M_{c,n} + M_t$ .

Для момента полезных сопротивлений  $M_{c,n}$ , приведенного к угловой скорости вала кривошипа, можно написать следующее выражение:

$$M_{c,n} = -\frac{v}{\omega} G_n + \frac{v}{\omega} G'_6 \cos(\hat{v}G'_6) - \\ - r(G'_p + G'_k) \sin \varphi + \frac{v}{\omega} G'_c \cos(\hat{v}G'_c), \quad (2)$$

где  $v$  — линейная скорость точки подвеса штанг, равная скорости полированного штока;

$G_n$  — статическое усилие на полированном штоке;

$G'_6$  — вес балансирного противовеса, приведенный к точке подвеса штанг;

$r$  — радиус кривошипа;

$G'_p$  и  $G'_k$  — веса роторного противовеса и кривошипа и нижних головок штанг, приведенные к радиусу кривошипа;

$G'_c$  — собственный вес возвратно движущихся частей станка-качалки без балансирного противовеса, приведенный к точке подвеса штанг.

Для становков-качалок нормального ряда максимальное значение угла ( $\hat{v}G'_6$ ) обычно не превышает  $20^\circ$ , поэтому можно принять  $\cos(\hat{v}G'_6) = \cos(\hat{v}G'_c) \approx 1$ . Момент  $M_{c,n}$  может быть представлен в виде тригонометрического ряда.

<sup>1</sup> Волновые процессы, имеющие место в штангах, трубах и жидкости, влияющие на величину усилия в полированном штоке, здесь не учитываются, так как их влияние на величину эффективного момента двигателя незначительно.

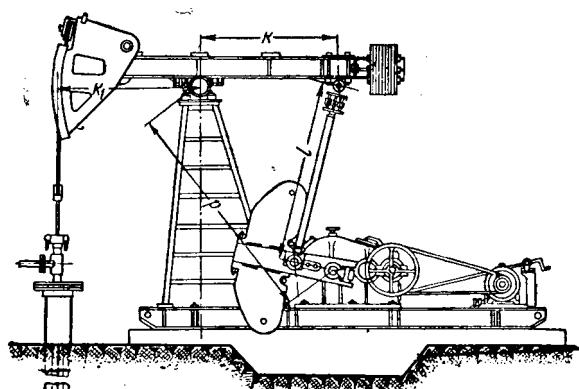


Рис. 1. Оборудование глубиннонасосной установки.

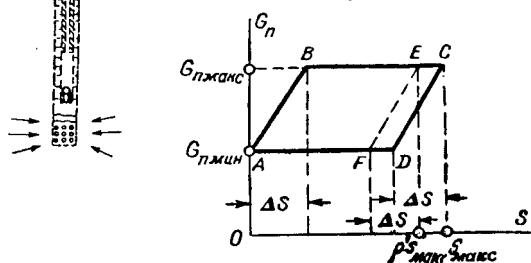


Рис. 2. Теоретическая динамограмма усилия на полированном штоке.

Выражение для скорости полированного штока в виде ряда в функции угла поворота кривошипа имеет вид<sup>2</sup>:

$$v = -0.5S_0\omega \sum_{i=1}^{\infty} (a'_i \sin i\varphi + a''_i \cos i\varphi), \quad (3)$$

где  $S_0$  — длина хода полированного штока.

Гармониками выше третьего порядка для скорости и выше четвертого — для ускорения практически можно пренебречь, так как погрешность при этом невелика (для станков-качалок нормального ряда она не превышает 1%). Зависимость перемещения полированного штока от угла поворота кривошипа определяется интегрированием, а ускорения — дифференцированием по времени уравнения (3).

Усилие на полированном штоке  $G_n$  создается суммой усилий: от веса столба жидкости  $G$ , которое переменно из-за упругости штанг и работы клапана насоса, и от веса штанг  $G'_{шт}$ . За один оборот вала кривошипа оно меняется в пределах от

$$G_{n\max} = G_{жк} + G'_{шт} \text{ до } G_{n\min} = G'_{шт},$$

где  $G_{жк}$  — результирующая сила давления жидкости на плунжер (по полной площади плунжера);

$G'_{шт}$  — вес штанг с учетом погружения в жидкость.

<sup>2</sup> Значения коэффициентов рядов в формулах (3), (6), (8), (9) и (10) приведены в Приложении 1.

Момент от усилия  $G$  может быть представлен в виде:

$$M = -\frac{v}{\omega} G = \\ = 0.5S_0G \sum_{n=1}^{\infty} (a'_n \sin n\varphi + a''_n \cos n\varphi). \quad (4)$$

Закон изменения усилия  $G_n$  в зависимости от перемещения точки подвеса штанг приведен на рис. 2. Из рисунка следует, что этот закон различен для каждого из четырех участков динамограммы:

$$\text{для 1-го участка } (AB) G = G_{жк} \frac{S}{\Delta S};$$

$$\text{для 2-го участка } (BCE) G = G_{жк} = \text{пост};$$

$$\text{для 3-го участка } (EF)$$

$$G = G_{жк} \left( 1 - \rho' \frac{S_0}{\Delta S} + \frac{S}{\Delta S} \right);$$

$$\text{для 4-го участка } (FA) G = 0,$$

где  $\Delta S$  — статическая потеря хода плунжера, равная суммарному удлинению штанг и труб;

$\rho'$  — коэффициент наполнения насоса.

Коэффициенты ряда для момента  $M$  могут быть определены по формулам разложения:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M d\varphi = \frac{G_{жк} S_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mu d\varphi = \mu_0 G_{жк} S_0;$$

$$M'_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} M \sin i\varphi d\varphi =$$

$$= \frac{G_{жк} S_0}{\pi} \int_0^{2\pi} \mu \sin i\varphi d\varphi = \mu'_i G_{жк} S_0;$$

$$M''_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} M \cos i\varphi d\varphi =$$

$$= \frac{G_{жк} S_0}{\pi} \int_0^{2\pi} \mu \cos i\varphi d\varphi = \mu''_i G_{жк} S_0,$$

где  $\mu = \frac{M}{G_{жк} S_0}$  — относительный момент.

Постоянная составляющая  $\mu_0$  относительного момента зависит от коэффициента наполнения и действительного хода плунжера и может быть просто выражена:

$$\mu_0 = \pm \frac{1}{2\pi} \left( \rho' + \frac{1}{\cos v} - 1 - \frac{\Delta S}{S} \right),$$

$$\text{где } v = \frac{\omega H}{a};$$

$a$  — скорость звука.

Здесь член  $\left( \frac{1}{\cos v} - 1 \right)$  дополнительно учитывает увеличение хода плунжера вследствие колебательных процессов в штангах согласно

формуле А. С. Вирновского. Момент же от усилия  $G_n$  будет равен:

$$\frac{v}{\omega} G_n = \frac{v}{\omega} G'_{um} + \frac{v}{\omega} G = \frac{v}{\omega} G'_{um} + M_0 + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} (M'_i \sin i\varphi + M''_i \cos i\varphi).$$

После подстановки значений  $\frac{v}{\omega}$  и  $\frac{v}{\omega} G_n$  в уравнение (2) можно получить:

$$M_{c.n} = M_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (M'_i \sin i\varphi + M''_i \cos i\varphi) + \\ + (G'_{um} - G'_6 - G'_c) 0,5S_0 \sum_{i=1}^{\infty} (a'_i \sin i\varphi + \\ + a''_i \cos i\varphi) - r(G'_p + G'_k) \sin \varphi.$$

Таким образом, суммарный статический момент

$$M_c = M_{c.n} + M_t = G_{\mu c} S_0 \sum_{i=1}^{\infty} (\mu'_0 + \mu'_i \sin i\varphi + \\ + \mu''_i \cos i\varphi) + 0,5S_0 (G'_{um} - G'_6 - G'_c) \times \\ \times \sum_{i=1}^{\infty} (a'_i \sin i\varphi + a''_i \cos i\varphi) - \\ - r(G'_p + G'_k) \sin \varphi + M_t. \quad (5)$$

Потери в глубиннонасосной установке состоят из потерь в подземном (трение плунжера, жидкости, штанг) и наземном оборудовании (преобразующем механизме и редукторе станка-качалки).

Момент потерь на трение  $M_t$  также является периодической функцией угла поворота кривошипа и может быть представлен в виде ряда

$$M_t = M_{t0} [1 + \sum_{i=1}^{\infty} (\mu'_{ti} \sin i\varphi + \mu''_{ti} \cos i\varphi)]. \quad (6)$$

Для практических режимов работы станков-качалок нормального ряда величина постоянной составляющей момента потерь не превосходит величины 15...20% постоянной составляющей момента полезных сопротивлений.

Наибольшее значение из коэффициентов ряда имеет  $\mu''_{t2}$ , который сохраняет приблизительно постоянную величину, равную около 0,65.

Все остальные коэффициенты значительно меньше и в обычных практических расчетах могут не учитываться (самый большой из них  $\mu''_{t1} \approx 0,19$ ).

Переменный момент инерции, входящий в уравнение (1),

$$J = J_0 + m \frac{v^2}{\omega^2} = J_0 + \\ + m \frac{S_0^2}{4} \left[ \sum_{i=1}^{\infty} (a'_i \sin i\varphi + a''_i \cos i\varphi) \right], \quad (7)$$

где  $J_0$  — момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу кривошипа.

Суммарная масса  $m$  поступательно движущихся частей, приведенная к скорости полированного штока, за один оборот кривошипного вала изменяется из-за периодичности движения жидкости в трубах.

Выражение (7) приводится к виду:

$$J = J_0 + \frac{S_0^2}{4} \left( \frac{G_{um}}{g} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{G'_6}{g} + \right. \\ \left. + \frac{G_{cnr}}{g} \right) \sum_{i=1}^{\infty} (e_0 + e'_i \sin i\varphi + e''_i \cos i\varphi) + \\ + z \frac{G'_{\mu c}}{g} \cdot \frac{S_0^2}{4} \sum_{i=1}^{\infty} (E_0 + E'_i \sin i\varphi + E''_i \cos i\varphi), \quad (8)$$

где  $k_1$  — расчетная длина переднего плеча балансира;

$k_2$  — длина плеча балансирного противовеса;

$\frac{G_{cnr}}{g}$  — масса возвратно движущихся частей самого станка-качалки, приведенная к скорости полированного штока;

$z$  — отношение квадрата скорости жидкости в трубе к квадрату скорости точки подвеса штанг;

$G'_{\mu c}$  — вес столба жидкости над плунжером (по кольцевому сечению).

Уравнение движения привода (1) может быть представлено в виде:

$$C \frac{dM_{\partial}}{d\varphi} + M_{\partial} = \frac{M_0 + M_{t0}}{\eta_n} + M_{txn} + \\ + \frac{1}{\eta_n} \sum_{i=1}^{\infty} [(M'_{cnl} + M'_{\partial n} + M'_{ti}) \sin i\varphi + \\ + (M''_{cnl} + M''_{\partial n} + M''_{ti}) \cos i\varphi], \quad (9)$$

где  $M_{txn}$  — момент трения в передаче при холостом ходе;

$\eta_n$  — коэффициент, учитывающий нагруженные потери в передаче от вала двигателя до вала кривошипа.

Постоянная  $C$  может быть определена, если рабочую часть механической характеристики асинхронного двигателя представить в виде параболической зависимости

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left( 1 - \frac{2s_n - s_n^2}{0,975M_{\partial n}} M_{\partial} \right);$$

тогда

$$C = \frac{1}{2} \omega_0^2 \frac{2s_n - s_n^2}{0,975M_{\partial n}} J_{cp} = \\ = \frac{1}{2} \omega_0^3 \frac{s_n (2 - s_n)(1 - s_n)}{0,975P_n} J_{cp},$$

где  $\omega_0$  — угловая скорость кривошипного вала, соответствующая синхронной скорости двигателя;

$s_n$  — номинальное скольжение двигателя;

$M_{\partial n}$  — номинальный момент двигателя, приведенный к угловой скорости вала кривошипа;

$$J_{cp} = J_0 + \frac{S_0^2}{4g} \left( G_{um} + \frac{k_2}{k_1} G'_6 + G_{cnp} \right) e_0 + \\ + z \frac{G'_{\infty}}{4g} S_0^2 E_0;$$

$P_n$  — номинальная мощность двигателя.

Уравнение (9) имеет следующее решение:

$$M_\delta = M_{\delta 0} + \sum_{i=1}^{\infty} (M'_{\delta i} \sin i\varphi + M''_{\delta i} \cos i\varphi). \quad (10)$$

Среднеквадратичный момент:

$$M_{\text{срф}} = \sqrt{M_{\delta 0}^2 + 0,5 \sum_{i=1}^{\infty} M_{\delta i}^2}. \quad (11)$$

Как показали расчеты при построении кривой момента  $M_\delta$ , достаточно ограничиться первыми четырьмя гармониками, а при определении среднеквадратичного момента (11) — первыми тремя гармониками.

Формулы (10) и (11) позволяют производить расчеты для любых нормальных и особых режимов работы глубиннонасосной установки при широком изменении параметров.

Для повседневных расчетов в промышленных условиях желательно, кроме формул (10) и (11), иметь более простую формулу, которая требовала бы незначительной затраты времени и в то же время давала бы для практики достаточно точные результаты для обычных режимов работы установки.

Для определения мощности двигателя было предложено несколько формул. Однако они либо сложны, либо не дают достаточной точности.

Наиболее простыми являются формулы:

А. Н. Ларионова

$$P_n = 2P_t + 0,28 \cdot 10^{-9} d^2 h n H \gamma [квт] \quad (12)$$

и Азэлектропрома

$$P_{\text{срф}} = K G_{\infty} S_0 n [квт], \quad (13)$$

где  $P_t$  — потери в передаче от вала двигателя до штанг,  $квт$ ;

$d$  — диаметр насоса,  $мм$ ;

$h$  — длина хода,  $мм$ ;

$H$  — длина подвески насоса,  $м$ ;

$K$  — коэффициент, величина которого зависит от к. п. д. станка-качалки (для деревянных станков-качалок  $K \approx 0,39 \cdot 10^{-3}$ ; для редукторных станков-качалок нормального ряда  $K \approx 0,22 \cdot 10^{-3}$ ).

В последнее время П. А. Ивановым была предложена также формула, дающая достаточно удовлетворительные результаты, но несколько сложная из-за некоторой трудности определения входящих в нее коэффициентов.

Формулы (12) и (13) дают удовлетворительные результаты при больших и средних диаметрах насосов и средних значениях коэффициента наполнения [коэффициенты формулы (12) даны для старых станков-качалок; для станков-качалок нормального ряда они должны быть соответственно изменены].

В настоящее время в связи с введением подвесок до 2 000 ... 2 500  $м$  стали широко применяться насосы малых диаметров. При малых диаметрах насосов и больших изменениях коэффициента наполнения формулы (12) и (13) дают уже заметные отклонения от действительных значений. На основе решения точных уравнений (10) и (11) авторами предлагается простая и в тоже время достаточно точная формула:

$$P_{\text{срф}} \approx \frac{1}{\eta_n} (K'_1 n^{1,4} + K_2 G_{\infty} S_0 n) [квт]. \quad (14a)$$

Член  $K'_1 n^{1,4}$  определяет потери в преобразующем механизме станка-качалки и холостого хода передачи. Нагрузочные потери в передаче учитываются коэффициентом  $\eta_n$ , который у современных редукторных станков-качалок с клиновидной ременной передачей может быть принят порядка 0,96 ... 0,98. Величина  $K'_1 n^{1,4}$  у современных редукторных станков-качалок невелика, и поэтому эта зависимость в пределах применяемых в настоящее время чисел качаний в минуту  $n$  без существенной погрешности может быть заменена прямолинейной. Тогда

$$P_{\text{срф}} \approx \frac{1}{\eta_n} (K_1 + K_2 G_{\infty} S_0) n [квт]. \quad (14)$$

Значения коэффициента  $K_1$  для некоторых станков-качалок нормального ряда могут быть взяты из таблицы.

Коэффициент  $K_2$  для станков-качалок нормального ряда может быть приближенно рассчитан по формуле

$$K_2 \approx 0,21 \cdot 10^{-3} \sqrt{p^2 + 0,28 \left( 1 + 0,1 \frac{S_0 n^2}{D^3} \right)^2}, \quad (15)$$

где  $p$  — коэффициент подачи насоса;

$D$  — диаметр насоса,  $см$  (при этом принято, что наименьший возможный диаметр насоса равен 28  $мм$ ).

Для работающих установок коэффициент подачи обычно известен. Он может быть также рассчитан, если известен коэффициент наполнения (в первом приближении коэффициент подачи может быть принят равным 0,9 ... 0,95 коэффициента наполнения).

Для новых насосов, а также после ремонта их коэффициент наполнения обычно принимается равным 0,85. В процессе эксплуатации насоса коэффициент наполнения уменьшается и к концу межремонтного периода может оказаться равным половине начального значения. Тем не

Станок-качалка	СКН-2-615	СКН-3-915	СКН-5-1812	СКН-10-2115	СКН-10-3012
$K_1$	0,020	0,035	0,100	0,160	0,220

менее при выборе двигателя величину коэффициента наполнения следует принимать равной 0,85, так как за межремонтный период двигатель не заменяется. Кроме того, при уменьшении коэффициента наполнения от 0,85 до 0,425 мощность двигателя уменьшается не в 2 раза, а приблизительно на 30 %. На практике часто применяются насосы диаметром 56 мм и выше. В этом случае для выбора двигателя коэффициент  $K_2$  может быть принят постоянным и приблизительно равным  $0,21 \cdot 10^{-3}$ . Проверка в промышленных условиях показала хорошее совпадение результатов расчета мощности по формуле (14) с экспериментальными данными.

Для нормального пуска станка-качалки двигатель должен иметь достаточный пусковой момент, обеспечивающий разгон при любом положении кривошипа. Надежный пуск двигателя станка-качалки приобретает особенно важное значение в связи с массовым внедрением самопуска двигателей станков-качалок.

Наибольшее значение преодолеваемого статического момента может иметь место при различных углах поворота кривошипа. Этот угол зависит от кинематики станка-качалки, способа уравновешивания и соотношения между весом столба жидкости и весом штанг (последнее при наличии роторного уравновешивания).

Максимальное значение статического момента приближенно может быть представлено в виде:

$$M_{c \max} \approx M_r + K_3 \mu'_1 G_{\infty} S_0, \quad (16)$$

Момент полезных сопротивлений  $K_3 \mu'_1 G_{\infty} S_0$  определяется коэффициентом  $K_3$  и величиной  $\mu'_1 G_{\infty} S_0$ , равной амплитуде синусоиды основной гармоники статического момента от веса столба жидкости. Значение коэффициента  $\mu'_1$  зависит главным образом от коэффициента наполнения насоса; для коэффициентов наполнения порядка 0,7 ... 0,9 при хорошем уравновешивании станка-качалки величина  $\mu'_1$  может быть принята равной в среднем 0,3. Коэффициент  $K_3$  зависит от способа уравновешивания, диаметра насоса и кинематики станка-качалки (отношения  $\frac{r}{l}$ );

$K_3$  для станков-качалок нормального ряда изменяется обычно в пределах 1 ... 2 и может быть найден из выражения для статического момента (при балансирном уравновешивании  $K_3 \approx 1$ ); большие значения  $K_3$  относятся к малым диаметрам насосов и чисто роторному уравновешиванию.

Момент трения может быть представлен в виде двух составляющих: а) момента потерь в преобразующем механизме и момента потерь в передаче при холостом ходе; б) момента нагрузочных потерь в передаче.

Первая составляющая может быть учтена коэффициентом  $K_1$ , а вторая — к. п. д.  $\eta_n$ .

С учетом изложенного максимальный статический момент

$$M_{c \max} \approx \frac{975K_1 + K_3 \mu'_1 G_{\infty} S_0}{\eta_n}. \quad (17)$$

Кратность максимального статического момента по отношению к эффективному

$$\frac{M_{c \max}}{M_{\text{эфф}}} \approx \frac{975K_1 + K_3 \mu'_1 G_{\infty} S_0}{975(K_1 + K_2 G_{\infty} S_0)}. \quad (18)$$

Подсчитанные кратности максимального статического момента для станков-качалок нормального ряда для обычно встречающихся режимов работы колеблются в пределах 1,4 ... 1,9.

Зная статический момент  $M_c$  и момент инерции  $J$  и располагая механической характеристикой двигателя, можно определить время разгона электропривода путем решения уравнения движения для периода пуска.

В первом приближении время разгона

$$t_n \approx \frac{J_{cp} \omega}{M_{\partial cp} - M_{c cp}} = 0,105 \frac{J_{cp} n}{M_{\partial cp} - M_{c cp}}, \quad (19)$$

где

$$M_{c cp} \approx \frac{975K_1 + 0,64K_3 \mu'_1 G_{\infty} S_0}{\eta_n}$$

— среднее значение момента сопротивления.

Момент инерции системы  $J_{cp}$  определяется в основном вращающимися частями (шкив редуктора и двигатель со шкивом). Время разгона, подсчитанное по этой формуле для различных режимов, обычно встречающихся на практике, при кратности пускового момента, равной двум, колеблется в следующих пределах: а) для станков-качалок СКН-3, СКН-5 — от 0,5 до 5 сек; б) для СКН-10 — от 4 до 10 сек.

Эти времена разгона могут быть допущены и, следовательно, кратность пускового момента двигателя, равную двум, можно считать удовлетворительной.

Обычно при остановке станка-качалки кривошип оказывается в низшем положении. В этом положении статический момент достигает минимальной величины, равной моменту трения установки. По мере поворота кривошипа статический момент изменяется, достигая максимальной величины. В некоторых случаях процесс разгона может закончиться до достижения максимальной величины статического момента.

Для хорошо уравновешенных станков-качалок и обычных режимов работы наибольшие значения отношения максимального в работе момента к эффективному, вычисленные по формулам (10) и (11), колеблются в пределах 1,8 ... 1,9. Обычно на практике станки-качалки имеют некоторую неуравновешенность, поэтому кратность максимального момента двигателя должна быть увеличена до 2,1 ... 2,3. Для станков-качалок СКН-3, СКН-5 и СКН-10 указанные значения, полученные опытным путем, оказались в пределах 1,71 ... 2,08.

Что касается исполнения двигателей, устанавливаемых обычно на открытом воздухе, то, как показала практика эксплуатации, они должны быть закрытыми с внешним обдувом. Защищенные двигатели, несмотря на применение специальных мер (защитные кожухи и т. п.) для работы в зимних условиях, не могут быть признаны вполне удовлетворительными.

**Приложение 1.** Значения коэффициентов при  $i$  нечетном; ряда в формуле (3):

$$a'_i = \frac{\theta'_i \cos i\psi - \theta''_i \sin i\psi}{\theta'_1 \cos \psi - \theta''_1 \sin \psi};$$

$$a''_i = \frac{\theta'_i \sin i\psi + \theta''_i \cos i\psi}{\theta'_1 \cos \psi - \theta''_1 \sin \psi},$$

где

$$\psi = \arccos \frac{k^2 - p^2 - (l+r)^2}{2p(l+r)}; \quad \theta''_i = (-1)^{i+1} \left(\frac{r}{p}\right)^i.$$

Для станков-качалок нормального ряда, у которых четырехзвенный механизм удовлетворяет условию  $p^2 + r^2 \approx k^2 + l^2$ ,

$$\theta'_1 \approx NR \left[ 1 + \frac{1}{8} B^2 + \frac{3}{64} B^4 \right];$$

$$\theta'_2 \approx R \left[ \theta''_2 + \frac{1}{4} B^2 \theta''_2 \right];$$

$$\theta'_3 \approx R \left[ \theta''_3 + \frac{1}{8} B^2 (N + 2\theta''_3) + \frac{9}{128} B^4 (N + 2\theta''_3) \right];$$

$$\theta'_4 \approx R \left[ \theta''_4 + \frac{1}{8} B^2 (\theta''_2 + 2\theta''_4) \right];$$

$$\theta'_5 \approx R \left[ \theta''_5 + \frac{1}{8} B^2 \theta''_3 + \frac{3}{128} B^4 N + \frac{25}{1024} B^6 N \right],$$

где

$$N = \left( 1 + \frac{p^2}{l^2 - k^2} \right) \frac{r}{p}; \quad R = 0,5 \frac{l^2 - k^2}{kl}; \quad B = \frac{pr}{kl}.$$

Значения коэффициентов ряда в формуле (6):

$$\mu'_{T1} \approx \pm 0,785 R_1; \quad \mu'_{T2} \approx 1,33 - 0,8 a''_3;$$

$$\mu'_{T3} = 0; \quad \mu''_{T1} \approx 1,33 a'_2; \quad \mu''_{T2} = -0,67 + 1,2 a'_3;$$

$$\mu''_{T3} \approx -0,8 a'_2; \quad \mu''_{T4} \approx -0,13 - 0,86 a'_3;$$

$$R_1 = \frac{F_{T\theta} - F_{T\kappa}}{F_{T\theta} + F_{T\kappa}},$$

где  $F_{T\theta}$ ,  $F_{T\kappa}$  — силы трения, приведенные к полированному штоку, при ходе вверх и вниз.

Положительный знак в выражении для  $\mu'_{T1}$  относится к левому вращению, отрицательный — к правому.

Значения коэффициентов ряда в формуле (8):

$$e_0 \approx \frac{1}{2} (1 + a'^2); \quad e'_1 \approx a'_1 (a''_1 - a''_3) - a''_2;$$

$$e'_2 \approx a''_1 - a''_3; \quad e'_3 \approx a'_2 a''_1 + a''_2 - a''_4;$$

$$e'_4 \approx a''_3; \quad e''_1 \approx a'_2 (1 + a'_3); \quad e''_2 \approx a'_3 - 0,5;$$

$$e''_3 \approx a'_4 - a'_2; \quad e''_4 \approx -(a'_3 + 0,5 a'^2_2);$$

$$E_0 = \frac{1}{2} e_0 \pm \frac{1}{\pi} (e'_1 + \frac{1}{3} e'_3 + \frac{1}{5} e'_5);$$

$$E'_i = \frac{1}{2} e'_i \pm \frac{2}{\pi} \left( \frac{i}{i^2 - 1} e''_1 + \frac{i}{i^2 - 9} e''_3 + \frac{i}{i^2 - 25} e''_5 \right)$$

при  $i$  четном;

$$E''_i = \frac{1}{2} e''_i \pm \frac{2}{\pi} \left( \frac{2}{4 - i^2} e'_2 + \frac{4}{16 - i^2} e'_4 \right)$$

при  $i$  нечетном;

$$E''_i = \frac{1}{2} e''_i \pm \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{1 - i^2} e'_1 + \frac{3}{9 - i^2} e'_3 + \frac{5}{25 - i^2} e'_5 \right)$$

при  $i$  четном.

Значения коэффициентов ряда в формуле (9):

$$M'_{\partial\text{ин}i} = 0,28 \cdot 10^{-3} \times \\ \times [(G_{um} + \frac{k_2}{k_1} G'_6 + G_{cn} p) b'_i + z G'_{\infty} B'_i] S_0^2 n^2;$$

$$M''_{\partial\text{ин}i} = 0,28 \cdot 10^{-3} \times \\ \times [(G_{um} + \frac{k_2}{k_1} G'_6 + G_{cn} p) b''_i + z G'_{\infty} B''_i] S_0^2 n^2,$$

$$\text{где } b'_i = -0,5 i e'_i; \quad B'_i = -0,5 i E'_i; \\ b''_i = 0,5 i e'_i; \quad B''_i = 0,5 i E'_i$$

Значения коэффициентов ряда в формуле (10):

$$M_{\partial 0} = \frac{M_0 + M_{T0}}{\eta_n} + M_{Txn}; \\ M'_{\partial i} = \frac{1}{\eta_n} \times \\ \times \frac{M'_{cn} + M'_{\partial\text{ин}i} + M'_{Ti} + iC (M''_{cn} + M''_{\partial\text{ин}i} + M''_{Ti})}{1 + (iC)^2}; \\ M''_{\partial i} = \frac{1}{\eta_n} \times \\ \times \frac{M''_{cn} + M''_{\partial\text{ин}i} + M''_{Ti} - iC (M'_{cn} + M'_{\partial\text{ин}i} + M'_{Ti})}{1 + (iC)^2}.$$

**Приложение 2.** Определение эффективной мощности двигателя станка-качалки СКН-10-3012 по формуле (14).

Длина подвески  $H = 1540$  м; высоту подачи примем приближенно равной длине подвески; длина хода  $S_0 = 3$  м; число качаний в минуту  $n = 8,45$ ; диаметр насоса  $D = 3,2$  см; удельный вес жидкости  $\gamma = 0,887$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент подачи  $\rho = 0,81$ ; согласно таблице  $K_1 = 0,22$ .

$$K_2 = 0,21 \cdot 10^{-3} \sqrt{0,81^2 + 0,28 \left( 1 + 0,1 \frac{3 \cdot 8,45^2}{3,2^3} \right)} = \\ = 0,25 \cdot 10^{-3};$$

$$G_{\infty} = \frac{\pi}{4} 3,2 \cdot 1,540 \cdot 0,887 \cdot 10^{-1} = 1,095 \text{ кг};$$

$$P_{\text{зф}} = (0,22 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,095 \cdot 3) \frac{8,45}{0,98} = 8,97 \text{ квт.}$$

Определенная экспериментальным путем мощность для данной установки оказалась равной 8,2 квт. Совпадение достаточно хорошее, если учесть, что высота подачи принята приближенно.



# О допустимой нагрузке при пуске синхронных двигателей с глохом подключенным возбудителем

Кандидат техн. наук, доц. М. Н. ГОЛОДНОВ

Ростов-на-Дону

Уравнение среднего асинхронного момента синхронного двигателя при отсутствии возбуждения может быть представлено в виде суммы трех составляющих [Л. 1]:

$$M = M' + M_d'' + M_q, \quad (1)$$

где

$$M' = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_d'}{x_d x_d'} \cdot \frac{sT_d'}{1 + (sT_d')^2}; \quad (2)$$

$$M_d'' = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d' - x_d''}{x_d' x_d''} \cdot \frac{sT_d''}{1 + (sT_d'')^2}; \quad (3)$$

$$M_q = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x_q''}{x_q x_q''} \cdot \frac{sT_q''}{1 + (sT_q'')^2}. \quad (4)$$

Каждая из этих составляющих имеет максимум при критических значениях скольжения:

$$s_m' = \frac{1}{T_d'}; \quad s_{md}'' = \frac{1}{T_d''}; \quad s_{mq} = \frac{1}{T_q''}.$$

Здесь  $U$  — напряжение сети;

$x_d$  и  $x_q$  — синхронные реактивные сопротивления по продольной и поперечной осям;

$x_d'$  — переходное реактивное сопротивление по продольной оси;

$x_d''$  и  $x_q''$  — сверхпереходные реактивные сопротивления по продольной и поперечной осям;

$T_d'$  — переходная постоянная времени по продольной оси при закороченной обмотке статора;

$T_d''$  и  $T_q''$  — сверхпереходные постоянные времени по продольной и поперечной осям при закороченной обмотке статора;

$s$  — скольжение.

Все величины взяты в относительных единицах, причем за единицу времени принят электрический радиан времени, равный  $\frac{1}{314}$  сек (при  $f = 50$  гц).

Величины  $T_d'$  и  $T_d''$  могут быть определены экспериментально при замкнутой цепи статора либо рассчитаны приближенно по формулам

$$T_d' \approx T_f + T_{nd} \text{ и } T_d'' \approx \frac{\sigma_{fn} T_f T_{nd}}{T_f + T_{nd}},$$

где  $T_f$  — постоянная времени цепи возбуждения;

$T_{nd}$  — постоянная времени пусковой клетки по продольной оси;

$\sigma_{fn}$  — коэффициент рассеяния между обмоткой возбуждения и пусковой обмоткой.

Для явнополюсных двигателей обычной конструкции  $T_f \gg T_{nd}$ ; тогда  $T_d' \approx T_f$ ;  $T_d'' \approx \sigma_{fn} T_{nd} \approx T_{nd}$ , так как коэффициент  $\sigma_{fn}$  обычно близок к единице.

Следовательно, для явнополюсных синхронных двигателей, у которых  $T_f \gg T_{nd}$ , характер зависимости первой составляющей асинхронного момента  $M'$  от скольжения определяется исключительно постоянной времени цепи возбуждения  $T_f$ , а характер зависимости скольжения второй ( $M_d''$ ) и третьей ( $M_q$ ) составляющих — в основном параметрами пусковой клетки и не зависит от постоянной  $T_f$ .

При переходе от „нормальной“ схемы пуска с обмоткой возбуждения, замкнутой на разрядное сопротивление, к „упрощенной“ с глохом подключенным возбудителем активное сопротивление цепи возбуждения уменьшается на величину разрядного сопротивления, а реактивное сопротивление цепи возбуждения практически не изменяется. Практически также не изменяются параметры цепи статора и пусковой клетки ротора. При отсутствии форсировки возбуждения и рабочем положении реостата возбуждения э. д. с. возбудителя обычно начинает нарастать лишь по достижении полусинхронной скорости и преждевременно достигает заметной величины только при особо затяжных пусках. Тормозящий момент, возникающий вследствие наличия постоянного тока в цепи возбуждения, может быть подсчитан по формуле

$$M_f = -I_a^2 \left( \frac{x_{afd}}{x_d} \right)^2 \frac{r}{1-s},$$

где  $I_a$  — ток в обмотке возбуждения, приведенный к статору;

$x_{afd}$  — реактивное сопротивление рассеяния цепи возбуждения;

$r$  — активное сопротивление цепи статора.

По сравнению с асинхронным моментом он невелик, так как активное сопротивление цепи статора  $r$  мало и лишь в отдельных случаях (например, при большом активном сопротивлении линии, питающей двигатель) может оказывать заметное влияние на процесс синхронизации.

Это подтверждается как расчетами, так и многочисленными опытами на установках в различных отраслях промышленности.

Таким образом, при переходе на пуск с глохом подключенным возбудителем у явнополюсных двигателей практически изменяется лишь первая составляющая  $M'$  асинхронного момента и разница между характеристиками момента при нормальном и упрощенном пуске есть не что иное, как разница соответствующих характеристик первой составляющей асинхронного момента:

$$\Delta M = M_{\text{норм}} - M_{\text{упр}} \approx M'_{\text{норм}} - M'_{\text{упр}}.$$

Указанное обстоятельство позволяет судить о применимости пуска с глохом подключенным

возбудителем даже в случае отсутствия данных для расчета по уравнениям (3) и (4), используя лишь уравнение (2).

**Пример 1.** Двигатель СМ-300-750 217 квт, 6 кв, по данным завода-изготовителя, имеет [Л. 2]:

$$x_a = 0,0926; x_{ad} = 1,425; x_d' = 0,208; T_f = 0,206 \text{ сек};$$

$T_{nd} = 0,00226$  сек; пусковой момент (при нормальном пуске с разрядным сопротивлением)  $M_{n\text{уск}} = 2,8$ ; входной момент (момент при скольжении  $s = 0,05$ )  $M_{sx} = 0,90$ .

Находим:

$$x_d = x_a + x_{ad} = 1,518; T_f = 0,206 \cdot 314 = 64,8; T_{nd} = 0,71.$$

При нормальном пуске с 10-кратным разрядным сопротивлением  $R = 10r_f$  постоянная времени обмотки возбуждения уменьшается примерно в 11 раз:

$$T_{f\text{норм}} = \frac{r_f}{r_f + R} T_f = 5,89;$$

отсюда  $T_{d\text{норм}}' \approx 5,89 + 0,71 = 6,6$ .

$$\text{При упрощенном пуске } T_d' \approx 64,8 + 0,71 = 65,5.$$

Подставляя полученные данные в уравнение (2), находим значения первой ( $M'$ ) составляющей асинхронного момента при различных значениях скольжения для нормального и упрощенного пусков, а также изменение асинхронного момента при переходе на упрощенный пуск как разницу  $M'_{upr} - M'_{норм}$ .

Результаты расчета приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Данные завода „Электросила“ [Л. 2] позволяют произвести примерный расчет характеристик синхронных двигателей серии СМ, что представляет большой интерес с точки зрения оценки значения каждой из трех составляющих асинхронного момента. Эти данные достаточны для расчета первых двух составляющих по уравнениям (2) и (3), а также дают два значения асинхронного момента при нормальном пуске: пусковой (при  $s = 1,0$ ) и входной (при  $s = 0,05$ ). Если из этих значений асинхронного момента вычесть соответствующие значения первой  $M'$

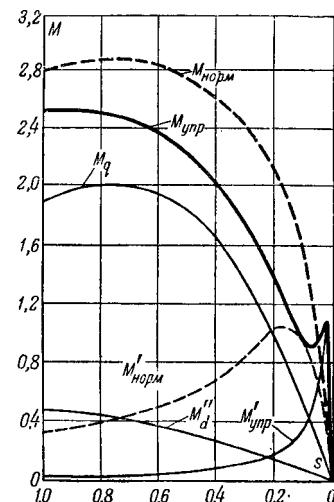


Рис. 1. Расчетные характеристики двигателя СМ-300-750 217 квт, 6 кв.

и второй  $M''_d$  составляющих, то можно получить значение третьей составляющей:

при  $s = 1$

$$M_{qn} = M_{n\text{уск}} - M'_{s=1} - M''_{d(s=1)}; \quad (5)$$

при  $s = 0,05$

$$M_{q\text{sx}} = M_{sx} - M'_{(s=0,05)} - M''_{d(s=0,05)}. \quad (6)$$

Зная две точки характеристики  $M_q = f(s)$ , можно найти постоянную времени:

$$T_q'' = \sqrt{\frac{20M_{q\text{sx}} - M_{qn}}{M_{qn} - 0,05M_{q\text{sx}}}} \quad (7)$$

и рассчитать третью составляющую асинхронного момента:

$$M_q = M_{qn} \frac{(1 + T_q'')^2 s}{1 + (sT_q'')^2}. \quad (8)$$

Таблица 1

Изменение асинхронного момента двигателя СМ-300-750 217 квт, 6 кв при переходе на упрощенный пуск

Скольжение, %	100	60	20	10	5	1,52
Значение первой составляющей асинхронного момента при упрощенном пуске ( $M'_{upr}$ ) . . . . .	0,03	0,05	0,06	0,32	0,69	1,04
То же при нормальном пуске ( $M'_{норм}$ ) . . . . .	0,31	0,50	1,03	0,95	0,62	0,21
Изменение асинхронного момента при переходе на упрощенный пуск ( $M_{upr} - M'_{норм}$ ) . . . . .	-0,28	-0,45	-0,97	-0,63	0,07	0,83
Асинхронные моменты ( $M = M' + M''_d + M_q$ ) пусковой и входной при нормальном пуске по данным завода . . . . .	2,80	—	—	—	0,90	—
То же, полученные при расчете упрощенного пуска . . . . .	2,52	—	—	—	0,97	—

Таблица 2

## Приближенный расчет характеристик двигателя СМ-160-500 113 квт, 380 в

Скольжение, %	100	60	20	10	5	2
Первая составляющая асинхронного момента при нормальном пуске ( $M'_{норм}$ )	0,28	0,44	0,73	0,58	0,34	0,14
Вторая составляющая асинхронного момента ( $M''_d$ ) . . . . .	0,11	0,07	0,02	0,01	0,005	—
Третья составляющая асинхронного момента ( $M_q$ ) . . . . .	1,31	1,57	1,06	0,58	0,30	0,12
Асинхронный момент при нормальном пуске ( $M_{норм} = M'_{норм} + M''_d + M_q$ ) . .	1,70	2,08	1,81	1,17	0,64	0,26
Первая составляющая асинхронного момента при упрощенном пуске ( $M'_{упр}$ ) . . . . .	0,03	0,04	0,14	0,26	0,47	0,72
Асинхронный момент при упрощенном пуске ( $M_{упр} = M'_{упр} + M''_d + M_q$ ) . .	1,45	1,68	1,22	0,85	0,77	0,84

Построив все три характеристики асинхронного момента, можно найти асинхронный момент при нормальном и упрощенном пусках:

$$M_{норм} = M'_{норм} + M''_d + M_q;$$

$$M_{упр} = M'_{упр} + M''_d + M_q.$$

Пример 2. Двигатель СМ-160-500 113 квт, 380 в, по данным завода-изготовителя, имеет [Л. 2]:

$$x_s = 0,15; x_{ad} = 1,31; x'_d = 0,28; x''_d = 0,204;$$

$$T_f = 0,169 \text{ сек}; T_{nd} = 0,000523 \text{ сек}; M_{пуск} = 1,7;$$

$$M_{bx} = 0,64^*.$$

Находим:

$$x_d = x_s + x_{ad} = 1,46; T_f = 0,169 \cdot 314 = 53; T_{nd} = 0,164;$$

$$T'_d = 53 + 0,164 = 53,16 \approx T_f; T''_d \approx T_{nd} = 0,164.$$

При нормальном пуске с 10-кратным разрядным сопротивлением постоянные времени равны:

$$T_{f\text{ норм}} = \frac{T_f}{11} = 4,82; T'_{d\text{ норм}} \approx 4,82 + 0,164 = 4,98;$$

$$T''_{d\text{ норм}} \approx \frac{0,164 \cdot 4,82}{4,82 + 0,164} = 0,159 \approx 0,16 \approx T''_d.$$

Составляющие асинхронного момента при номинальном напряжении:

$$M'_{норм} = \frac{1,46 - 0,28}{2 \cdot 1,46 \cdot 0,28} \cdot \frac{4,98}{1 + (4,98 s)^2};$$

$$M''_d = \frac{0,28 - 0,204}{2 \cdot 0,28 \cdot 0,204} \cdot \frac{0,16 s}{1 + (0,16 s)^2}.$$

При  $s = 1$

$$M'_{(s=1)} = 0,28; M''_{d(s=1)} = 0,11;$$

$$M_{qн} = 1,7 - 0,28 - 0,11 = 1,31.$$

Аналогичным образом при  $s = 0,05$  определяем составляющую асинхронного момента  $M_{q\text{ вх}} = 0,30$ . Далее, по

уравнениям (7) и (8) рассчитываем постоянную времени  $T''_q = 1,84$  и третью составляющую асинхронного момента  $M_q$ ; асинхронный момент при нормальном пуске определяется как сумма всех трех составляющих.

Асинхронный момент при упрощенном пуске получаем путем замены  $M'_{норм}$  на  $M'_{упр}$ :

$$M'_{упр} = \frac{1,46 - 0,28}{2 \cdot 1,46 \cdot 0,28} \cdot \frac{53 s}{1 + (53 s)^2}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Кривые, приведенные на рис. 1 и 2, дают приближенные значения асинхронного момента, так как при расчетах третьей составляющей  $M_q$  в качестве исходных величин используются значения пускового и входного моментов, даваемые заводами-изготовителями с известной долей приближения, а также не учитываются изменения активного сопротивления и индуктивности пускового контура в процессе пуска. В действительности

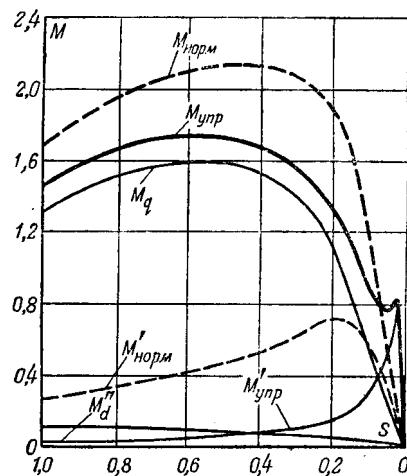


Рис. 2. Расчетные характеристики двигателя СМ-160-500 113 квт, 380 в.

\*  $M_{пуск}$  и  $M_{bx}$  даны при нормальном пуске с 10-кратным разрядным сопротивлением.

сти характеристики асинхронного момента являются несколько более благоприятными для упрощенного пуска: провал кривой момента выражен менее ярко и разница между кривыми асинхронного момента при нормальном и упрощенном пусках несколько меньше, чем показано на рис. 1 и 2.

Однако точность этих кривых достаточна для оценки значения допустимого при пуске момента сопротивления, обусловленного нагрузкой.

**Выводы.** 1. Характеристика асинхронного момента при упрощенном пуске проходит в основной части ниже характеристики при нормальном пуске, вследствие чего разбег при пуске с глохом подключенным возбудителем происходит несколько медленнее. При малых скольжениях момент при упрощенной схеме пуска значительно больше момента при нормальной схеме, обеспечивая выход двигателя в область весьма малых скольжений (порядка долей процента) и весьма плавное втягивание в синхронизм.

2. Некоторые явнополюсные двигатели при пуске по упрощенной схеме имеют провал характеристики асинхронного момента в области скольжений  $s = 0,02 \dots 0,08$ , ограничивающий допустимую при пуске нагрузку. Для двигателей серии СМ минимальное значение момента в этом провале мало отличается от значения асинхронного момента при  $s = 0,05$ . Поэтому для предварительного выбора этих двигателей можно ограничиться подсчетом момента  $M_{upr}$  при  $s = 0,05$ , как это сделано в табл. 1.

3. Для окончательного суждения об условиях упрощенного пуска и втягивания в синхронизм под нагрузкой требуется знать кривую асинхронного момента. При этом практически достаточным оказывается расчет кривой в пределах от  $s = 0$  до  $s = 0,2$ . Этот расчет прово-

дится аналогично приведенному в табл. 2. В пределах от  $s = 0$  до  $s = s'_m = \frac{1}{T'_d}$  асинхронный момент при упрощенном пуске практически равен  $(1,1 \dots 1,2) M'_{upr}$ , так как составляющая  $M''_d$  ничтожна, а  $M_q$  обычно не превышает  $0,2 M'_{upr}$ . Поэтому в ряде случаев (например, для проверки возможности ресинхронизации при глухо подключенном возбудителе) расчет характеристики асинхронного момента на участке от  $s = 0$  до  $s = \frac{1}{T'_d}$  может быть сведен к расчету первой составляющей момента по уравнению (2).

4. Действующие циркуляры МЭС № 7/Э 1952 г. и № Э-5/54 1954 г. допускают пуск с глухо подключенным возбудителем при моменте сопротивления не выше 0,4 номинального без проведения соответствующих испытаний. В действительности многие синхронные двигатели допускают пуск при значительно большей нагрузке. Поэтому представляется целесообразным производить проверку возможности пуска синхронных двигателей с моментом сопротивления, превышающим 0,4 номинального, не только опытным, но и расчетным путем по рассмотренной методике.

Возможность в ряде случаев повышения нагрузки при пуске двигателя с глухо подключенным возбудителем подтверждается также опытами, произведенными как автором, так и рядом организаций (ЦНИЭЛ МЭС и др.).

#### Литература

1. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергонзат, 1952.
2. Информационные листы завода „Электросила“ № 46, 1949 и № 55, 1950.

[29. 11. 1954]



## О форме скоростной характеристики двигателя тепловоза

Доктор техн. наук, проф. Н. В. ГОРОХОВ и инж. С. Е. РАДИН

Москва

Желательная тяговая характеристика тепловоза определяется условием использования полной мощности дизель-генератора тепловоза в заданном диапазоне изменения скорости поезда и по форме близка к гиперболе. Получение такой характеристики только путем регулирования напряжения генератора требует значительного диапазона его изменения и связано с увеличением габаритов генератора.

С целью уменьшения диапазона регулирования напряжения генератора обычно используется возможность изменения скорости тягового двигателя путем применения схем ступенчатого и плавного ослабления поля двигателя.

К схемам ступенчатого регулирования относится широко распространенная схема шунтиро-

вания обмоток возбуждения двигателя последовательного возбуждения добавочными сопротивлениями.

На рис. 1,а приведены скоростные характеристики двигателя при условии  $P = \text{пост}$  для полного и ослабленного поля<sup>1</sup>.

С увеличением числа ступеней ослабления поля в заданном диапазоне изменения скоростей тепловая нагрузка двигателя и генератора будет более благоприятной. Это ясно из сопоставления средних и максимальных величин токов в зоне рабочих скоростей тепловоза и заданном диапа-

<sup>1</sup> Скоростные характеристики построены с учетом влияния реакции якоря. Все построения выполнены для двигателя ДК-304 тепловоза ТЭ-2.

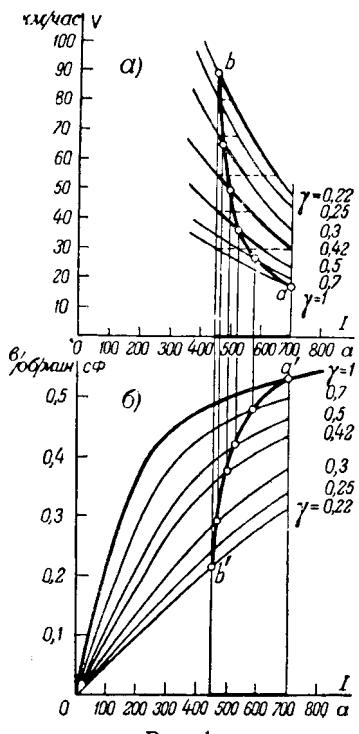


Рис. 1.

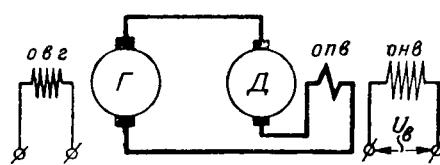


Рис. 2.

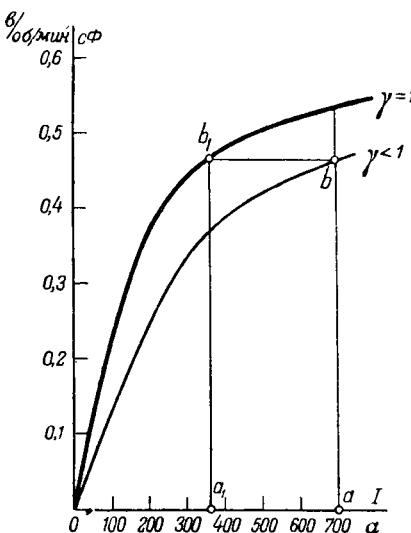


Рис. 3.

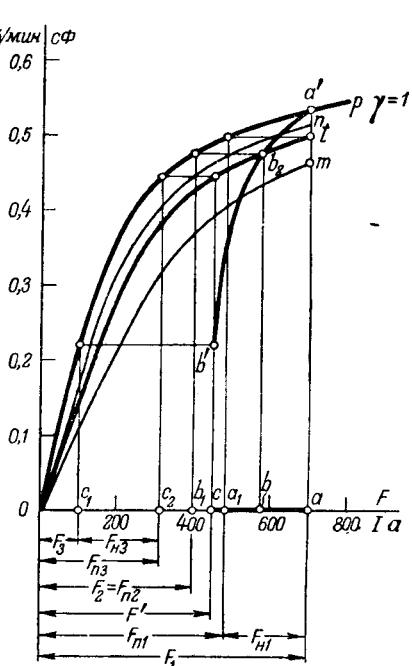


Рис. 4.

зоне изменения тока якоря двигателя<sup>2</sup>, например, для двух и пяти ступеней на рис. 1, а. При дальнейшем увеличении числа ступеней можно получить предельную скоростную характеристику *ab*, обеспечивающую оптимальные условия по нагреву генератора и двигателя. Получение такой оптимальной характеристики, практически невыполнимой при ступенчатом регулировании, является весьма желательным. В качестве одной из возможных схем плавного электромашинного регулирования возбуждения тягового двигателя, принципиально решающих эту задачу, является схема на рис. 2. В данном случае двигатель, кроме обмотки последовательного возбуждения (*опв*), имеет еще дополнительную обмотку независимого возбуждения (*онв*), которая питается от постороннего источника тока. Напряжение постороннего источника тока, питающего обмотку *онв*, должно изменяться по закону, при котором совместное действие обеих обмоток обеспечивает получение желательной скоростной характеристики двигателя.

Чтобы получить оптимальную скоростную характеристику, необходимо:

а) на основании заданной (оптимальной) скоростной характеристики построить зависимость напряжения на обмотке независимого возбуждения *онв* от тока якоря двигателя;

б) определить наиболее рациональное соотношение н. с. обмоток последовательного и независимого возбуждения двигателя;

в) выбрать принципиальную схему возбудителя двигателя.

Для решения первых двух пунктов поставленной задачи необходимо иметь кривые зависимости  $c\Phi=f(I)$  для различных коэффициентов ослабления поля.

Располагая кривой намагничивания машины для полного поля, нетрудно построить зависимость  $c\Phi=f(I)$  для любой величины коэффициента ослабления поля (рис. 3). Для этого по заданному току якоря, например  $I=\bar{O}a$ , находится ток в последовательной обмотке  $I_0=\gamma I$ , где  $\gamma < 1$  — коэффициент ослабления поля. По значению тока  $I_0=\gamma I=\bar{O}a_1$  определяется соответствующий ему поток  $c\Phi=a_1b_1$ , откладываемый на ординате, проведенной из точки *a*. Точка *b* вместе с остальными точками, полученными аналогичным образом, соединяется плавной кривой *Ob*, представляющей зависимость  $c\Phi=f(I)$  при заданном коэффициенте  $\gamma$ .

На рис. 1, б приведены построенные этим методом кривые  $c\Phi=f(I)$ , соответствующие значениям  $\gamma$  скоростных характеристик рис. 1, а.

На рис. 1 также показан способ построения зависимости  $c\Phi=f(I)$  (кривая *a'b'*), отвечающей заданной скоростной характеристике  $v=f(I)$  (кривой *ab*). Для получения кривой *a'b'* необходимо снести точки пересечения заданной скоростной характеристики со скоростными характеристиками при полном и ослабленном поле двигателя на соответствующие характеристики  $c\Phi=f(I)$ .

Полученная кривая *a'b'* дает возможность установить наиболее рациональное соотношение н. с. обмоток *опв* и *онв* двигателя.

<sup>2</sup> Принятый диапазон изменения тока якоря  $I_{\max}$ ... $I_{\min}$  определяется минимальным значением коэффициента регулирования напряжения генератора  $k_g = 1,5 \dots 1,6$ .

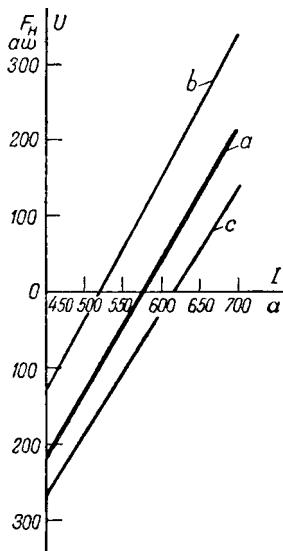


Рис. 5.

Покажем, как решается эта задача. На рис. 4 приведены характеристики  $c\Phi = f(I)$  двигателя: кривая  $Op$  при  $\gamma=1$ ; кривая  $a'b'$ , отвечающая заданной скоростной характеристике, и кривая  $Ot$  при наличии только одной обмотки последовательного возбуждения и при условии, что при токе якоря двигателя  $I=Oa$ , равном номинальному значению, н. с. этой обмотки составляет  $k$ -тую долю номинальной н. с.

Из рассмотрения рис. 4 видно, что для тока  $I=Oa$  суммарная н. с. равна  $F_1=\overline{Oa}$ ; н. с. последовательной обмотки и обмотки независимого возбуждения соответственно равны:

$$F_{n1} = \overline{Oa}_1 \text{ и } F_{n2} = F - F_{n1} = \overline{Oa} - \overline{Oa}_1 = \overline{a}_1 a.$$

Для тока  $I=\overline{Ob}$  можно получить:

$$F_2 = F_{n2} = \overline{Ob}_1; F_{n2} = 0;$$

для тока  $I=\overline{Oc}$ :

$$F_3 = \overline{Oc}_1; F_{n3} = \overline{Oc}_2; F_{n3} = \overline{Oc}_1 - \overline{Oc}_2 = -\overline{c}_1 c_2,$$

причем в последнем случае н. с.  $F_{n3}$  должна действовать навстречу н. с.  $F_{n2}$ .

Таким образом, на основании полученной зависимости  $c\Phi = f(I)$  для заданной скоростной характеристики и кривой намагничивания можно определить суммарную н. с. обмоток возбуждения двигателя. Следует отметить, если скоростные характеристики при полном и ослабленном поле построены без учета реакции якоря, то н. с. обмотки возбуждения будет меньше на величину н. с. реакции якоря двигателя.

Определив величины н. с. обмотки независимого возбуждения для ряда промежуточных точек кривой  $a'b'$ , можно построить кривую изменения н. с. этой обмотки в функции тока якоря двигателя (кривая  $a$  на рис. 5).

Так как напряжение на зажимах возбудителя

$$U_s = i_s r_s = \frac{F_n}{w_n} \cdot r_s,$$

где  $r_s$ ,  $w_n$  — сопротивление и число витков обмотки  $onv$ ,

то эта же кривая характеризует зависимость напряжения на зажимах обмотки  $onv$ , необходимого для получения заданной скоростной характеристики.

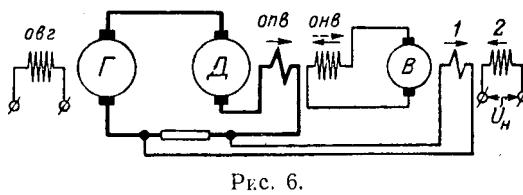


Рис. 6.

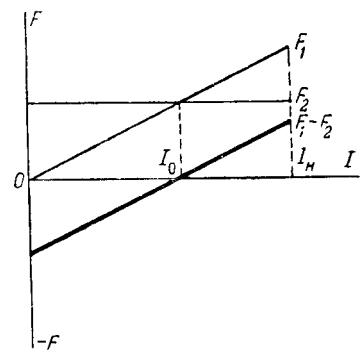


Рис. 7.

На рис. 4 также построены кривые  $On$  и  $Ot$  для значений  $k$ , отличных от ранее выбранного. На рис. 5 изображены соответствующие им кривые  $b$  и  $c$ .

Из рассмотрения кривых на рис. 5 следует, что напряжение возбудителя в процессе регулирования при изменении тока якоря двигателя должно изменяться как по величине, так и по знаку. Наиболее рациональным с точки зрения выбора мощности возбудителя является случай, когда напряжение его в крайних точках заданного диапазона изменения тока якоря двигателя будет одинаково по своей абсолютной величине (кривая  $a$  на рис. 5). Поэтому выбор величины н. с. обмотки  $onv$  при номинальном режиме не является произвольным.

Величина  $k$ , характеризующая оптимальное соотношение н. с. обмоток возбуждения двигателя при номинальном режиме, определяется следующим образом.

Максимальное и минимальное значения н. с. на концах заданного диапазона изменения тока якоря двигателя  $\Delta = ca$  для кривой  $a'b'$  на рис. 4 равны:

$$F_{\max} = F_1 = F_{n1} + F_{n2}; F_{\min} = F_3 = F_{n3} - F_{n2},$$

Для получения кривой  $a$  на рис. 5 необходимо, чтобы н. с. обмотки  $onv$  на концах заданного диапазона изменения тока были равны:

$$F_{n1} = F_{n2} = F_n.$$

Отсюда

$$F_{\max} - F_{n1} = F_{n3} - F_{\min},$$

где

$$F_{n1} = kF_{\max}; F_{n3} = kF',$$

$F'$  — н. с. двигателя при полном поле возбуждения в точке  $c$ . Из равенства

$$F_{\max} - kF_{\max} = kF' - F_{\min}$$

получаем:

$$k = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{F' + F_{\max}} = \frac{\overline{Oa} + \overline{Oc}_1}{\overline{Oc} + \overline{Oa}}.$$

Для заданной формы скоростной характеристики зависимости  $F_n = f(I)$  получились прямоугольными. Если скоростная характеристика проходит справа от заданной, то эти зависи-

# Экспериментальное исследование вентиляции гидрогенераторов

Кандидат техн. наук М. И. ЗЕМЛЯНОЙ, инж. А. А. МИНАЕВ

Научно-исследовательский институт Министерства электротехнической промышленности

Инж. П. В. ЧЕБЫШЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

**Введение.** Одной из основных технических проблем в области повышения мощности и технико-экономических показателей гидрогенераторов, поставленных перед научно-исследовательскими организациями и заводами, является проблема улучшения их вентиляции.

Опыт эксплуатации гидрогенераторов на действующих гэс показывает, что некоторые конструкции машин этого типа работают в очень напряженных тепловых условиях по причине недостаточно интенсивного охлаждения. В отдельных машинах вследствие неравномерного охлаждения обмотки по длине наблюдаются большие местные перегревы, ограничивающие нагрузку генераторов.

При проектировании вентиляционной системы новых, более мощных гидрогенераторов для строящихся гэс вопрос создания эффективной вентиляции приобретает первостепенную важность, что обязывает нас тщательно изучить опыт отечественного и иностранного гидрогенераторостроения в этом разрезе.

В современных гидрогенераторах, как быстроногих, так и тихоходных, применяется радиальная система вентиляции с использованием принципа самовентиляции, при котором обдув активных частей осуществляется ротором и установленными на его торцах вентиляторами. В целях предохранения машины от загрязнения пылью, содержащейся в воздухе, почти во всех гидрогенераторах свыше 20 тыс. ква применяется замкнутая или циркуляционная система вентиляции.

В современных мощных гидрогенераторах замкнутая радиальная система вентиляции имеет различные конструктивные исполнения, которые можно классифицировать по следующим признакам: 1) по симметричности подачи воздуха в гидрогенератор — дву- и односторонняя подача; 2) по конструкции ротора — с радиальными каналами и без них; 3) по типу установленных вентиляторов — центробежные, осевые и венти-

ляторы «ковшевого» типа; 4) по расположению и конструкции воздухоохладителей — вертикальное или горизонтальное расположение шайбовых или проволочных воздухоохладителей.

При исследовании вентиляции действующих гидрогенераторов для измерения скоростей и температур охлаждающего воздуха наиболее пригодным оказался прибор типа электротермоанемометра. На базе новой измерительной аппаратуры — электротермоанемометра ЭТАМ-3 — в НИИ МЭП была разработана новая методика экспериментального исследования вентиляции гидрогенераторов, обеспечивающая наиболее полное и всестороннее исследование распределения потоков охлаждающего воздуха в машинах.

**Электротермоанемометры ЭТАМ-3 и ЭТАМ-ЗА ВЭИ.** Принцип действия электротермоанемометра основан на изменении теплоотдачи металлической нити, нагреваемой электрическим током, помещенной в исследуемый газовый поток. Прибор позволяет определять среднюю скорость и среднюю температуру потока воздуха в данной точке, а также усредненное направление скорости. Общий вид измерительного моста электротермоанемометра в рабочем состоянии при вентиляционных испытаниях на Щербаковской гэс представлен на рис. 1. Питание измерительного моста осуществляется от источника постоянного тока при напряжении 90...110 в. Нить измерительного насадка, помещаемая в поток, включается в одно из плеч измерительного моста, в другие плечи которого включены постоянные и регулируемые сопротивления. При измерении температуры потока питание измерительного моста осуществляется через большое постоянное сопротивление, выбранное так, чтобы ток через мост был достаточно мал и не мог вызвать перегрева нити по отношению к потоку. Таким образом, насадок используется как термометр сопротивления. В плече моста подбирают уравновешивающее мост сопротивление, по значению которого на графике температурной градуировки

мости будут иметь вид вогнутой кривой, если слева, — выпуклой.

Требуемый закон изменения напряжения на обмотке независимого возбуждения двигателя может быть получен, если для питания ее применить возбудитель с двумя обмотками возбуждения (рис. 6). Ток в обмотке 1 пропорционален току якоря двигателя. Обмотка 2 имеет независимое питание, причем н. с. этой обмотки направлена навстречу н. с. обмотки 1. Взаимодействие н. с. этих обмоток представлено на рис. 7.

При токе якоря двигателя  $I_n$  н. с. обмотки 1 имеет максимальное значение. С уменьшением

тока н. с. обмотки 1 уменьшается и при токе  $I_0$  н. с. обмоток 1 и 2 равны и напряжение возбудителя равно нулю. Дальнейшее уменьшение тока якоря двигателя вызывает изменение знака суммарной н. с. обмоток и, следовательно, изменение знака напряжения возбудителя.

## Литература

1. А. Д. Степанов. Теплоэлектрический привод транспортных машин. Машгиз, 1953.
2. Т. Н. Хохлов и Е. В. Платонов. Тепловоз серии ТЭ-2. Труды ВНИИЖДТ. Трансжелдориздат, 1952.

[13.1.1955]

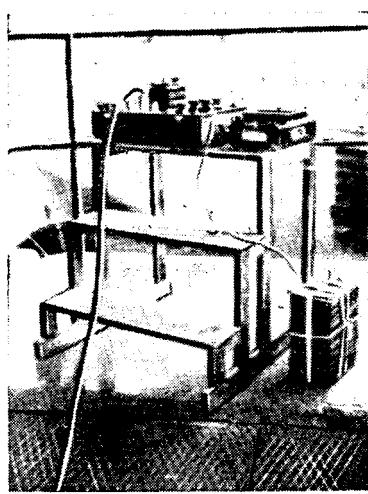


Рис. 1. Измерительный мост электротермоанемометра в рабочем состоянии.

определяют температуру потока. После переключения моста на измерение скорости это же сопротивление используется для осуществления температурной компенсации, что обеспечивает независимость показаний скорости от температуры потока.

Измерительный насадок электротермоанемометра оформлен в виде латунной трубы с двумя никелевыми ножками на конце, укрепленными при помощи изолирующей втулки. К концам ножек приваривается вольфрамовая нить длиной 4,5 мм и диаметром 19 мкн. Насадки изготавливаются с перпендикулярным расположением нити по отношению к трубке для измерения скорости, температуры и знака потока, а также с наклонной нитью, что позволяет одновременно определять направление потока в пространстве.

Погрешность измерения составляет для скоростей  $\pm 2 \dots 3\%$  предела измерения и для температур  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Диапазон измерения электротермоанемометром весьма широк: для скоростей он практически неограничен (0,1—200 м/сек); для температур верхний предел составляет до  $120^\circ\text{C}$  при базисном перегреве нити  $\Delta T_o = 150^\circ\text{C}$  и до  $200^\circ\text{C}$  при  $\Delta T_o = 50^\circ\text{C}$ .

Достоинствами электротермоанемометра ЭТАМ-3 являются: 1) возможность одновременного измерения скорости и температуры потока; 2) малые габариты измерительных насадок, позволяющие производить измерения в труднодоступных каналах и сечениях без существенного искажения потока; 3) широкий диапазон измерения скоростей и температур воздуха; 4) возможность определения направления потока в пространстве при помощи насадок с наклонной нитью; 5) возможность измерения скоростей и температур воздуха во вращающихся частях гидрогенератора.

**Новая методика экспериментального исследования вентиляции. Измерение скоростей и температур воздуха.** При вентиляционных исследованиях гидрогенераторов для оценки вентиля-

рующего действия полюсов ротора крайне важно определить расход воздуха через радиальные каналы ротора. Измерение скоростей воздушного потока в радиальных каналах ротора и пространствах между полюсами выполняется по следующей методике, впервые примененной НИИ МЭП совместно с ВЭИ при вентиляционных испытаниях гидрогенераторов на Днепрогэс в 1952 г.

На валу гидрогенератора крепится контактный пояс с укрепленными на нем четырьмя изолированными от вала латунными кольцами. На корпусе гидрогенератора или возбудителя болтами крепится стойка с латунными щетками, нажим которых на кольцо контактного пояса обеспечивается пружиной. Измерительный насадок жестко закрепляется в роторе специальными скобами, вставляемыми в радиальные каналы между сегментами ротора таким образом, чтобы нить насадка располагалась в сечении, где производится измерение скорости воздушного потока. На рис. 2 показано крепление насадки при измерении скоростей во входном сечении радиального кольцевого канала ротора. На рис. 3 показана установка насадки при измерении скоростей воздуха в междуполюсном пространстве. Стержень насадки пропускается через кольцевые каналы так, что нить его располагается между полюсами. От штекельного разъема насадка проводники выводятся к месту расположения колец и припаиваются к ним.

Ток от источника питания через щетки и кольца подводится к насадке, проходит через нить насадка и возвращается тем же путем в измерительный мост, установленный в шахте нижней крестовины или на верхней крестовине, как показано на рис. 1.

Четырехпроводный подвод тока, обычно применяемый в аппаратуре ЭТАМ-3, сохраненный при измерениях скоростей и температур во вращающихся частях гидрогенератора, практически исключает влияние сопротивления дополнительных проводов и переходных контактов между щетками и кольцами на точность измерения, так как эти сопротивления малы по сравнению с сопротивлением плеч измерительного моста и других цепей, в которые они включаются.

При измерениях в роторе необходимо периодически останавливать машины для перемещения и закрепления измерительного насадка в различных точках ротора.

**Определение расхода воздуха через ротор.** Для выбора метода расчета количества воздуха, проходящего через радиальные каналы ротора, по измерен-

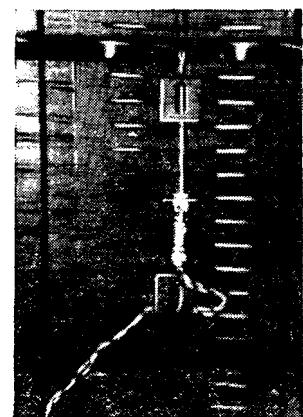


Рис. 2. Крепление измерительного насадка при измерении скорости воздуха на входе в радиальный кольцевой канал ротора.

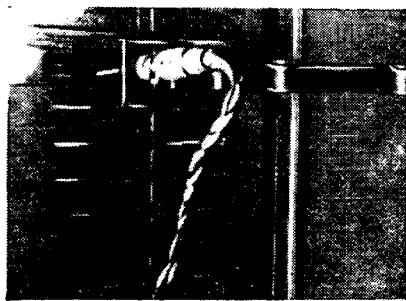


Рис. 3. Крепление измерительного насадка при измерении скорости воздуха между полюсами ротора.

ным скоростям исследовались условия входа воздуха в радиальные каналы на гидрогенераторах Днепрогэс. Равномерное распределение скоростей по ширине канала, полученное при измерениях Г-образным насадком, нить которого располагалась внутри канала, свидетельствует о том, что воздух в звезде ротора закручивается до окружной скорости обода и входит в каналы ротора не под углом, а радиально, равномерно заполняя все сечение. Это обстоятельство позволяет с достаточной для практики точностью определить расходы через кольцевые  $Q_1$  и прямоугольные  $Q_2$  каналы ротора по значениям скоростей, измеренных при входе в каналы:

$$Q_1 = (\pi D_b - k\Delta) b z_1 v_{c1} \mu,$$

где  $D_b$  — внутренний диаметр обода ротора, м;  $k$  — число спиц звезды ротора;  $\Delta$  — ширина спицы, м;  $b$  — ширина кольцевого канала, м;  $z_1$  — число кольцевых каналов;  $v_{c1}$  — средняя скорость воздуха при входе в кольцевые каналы, м/сек (определяется экспериментально);  $\mu \approx 0,7$  — коэффициент поджатия струи при входе в канал.

$$Q_2 = z_2 f v_{c2},$$

где  $z_2$  — число прямоугольных каналов в роторе;  $f$  — площадь проходного сечения прямоугольного канала, м<sup>2</sup>;  $v_{c2}$  — средняя скорость воздуха в прямоугольных каналах, м/сек.

Расход воздуха через ротор

$$Q_p = Q_1 + Q_2.$$

*Измерение полного расхода воздуха.* В зависимости от конструкции вентиляционной системы гидрогенератора полный расход воздуха измеряется в одном из следующих мест: 1) в окнах фундамента на нижней крестовине (при односторонней подаче воздуха в генератор); 2) в окнах корпуса машины со стороны камер горячего воздуха; 3) на воздухоохладителях.

Для первых двух случаев общее количество воздуха, проходящее через гидрогенератор, определяется как сумма расходов через каждое из окон:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} v_{ci} F_i,$$

где  $v_{ci}$  — средняя скорость воздуха в каждом окне, м/сек;

$$F_i — сечение окна, м^2.$$

Для определения средних скоростей сечение каждого окна разбивается на  $k$  равных прямоугольников. В центре каждого прямоугольника насадком электротермоанемометра измеряются скорости потока, по значению которых находится среднее расчетное значение

$$v_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} v_i}{k}.$$

Например, при испытаниях гидрогенератора Щербаковской гэс при измерении средних скоростей воздуха, выходящего из окон фундамента, на каждом окне устанавливалась деревянная рамка с сеткой из тонкой проволоки. Пересечение вертикальных и горизонтальных нитей проволо-

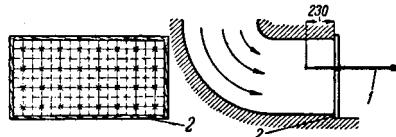


Рис. 4. Измерение скоростей воздуха в окнах фундамента на нижней крестовине гидрогенератора Щербаковской гэс.  
1 — измерительный насадок; 2 — деревянная рама с проволочной сеткой.

ки определяло точку расположения измерительного насадка (рис. 4). Насадок переставлялся экспериментатором, находящимся в шахте нижней крестовины, поочередно в каждую из 32 ячеек, на которые было разбито выходное окно. Насадок вводился вглубь окна на 250 ... 300 мм, где не было завихрения и поток был относительно установленвшимся.

При измерениях расхода воздуха на окнах корпуса в гидрогенераторах Верхне-Свирской и Фархадской гидроэлектростанций экспериментатор находился в камере горячего воздуха, а измерительный мост устанавливался в машинном зале, поблизости от места измерения.

При измерении на воздухоохладителях полный расход определялся как сумма расходов на всех охладителях:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} v_{ci} F_o [м^3/сек].$$

Распределение скоростей перед воздухоохладителем носит равномерный характер. В этом случае средняя скорость воздуха  $v_c$  определяется по описанному методу: сечение охладителя разбивается на прямоугольники, в центре каждого из них производится измерение скорости

$$v_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} v_i}{k} [м/сек].$$

При измерении скоростей в выходном сечении, где распределение скоростей чрезвычайно неравномерно, насадком электротермоанемометра снимается поле скоростей по сечению и методом графического интегрирования определяется среднее значение скорости. В этих случаях менее трудоемким и достаточно точным является интегральный метод измерения с помощью крыльчатого анемометра.

Средняя скорость выходящего воздуха на каждом охладителе подсчитывается по разности конечного и начального показаний анемометра и по времени измерения. Этот метод применялся при измерении расходов воздуха в гидрогенераторах Днепрогэса и Цимлянской гэс.

*Определение симметричности подачи воздуха.* При двусторонней подаче охлаждающего воздуха измеряются количества воздуха, поступающего через верхние и нижние окна. Измерение производится насадком электротермоанемометра по описанной выше методике. Расходы воздуха через верх и низ ( $Q_b$  и  $Q_n$ ) позволяют судить о симметричности подачи. Кроме того, они позволяют контролировать общий расход воздуха в гидрогенераторе:

$$Q = Q_b + Q_n.$$

*Измерение поля скоростей охлаждающего воздуха в радиальных каналах статора.* Для определения условий обтекания охлаждающим воздухом стержней обмотки в радиальных каналах статора с целью исследования интенсивности теплосъема измеряются скорости воздуха внутри канала по обеим сторонам обмотки. Измерения производят насадком с наклонной нитью, который вводится внутрь канала через окно в корпусе. Экспериментатор, переставляющий насадок в предварительно размеченные точки внутри канала, располагается в камере горячего воздуха. Измерительный мост устанавливается в машинном зале. Скорости измеряются по всей длине канала, начиная от воздушного зазора гидрогенератора по направлению к спинке статора.

Для определения направления потока насадок поворачивают вокруг своей продольной оси и через каждые  $30^\circ$  записывают показания электротермоанемометра. По полученным значениям строятся графики зависимости скоростей от угла поворота насадка и по развернутой поляре определяется основное направление потока.

Для измерения скорости и направления потока воздуха в зазоре машины насадок выдвигается через радиальный канал статора в зазор. Для защиты нити насадка от повреждений при движении по каналу насадок вводится в защитном чехле из тонкостенной трубы. После выхода в зазор нить выдвигается из чехла согласно предварительной разметке до места, где требуется измерить скорость и направление потока.

На рис. 5 представлено поле скоростей, снятое внутри радиального канала статора гидрогенератора типа СВ  $\frac{1250}{170} - 96$ . Стрелками по-

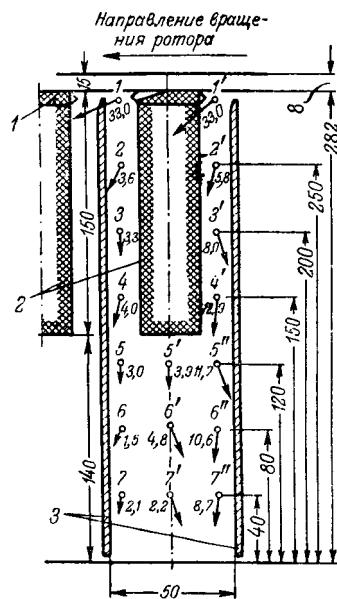


Рис. 5. Распределение скоростей охлаждающего воздуха внутри вентиляционного канала статора гидрогенератора СВ  $\frac{1250}{170} - 96$  (Щербаковской ГЭС)

1 — пазовый клин; 2 — обмотка статора; 3 — дистанционные распорки (ветреницы).

казано примерное направление скоростей в отдельных точках, цифрами без кружков обозначены значения скоростей. Результаты измерения указывают на неравномерное охлаждение стержней обмотки и стали в обеих половинах радиального канала.

*Определение расхода воздуха, подаваемого через вентилятор.* Расход воздуха через вентилятор

$$Q_{1r} = \pi D_1 b \mu_1 c_{1r},$$

где  $D_1$  — внутренний диаметр вентилятора, м;

$b$  — ширина лопатки, м;

$\mu \approx 0,5 \dots 0,7$  — коэффициент поджатия потока на входе, учитывающий несовершенное заполнение активным потоком входного сечения;

$c_{1r}$  — проекция абсолютной скорости при входе на направление радиуса, м/сек:

$$c_{1r} = c \sin \alpha,$$

где  $c$  — абсолютная скорость потока перед лопатками,

$\alpha$  — угол между абсолютной и окружной скоростями потока (рис. 6).

Исследования на гидрогенераторах ДнепроГЭС показали, что поле скоростей воздуха по ширине лопатки чрезвычайно неравномерно: угол  $\alpha$  в различных точках неодинаков и меняется в широких пределах. Причиной этого является перетекание воздуха от лобовых частей через зазор между вентилятором и воздухоразделяющим щитом обратно в зону разряжения, создающее неравномерное закручивание потока по ширине лопатки.

Для приближенного определения подачи вентилятора необходимо снимать поле скоростей по всей ширине лопатки и учитывать влияние зазора путем измерения скоростей по ширине зазора и определения количества перетекающего воздуха.

Величина и направление абсолютной скорости потока перед лопатками определяются насадком с наклонной нитью, установленным вертикально на некотором расстоянии (50 ... 60 мм) от лопаток вращающегося вентилятора (рис. 6). В каждой точке измерения снимается полярная скорость, по которой определяются величина и направление абсолютной скорости потока и ее тангенциальная и нормальная составляющие.

*Определение количества воздуха, выходящего от лобовых соединений обмотки на спинку статора.* Для определения количества воздуха, выходящего от лобовых соединений через зазоры между нажимными гребенками на спинку статора, измеряются скорости воздуха в верхнем и нижнем сечениях между наружным диаметром статора и корпусом гидрогенератора. Измерения производятся в нескольких местах по окружности статора насадком электротермоанемометра. По полученным значениям скоростей определяются их средние значения и подсчитывается количество выходящего на спинку статора воздуха:

$$q = q_v + q_n = 0,7\pi D_{c.n} e (v_{c.v} + v_{c.n}),$$

где  $q_v$  и  $q_n$  — расход воздуха через верхнее и нижнее сечение,  $\text{м}^3/\text{сек}$ ;

$D_{c.n}$  — наружный диаметр статора, м;

$e$  — ширина выходного сечения, м;

0,7 — коэффициент, учитывающий закрытие выходного сечения скрепляющими шпильками и брусьями для крепления сегментов статора (подсчитан по конструктивным данным ряда испытанных гидрогенераторов).

*Измерение статического давления.* В легко доступных сечениях воздухопровода, где скорости воздуха относительно невелики и представляется возможным определить примерное направление потока (в камерах горячего и холодного воздуха, на нижней крестовине, перед и за воздухоохладителями), статическое давление измеряется при помощи трубки Пито-Прандтля, устанавливаемой против потока.

При измерении статических давлений в труднодоступных сечениях, в которых скорости воздуха имеют большие значения и неизвестно направление потока (в радиальных каналах, перед вентилятором, у лобовых частей, перед звездой ротора и т. п.), пользоваться гидродинамической трубкой не представлялось возможным. В этих случаях измерение статических давлений

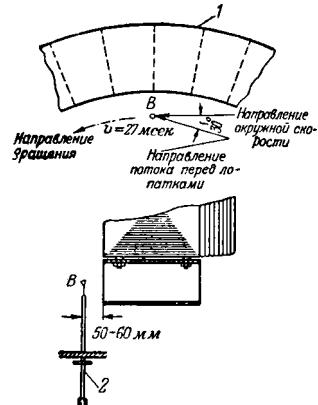


Рис. 6. Расположение измерительного насадка при снятии полярных скоростей воздуха перед входом на лопатки нижнего вентилятора.

1 — вентилятор; 2 — лимб для отсчета угла поворота  $\alpha$ .

выполнялось при помощи ниппельной резиновой трубы с двумя отверстиями диаметром 0,2 ... 0,5 мм на боковых поверхностях для отвода статического давления. Конец трубы оплавлялся на огне и промазывался kleem. Трубка при помощи переходника соединялась с микроманометром. Конец трубы вводился в поток и устанавливался силой струи по направлению потока. Использование подобного метода позволяло с достаточной для практики точностью оценить статические давления в отдельных сечениях. Сравнение результатов измерения давлений резиновой трубкой и трубкой Пито-Прандтля показало, что ошибка не превышает 0,2 ... 0,3 мм вод. ст., что практически допустимо.

*Определение вентиляционных потерь.* Вентиляционные потери в исследуемых гидрогенераторах определяются по расходу охлаждающего воздуха и перегреву горячего воздуха над холодным в режиме холостого хода гидрогенератора без возбуждения.

Перегрев воздуха измеряется по показаниям термометров при установленном тепловом состоянии машины в режиме холостого хода. При этом режиме воздух перегревается только за счет вентиляционных потерь.

По описанной выше методике проводились экспериментальные исследования вентиляции крупнейших гидрогенераторов, как отечественных, так и заграничных. Исследовались существующие системы вентиляции и их модификации, получаемые путем временных конструктивных изменений отдельных элементов (закрытые радиальные каналы ротора, снятые воздухоразделяющие щиты и т. п.) с целью выявления влияния конструкций узлов вентиляционной системы на охлаждение гидрогенератора.

Для контроля нагрева гидрогенератора совместно с вентиляционными проводятся тепловые испытания.

[3. 3. 1955]



# **Современные методы контроля влажности изоляции**

*Кандидат техн. наук В. Б. КУЛАКОВСКИЙ*

ЦНИЭЛ МЭС СССР

Вопрос об условиях включения силовых трансформаторов в последнее время существенно усложнился. Выявившиеся недостатки некоторых типов трансформаторов выпуска Московского трансформаторного завода (МТЗ) вынудили к пересмотру как ряда конструктивных и производственных вопросов трансформаторостроения, так и условий включения трансформаторов после монтажа.

Осторожности ради, по настоянию МТЗ были введены более жесткие нормативы для определения степени увлажненности изоляции трансформаторов. Со своей стороны, МТЗ согласился на смягчение ряда требований прежней заводской инструкции по включению трансформаторов; завод более не настаивает на обязательности прогрева до 60 ... 70° С всех трансформаторов средней и большой мощности, что создавало большие трудности для монтажных организаций. Завод ввел измерение на испытательной станции тангенса угла потерь при двух температурах, благодаря чему стало возможным сравнение характеристик изоляции на месте монтажа с заводскими данными.

Таким образом, вместо двух документов, регламентирующих требования к трансформаторам, вновь вводимым в эксплуатацию — заводской инструкции и циркуляра Министерства электростанций З/Э, в настоящее время создана отличная от обоих единая инструкция по вводу трансформаторов в эксплуатацию.

Во введении к своей статье<sup>1</sup> А. К. Ашрятов сопоставляет требования прежней заводской инструкции и циркуляра З/Э Министерства электростанций. При этом оба документа излагаются не вполне точно.

При изложении требований Руководящих указаний по ускорению монтажа трансформаторов МТЗ указано, что для трансформаторов на 110 кв и выше прогрев рекомендовался лишь для удаления воздушных включений. В действительности согласно Руководящим указаниям для трансформаторов напряжением выше 35 кв категорически требовался прогрев с целью проверки со противления изоляции и пробивного напряжения масла.

Совершенно выпущены из рассмотрения «Указания по монтажу и включению в сеть масляных силовых трансформаторов без сушки», изданные заводом позднее, чем «Руководящие указания по ускоренному монтажу» и несколько отличные от них. При изложении требований циркуляра З/Э опущено весьма важное указание о необходимости суждения о состоянии трансформатора путем комплексного рассмотрения всех результатов измерений и условий, при которых трансформатор хранился до монтажа.

<sup>1</sup> См. статьи А. К. Ашрятова, С. А. Городецкого, А. П. Караваина, Я. С. Колина, А. М. Маринова, Л. М. Раузина, Д. И. Поляка, Электричество, № 9, 1955.

О новых методах контроля влажности изоляции. Большое место в статье занимает критика метода емкость — частота. Этот раздел по существу является несколько запоздалым ответом на нашу статью, опубликованную в 1951 г. [Л. 1]. Нельзя не отметить, что этот раздел базируется в основном на тех же опытных данных (полученных еще в 1948 г.), что и наша статья, но только им придано иное толкование. В табл. 1 и 2 А. К. Ашрятов приводит данные, которые должны показать, что отношение  $C_2/C_{50}$  у трансформаторов, не проходивших сушки, может быть даже меньше, чем у трансформаторов, прошедших сушку, и что, следовательно, по методу емкость — частота нельзя однозначно определить меру влажности изоляции. Те же цифровые данные были приведены в виде диаграммы в нашей статье как доказательство того, что отношение  $C_2/C_{50}$  в результате сушки всегда снижается. А. К. Ашрятов приходит к другому выводу: поскольку у некоторых трансформаторов, еще не проходивших сушки в процессе их изготовления на заводе, отношение  $C_2/C_{50}$  может быть меньше нормированных значений, то, по его мнению, измерения как на неувлажненных, так и на заведомо увлажненных трансформаторах могут дать значения отношения  $C_2/C_{50}$  в пределах 1,04 ... 1,3. Однако никак не доказано, что трансформатор, не проходивший заводской сушки, идентичен по своим характеристикам трансформатору, прошедшему сушку, а затем увлажнившемуся.

Трансформатор может быть собран из деталей, имеющих самые различные степени влажности изоляции; известно, что ряд деталей изоляционной конструкции трансформаторов проходит сушку до установки на трансформатор, другие устанавливаются без сушки; трансформаторы средней мощности иногда проходят по технологическим соображениям предварительную подсушку. Расположение увлажненных деталей изоляции может оказаться таким, что не все методы контроля влажности изоляции смогут определить наличие таких деталей. Соотношения между величинами  $C_2/C_{50}$  и  $\operatorname{tg}\delta$  в этом случае могут, видимо, существенно отличаться от обычных. Во всяком случае обычные нормы оценки влажности изоляции, очевидно, совершенно непригодны для таких трансформаторов.

Иначе обстоит дело тогда, когда трансформатор, достаточно высушенный, подвергается увлажнению на воздухе или в масле. В этом случае распределение влаги по изоляции имеет тот характер, для которого и были выработаны нормы оценки влажности изоляции. Не следует также забывать, что в 1948 г. измерения проводились весьма несовершенной аппаратурой. Поэтому не исключена возможность некоторых погрешностей в измерениях.

Погрешностями измерения при малых значениях  $C_2/C_{50}$ , видимо, объясняется отсутствие чет-

кой зависимости между  $C_2/C_{50}$  и  $\operatorname{tg}\delta$  для трансформаторов, прошедших сушку.

В статье сделана ссылка на п. 3 таблицы, из которого якобы следует, что и для трансформаторов, прошедших сушку, а потом увлажнившихся, отношение  $C_2/C_{50}$  может быть меньше 1,3. Такой вывод может являться только следствием недостаточного анализа статистических данных.

Значение  $C_2/C_{50} = 1,28$ , приведенное в п. 3 таблицы и послужившее единственным основанием для упомянутого вывода, фактически было получено только для обмотки ВН одного из трансформаторов; для обмотки НН этого же трансформатора было получено  $C_2/C_{50} = 1,43$ , что уже значительно превышает 1,3.

Следует отметить, что в статье А. К. Ашрятова имеются данные по измерениям на моделях межкатушечной изоляции, которые, казалось бы, свидетельствуют о том, что  $C_2/C_{50} = 1,2$  может быть при увлажненной изоляции. Однако никак не показано, что модель межкатушечной изоляции может одновременно служить моделью межобмоточной и корпусной изоляции, свойствами которых в основном определяется  $C_2/C_{50}$  при измерениях на трансформаторах. Напротив, известно, что в конструктивном отношении межкатушечная изоляция на 220 кв имеет весьма мало общего с межобмоточной и корпусной.

В межкатушечной изоляции подвержены увлажнению главным образом прокладки, т. е. детали, небольшие по площади, параллельно которым включена емкость масляного промежутка, площадь которого в несколько раз больше площади прокладок. В межобмоточной изоляции увлажняются цилиндры, разделяющие обмотки по всему их периметру; масляные промежутки включены последовательно с цилиндрами.

При возрастании емкости промежутка после заполнения его маслом зависимость емкости от частоты у межкатушечной изоляции может уменьшаться, т. е. емкость параллельно включенного масляного промежутка практически не зависит от частоты. У межобмоточной изоляции зависимость емкости от частоты может лишь несколько возрасти, так как увеличение емкости последовательно включенного промежутка может лишь усилить поле в цилиндре.

Благодаря наличию большой, не зависящей от температуры емкости масляных промежутков, включенной параллельно твердой изоляции, температурная зависимость отношения  $C_2/C_{50}$  для межкатушечной изоляции может оказаться совсем иной, чем для межобмоточной и корпусной изоляции.

Обращают на себя внимание некоторые соотношения, полученные при измерениях на межкатушечной изоляции: после заливки модели маслом сопротивление изоляции вдвое возросло, в то время как у трансформаторов оно обычно падает после заливки в несколько раз; емкость моделей на 50 гц не превышала 900 пФ, что ниже предела измерений прибора ПКВ. В свете этого представляется сомнительным, что при измерениях была обеспечена точность, позволяющая рассматривать результаты измерений как

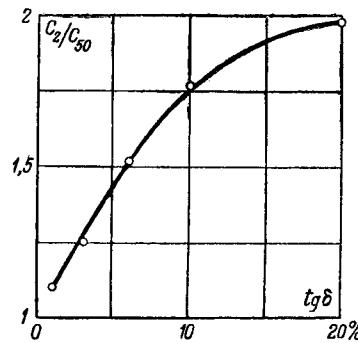
достоверные. Исходя из всего изложенного, следует считать, что приведенные в статье данные измерений на моделях межкатушечной изоляции не могут характеризовать соотношений, имеющих место при измерениях на трансформаторах.

Весь остальной материал статьи не дает никаких оснований считать, что как при увлажненной, так и при неуваженной изоляции могут быть получены одинаковые значения  $C_2/C_{50}$ .

Материалы наших экспериментов, как это было показано, при полноценной их обработке не могут служить основанием для такого вывода. Можно показать, что и данные МТЗ дают по существу такие же результаты. Так, в статье указано, что для обмотки ВН увлажненного трансформатора  $C_2/C_{50} = 1,22$  при 20°С [Л. 1, рис. 1] и лишь при нагреве трансформатора эта величина стала больше допускаемых нормами значений. Однако при этом почему-то не упомянуто, что для обмотки НН этого трансформатора  $C_2/C_{50} = 1,76$  при 24°С и, следовательно, не могло быть ошибки в оценке влажности изоляции по этой величине. Для трансформатора ТДГ 60000/110 в статье, напротив, приведены лишь данные по обмотке НН [Л. 1, рис. 2] и не указано, что для обмотки ВН при 22°С отношение

$C_2/C_{50} = 1,31$ , а  $\frac{R_{30}}{R_{15}} = 1,26$  и, следовательно, при комплексном рассмотрении всех результатов измерений неминуемо возникли бы сомнения в возможности включения такого трансформатора без сушки.

В конце первого раздела статьи даны три вывода, в которых содержится в основном одно и то же утверждение: о неоднозначности зависимости отношения  $C_2/C_{50}$  от увлажненности изоляции. Как видно из всего изложенного, при неизвестном рассмотрении фактических данных измерений  $C_2/C_{50}$  никак нельзя прийти к таким выводам. В 1951 г. нами были приведены данные по зависимости  $C_2/C_{50}$  от влажности для не пропитанного маслом электрокартона. В дополнение к ним можно привести зависимость  $C_2/C_{50}$  от тангенса угла потерь для пропитанного маслом электрокартона (см. рисунок).



Во втором разделе статьи приводится сравнение чувствительности различных характеристик изоляции к увлажнению и доказывается, что наиболее чувствительным является сопротивление изоляции, а наименее чувствительным — отношение емкостей, замеренных при частотах 2 и 50 гц.

Против таких результатов трудно что-либо возразить, но сама постановка вопроса непонятна, так как целесообразность измерения того или иного показателя определяется не только кратностью его изменения при увлажнении изоляции, но и рядом других факторов. Известно, например, что одно абсолютное значение сопротивления изоляции не может служить надежным показателем увлажнения изоляции, так как оно часто зависит от ряда обстоятельств, не связанных с влажностью. С другой стороны, повышенное значение  $C_2/C_{50}$  обычно свидетельствует об увлажнении изоляции, хотя кратность изменения этой величины в процессе увлажнения во много раз меньше, чем измерения сопротивления изоляции.

В этом же разделе указывается, что по исследованиям МТЗ внутренняя обмотка трансформатора скорее подвергается увлажнению, чем остальные, и поэтому неправильно устанавливать различные нормы тангенса угла потерь для разных обмоток одного и того же типа трансформатора. На наш взгляд, тот факт, что тангенс угла потерь при увлажнении больше возрастает у обмотки, ближней к сердечнику, еще не означает, что эта обмотка больше увлажняется; более резкое возрастание ее тангенса угла потерь может быть обусловлено также иной конфигурацией и иными размерами изоляции. Поэтому принципиально допустимо существование разных норм для разных обмоток трансформатора. Другой вопрос: целесообразно ли с практической точки зрения иметь различные нормы? Здесь можно согласиться с А. К. Ашрятовым, что достаточно иметь одну норму, считая достаточным для суждения о влажности трансформатора сравнение с нормами показателей для одной из обмоток.

Третий раздел посвящен определению увлажнения по методу абсорбции. Вначале содержится утверждение, что сопротивление изоляции и  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ , определенные при  $10\dots20^\circ\text{C}$ , дают нестабильные результаты. В подтверждение этого приводится таблица данных для обмотки ВН трансформатора ТДГ-15000/110, из которой следует, что отношение  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$  в процессе увлажнения трансформатора практически не изменилось (1,43 при  $23^\circ\text{C}$  и 1,47 при  $22,5^\circ\text{C}$ ). Как и ранее, при этом не указывается, что для обмотки НН получаются совершенно иные данные:  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$  изменилось в процессе увлажнения с 3,0 при  $23^\circ\text{C}$  до 1,048 при  $22,5^\circ\text{C}$ .

Еще менее убедительно выглядит ссылка на соотношения, полученные на моделях межкатушечной изоляции. Во-первых, насколько можно понять из табл. 3 статьи, сравниваются величины, измеренные не на одной и той же, а на разных моделях. Во-вторых, как было указано ранее, нет оснований считать, что для межобмоточной изоляции справедливы соотношения, полученные на модели межкатушечной изоляции. В-третьих,

ввиду малых размеров модели значения сопротивлений, измеренные в холодном состоянии, близки к пределу измерений мегомметра и, следовательно, точность их отсчета была невысокой.

Впрочем, следует отметить, что при этих условиях значение абсорбции для модели, подвергавшейся сушке, оказалось больше, чем для модели, не подвергавшейся сушке ( $1,67$  и  $1,2$ ).

Неясно, из чего исходил автор статьи в своем утверждении, что „при измерениях в холодном состоянии абсолютное значение  $R_{60}$  и отношение  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$  в ряде случаев могут показать удовлетворительное состояние изоляции на заданном увлажнении трансформаторах“. В статье не приведено ни одного случая, когда измерения сопротивления изоляции и отношения  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$  дали бы повод к ошибочным заключениям о состоянии изоляции. Что касается утверждения о том, что такие измерения нельзя считать достаточными для оценки влажности изоляции, то противоположной точки зрения, насколько нам известно, никто не отстаивает. Именно недостаточность измерения сопротивления изоляции для суждения о влажности ее и заставила в свое время искать других методов оценки увлажненности, в частности развивать емкостные методы.

Меньше всего возражений встречает четвертый раздел статьи, в котором рассматривается метод емкость — температура. Однако нельзя не обратить внимания на тот факт, что в настоящее время А. К. Ашрятов считает, что отношение  $\frac{C_2}{C_x}$  должно быть близко к единице, в то время как в 1945 г. Московский трансформаторный завод считал, что допустимо  $\frac{C_2}{C_x} = 1,2$  [Л. 3].

Рассмотрев точку зрения А. К. Ашрятова на современные методы контроля влажности изоляции трансформаторов, мы хотели бы привести некоторые сведения по применению методов, наиболее сильно подвергшихся критике с его стороны: метода емкость — частота и метода абсорбции. Основными достоинствами метода емкость — частота, по нашему мнению, являются: 1) независимость результатов измерений от ухудшений состояния изоляции, не связанных с увлажнением (повышение проводимости измеряемого объекта из-за загрязнения выводов, местных дефектов изоляции и т. п.); 2) незначительное по сравнению с методом  $\tan\delta$  влияние внешних электрических полей на результаты измерений; 3) простота измерений и подготовки к ним.

Метод стали применять с 1948 г. По сведениям на 1952 г., он использовался в 23 энергосистемах МЭС, а также в организациях Министерства строительства предприятий metallurgической и химической промышленности, Министерства нефтяной промышленности, Министерства

путей сообщения. Метод применяется также на ряде ремонтных заводов и в мастерских.

К настоящему времени число организаций, использующих указанный метод, еще больше возросло. Имеются сведения о проводимых за границей разработках аналогичного метода [Л. 4]. Целесообразность применения метода была подтверждена рядом исследовательских работ, проведенных организациями, использующими этот метод (Мосэнерго, Ленэнерго, Кавэлектромонтаж, Азэнерго и др.). Только в журнале «Электрические станции» в 1950—1953 гг. появилось восемь статей об опыте применения этого метода, и среди них не было ни одной, которая содержала бы отрицательную оценку метода.

В настоящее время промышленность выпускает прибор для измерений по методу емкость — частота. Таким образом, сейчас имеется возможность осуществлять измерения по этому методу, используя для этой цели качественную и проверенную аппаратуру.

В отличие от критерия  $C_2/C_{50}$ , определяемого при измерениях по методу емкость — частота, коэффициент абсорбции  $\frac{R_{60}}{R_{15}}$  позволяет судить как об увлажнении изоляции, так и о наличии некоторых местных дефектов. Достоинствами этого метода являются: 1) возможность обнаружения местных дефектов и некоторых местных увлажнений; 2) простота измерений: измерение сводится к отсчету показаний мегомметра через 15 и 60 сек после приведения его в действие. Измерения коэффициента абсорбции производятся во всех энергосистемах Советского Союза, на заводе МТЗ и в других организациях. Имеются сведения о применении этого измерения в зарубежных странах (в частности, на заводах фирмы «Инглиш электрик»). Целесообразность применения метода подтверждается рядом исследовательских работ (Мосэнерго, Кавэлектромонтаж и др.). В литературе описаны случаи выявления местных дефектов и увлажнений в трансформаторах при помощи этого метода [Л. 5].

**О допустимой степени увлажненности изоляции.** В последнем разделе статьи А. К. Ашрятова рассматриваются условия включения трансформаторов без сушки. Постулируется, что все вновь изготовленные трансформаторы должны включаться в работу в практически неуважненном состоянии. Однако не поясняется, что считать практически неуважненным состоянием. Возможны два подхода к решению этого вопроса.

Существует мнение, что неуважненное состояние — это то состояние, в котором находится изоляция трансформатора при выпуске его с завода: всякое заметное отклонение от этого состояния считается недопустимым увлажнением.

Только исходя из этого положения, можно утверждать, что нормы циркуляра З/Э по тангенсу угла потерь завышены, так как у большинства новых трансформаторов тангенс угла потерь меньше нормированных значений; только исходя из этого положения, можно считать, что в нормы циркуляра З/Э на отношение могут якобы укладываться трансформаторы с увлажнен-

ной изоляцией. Исходя из этого положения, признали увлажненную изоляцию трансформатора ОДТГ 30000/220 и произвели длительный прогрев его [Л. 1, табл. 7], хотя этот трансформатор хранился в герметизированном баке и абсолютные значения его характеристик изоляции не указывали на значительное увлажнение.

Новая инструкция по определению влажности изоляции трансформаторов составлена по настоящию Московскому трансформаторному заводу также исходя из этого положения.

Является ли, однако, та увлажненность, которую трансформаторы имеют при выпуске их с завода, определенной обоснованной величиной, отклонение от которой опасно для трансформатора? Нет никаких оснований считать, что эта установка обоснованная.

Известно, что характеристики изоляции (сопротивление изоляции, тангенс угла потерь и др.) колеблются в довольно широких пределах для новых трансформаторов, даже выпущенных одним заводом, что свидетельствует о разной степени увлажненности изоляции этих трансформаторов. Это становится понятным, если учесть, что заводские инструкции разрешают некоторые отклонения в значении вакуума при сушке, во времени выдержки трансформатора на воздухе до окончательной заливки его маслом и т. п.

Еще более значительная разница должна получиться при сравнении трансформаторов различных заводов и фирм, так как технология сушки может быть существенно различной. Известно, кроме того, что на ремонтных заводах условия сушки, как правило, хуже, чем на заводах-изготовителях, а при сушке на месте монтажа они еще хуже; и тем не менее трансформатор, прошедший такую сушку, также считается практически неуважненным.

Все изложенное дает основания считать, что такой подход к решению вопроса о том, что считать практически неуважненной изоляцией, в значительной степени произведен.

Кроме того, изоляция трансформаторов в процессе их эксплуатации увлажняется, и при таком подходе следует, что трансформаторы, находящиеся в эксплуатации, должны подвергаться периодической сушке в целях снижения влажности изоляции до значения, замеренного при выпуске трансформатора с завода. Это дорогостоящее мероприятие, как правило, не практикуется, тем не менее большинство трансформаторов работает достаточно надежно.

Более правильным, на наш взгляд, является иной подход к этому вопросу: практически неуважненной следует считать такую изоляцию, которая может длительно работать при данной степени влажности в любых нормальных для нее режимах.

Исходя из этого, для трансформаторов следует считать допустимой такую степень влажности изоляции, при которой они, как показывает практика, могут работать безаварийно. Поэтому в основу норм на характеристики изоляции целесообразно положить значения, наблюдающие-

ся у трансформаторов, находящихся в эксплуатации. Следует учесть, что частично характеристики изоляции могут, видимо, изменяться при работе трансформатора под воздействием причин, не связанных с увлажнением. Однако основные изменения характеристик изоляции при работе трансформатора происходят за счет увлажнения изоляции. Это подтверждается тем общеизвестным фактом, что после сушки трансформатора, находившегося в эксплуатации и забракованного по результатам профилактических испытаний, характеристики изоляции его, как правило, существенно улучшаются. Несколько таких примеров приведено в таблице.

Процесс увлажнения изоляции трансформаторов во время работы не является следствием какого-либо недосмотра. Согласно литературным данным [Л. 6] это — неизбежное явление, наблюдающееся в большей или меньшей степени во всех длительно работающих трансформаторах.

Большие запасы электрической прочности по отношению к рабочим градиентам изоляции современных трансформаторов обеспечивают надежную работу трансформатора даже при сравнительно большой степени влажности изоляции. Что касается импульсных воздействий, то, как известно, увлажнение изоляции весьма мало влияет на импульсную прочность трансформаторной изоляции [Л. 7]; следовательно, нет особых оснований опасаться пробоя изоляции при импульсах по причине ее увлажненности. Известны случаи, когда трансформаторы с заметно увлажненной изоляцией работают вполне надежно много лет. Так, группа трехобмоточных трансформаторов мощностью 10 000 ква работает более 10 лет с неудовлетворительными характеристиками изоляции: по замерам 1952 г. тангенс угла потерь трансформаторов лежал в пределах 4,4 ... 10° при 22° С; при той же температуре отношение  $C_2/C_{50} = 1,35 \dots 1,82$ . Имеются еще более разительные примеры: трансформатор 4 200 ква, 31,5/6,6 кв был нагрет в режиме холостого хода. Измерения, проведенные при 81° С, показали, что при этой температуре тангенс угла потерь изоляции трансформатора

возрастает на 100%, а  $\frac{C_2}{C_x} = 2,18$ . Тем не менее трансформатор выдержал длительный прогрев при полном напряжении.

Специальные опыты, проведенные на МТЗ, свидетельствуют о значительных запасах электрической прочности, которые имеет межкатушечная изоляция даже при ее явном увлажнении. Так, модель межкатушечной изоляции, приведенная в табл. 3 статьи А. К. Ашрятова, не проходившая сушку, имела пробивные напряжения межкатушечных каналов 39 ... 60 кв, что в 4 ... 6 раз превосходит рабочие напряжения, обычно приходящиеся на канал моделируемого трансформатора.

Таким образом, нет оснований считать опасным всякое общее увлажнение изоляции, любое отклонение характеристик изоляции от заводских данных. Опасной является, видимо, лишь

очень значительная степень увлажнения, легко обнаруживаемая по существенному отклонению характеристик изоляции не только от заводских данных, но и от величин, обычно наблюдаемых у работающих трансформаторов.

Нормы циркуляра З/Э, созданные работниками энергосистем на основе опыта эксплуатации трансформаторов, близки к значениям характеристик изоляции, которые имеют большое число эксплуатируемых трансформаторов. Нормированные в циркуляре значения вместе с тем далеко не достигают значений, которые имеют многие трансформаторы, длительно надежно работающие. Пользование этими нормами не могло привести к включению трансформаторов с недопустимо высокой степенью общего увлажнения изоляции.

Что касается местных увлажнений, то вряд ли они возможны даже при нарушении герметичности бака, если только нет отверстий в крышке трансформатора, через которые могла бы попасть на обмотки дождевая вода. Но и в случаях попадания капельной влаги внутрь бака на его поверхности должны остаться легко обнаруживаемые следы влаги. К этому следует также добавить, что не всякое попадание воды в бак приводит к местным увлажнениям изоляции обмоток; сверху обмотки закрыты выступающими частями консолей, у многих крупных трансформаторов обмотки закрыты электрокартоном («келингом»), так что почти единственным местом, через которое капельная влага может проникнуть в обмотки, остается щель между консолями и сердечником. Но и в этом случае в большинстве конструкций трансформаторов влага должна проделать довольно сложный и длинный путь, а затем впитаться в хорошо промасленный электрокартон, чтобы вызвать существенное ослабление изоляции трансформатора. Все это, очевидно, возможно лишь при попадании значительных количеств влаги в бак.

Изложенное, конечно, не означает, что допустимо любое нарушение герметичности трансформатора. Однако, с другой стороны, далеко не всякое нарушение герметичности вызывает необходимость сушки трансформатора.

Весьма сомнительна возможность поверхностного увлажнения трансформатора, длительно находящегося без масла, которая так беспокоит А. К. Ашрятова: скорость сорбции влаги для электрокартона достаточна для того, чтобы поверхностное увлажнение со временем перешло в объемное. Так, согласно опытам, проведенным в ЦНИЭЛ, процесс объемного увлажнения пропитанного маслом электрокартона толщиной 1 мм в атмосфере влажностью 75% длится около 20 дней. Пример с трансформатором ОДТГ 30000/220, приведенный в статье, в этом отношении мало убедителен, так как никак не доказано, что увлажнение (на наш взгляд незначительное) было поверхностным, а не объемным. О том, что увлажнение было объемным, свидетельствует повышенное значение тангенса угла потерь, который, как известно, зависит в основном от объемной увлажненности.

## Характеристики увлажненных трансформаторов до и после сушки

№ п/п.	Данные трансформатора	Перед сушкой						После сушки					
		Напряжение измеряемой обмотки, кВ	Температура, °C	R <sub>60</sub> , МΩ·M	$\frac{R_{60}}{R_{15}}$	tg δ, %	C <sub>2</sub> /C <sub>60</sub>	Температура, °C	R <sub>60</sub> , МΩ·M	$\frac{R_{60}}{R_{15}}$	tg δ, %	C <sub>2</sub> /C <sub>60</sub>	Количество лет эксплуатации с увлажненной изоляцией
1	МТЗ 3 333 ква, 66,5/6,6	66,5 6,6	21 21	650 320	1,18 1,19	13 20	1,63 1,51	36 36	650 700	1,12 1,75	4,9 5,6	1,26 1,36	2 года
2	МТЗ 1 800 ква, 35/6	35 6	20 20	500 350	— —	— —	2,25 2,06	30 30	1 100 1 100	— —	— —	1,1 1,11	2 года
3	7 500 ква, 110/35/6	110 35 6	21 21 21	— — —	— — —	— — —	1,38 1,57 1,57	26 26 26	— — —	— — —	— — —	1,07 1,05 1,05	1 год
4	ФЕМ 20 000 ква, 35/10	35 10	66 66	50 45	— —	— —	1,66 1,67	22 22	1 000 500	— —	— —	1,15 1,13	1 год

Понижение тангенса угла потерь после 34-часовой подсушки в масле при 80° С (а не кратковременного прогрева до 70° С, рекомендуемого А. К. Ашрятовым) не может рассматриваться как свидетельство о поверхностном увлажнении, так как такой подсушкой могло быть ликвидировано и незначительное объемное увлажнение. Кстати, следует отметить, что случай с трансформатором ОДТГ 30000/220 является, как это следует из текста статьи, ярким примером выявления увлажнения путем сравнения характеристик изоляции однотипных трансформаторов, измеренных в холодном состоянии, до какого-либо нагрева.

Исходя из всего изложенного, следует считать, что требования к степени увлажнения изоляции трансформаторов, выдвигаемые в статье и принятые в своем большинстве в настоящее время, являются неоправданно жесткими. В этой связи можно отметить, что среди иностранных фирм наряду с другими, которые требуют сушки всех трансформаторов, транспортируемых без масла, имеются и такие, которые выдвигают весьма несложные условия включения трансформаторов без сушки. Например, фирма Томсон-Хустон допускает включение без сушки трансформаторов на 110 кв, отправленных без масла с воздухом в баке, если сохранена герметичность бака и сопротивление изоляции не чрезмерно мало. Признаком герметичности бака фирма считает наличие давления или вакуума в баке, определяемое на слух при открытии крана. Фирма «Инглиш электрик» для своих трансформаторов на 220 кв, отправляемых без масла с воздухом в баке, выдвигает единственное условие возможности включения без сушки — отсутствие очевидных или подозреваемых повреждений уплотнений. Все это свидетельствует о том, что методика определения возможности включения трансформаторов без сушки, выдвигаемая в статье, не является единственно правильной.

**Выводы.** 1. Анализ материалов, приведенных в статье, не подтверждает мнения А. К. Ашрят-

ова о неоднозначности зависимости результатов измерений по методу емкость — частота от увлажненности изоляции. Опыт эксплуатации энергосистем, равно как и результаты лабораторных опытов, свидетельствует как раз об обратном.

2. Предлагаемая в статье методика контроля влажности основана по существу на мнении, что трансформатор должен включаться при той же практической степени влажности изоляции, которую он имел при выпуске с завода. Такое мнение хотя и является широко распространенным, тем не менее ничем не подтверждено. Напротив, опыт энергосистем показывает, что трансформаторы могут надежно работать при влажности изоляции, значительно превышающей ту, с которой обычно выпускаются трансформаторы с завода.

3. Нельзя не отметить некоторую односторонность освещения фактов в статье: приводятся характеристики изоляции для одной из обмоток трансформатора и не упоминается о других, показатели которых имеют как раз решающее значение; приводятся характеристики изоляции для моделей и не указывается пробивное напряжение, которое является решающим в определении состояния изоляции.

## Литература

1. А. К. Ашрятов. К вопросу о включении силовых трансформаторов без сушки. Электричество, № 9, 1955.
  2. В. Б. Кулаковский. Контроль влажности изоляции по методу емкость — частота. Электричество, № 2, 1951.
  3. В. Б. Гальперин. Новый метод определения степени влажности изоляции. Электрические станции, № 2, 1945.
  4. Brit. Journ. of Appl. Phys., № 2, т. 3, 1951.
  5. E. C. Rippoff. An Assessment of Impulse Testing. The Trans. of the S. A. Inst. of El. Eng. т. 46, № 2, 1955.
  6. Н. П. Фуфорин. Методы контроля влажности изоляции трансформаторов. Электрические станции, № 1, 1952.
  7. The British Electrical and Allied Industrial Technical Report Ref. Q/T 126, 1950.
  8. А. В. Панов и Л. А. Мравян. Влияние различных факторов на импульсную прочность жидкой и пропитанной твердой изоляции. Бюллетень ВЭИ, № 10, 1935.
- [1. 8. 1955]

# Опытные данные по оценке влажности трансформаторов

Инж. М. В. ХОМЯКОВ

ВВС Мосэнерго

Поднятый А. К. Ашрятовым в статье «О включении трансформаторов без сушки» вопрос о методах правильной оценки состояния изоляции трансформаторов с целью определения допустимости включения силовых трансформаторов без сушки имеет большое практическое и народнохозяйственное значение.

Эксплуатационные и монтажные организации неоднократно указывали трансформаторному заводу на недостаточность проводимых на заводе испытаний выпускаемых трансформаторов и целесообразность применения методов контроля состояния изоляции, принятых и проверенных при профилактических испытаниях, а также неосновательность ряда требований, выдвигаемых заводом при решении вопроса о возможности в целях ускорения монтажа включения в сеть без сушки трансформаторов. В частности, трансформаторный завод ограничивает испытание изоляции трансформаторов приложением высокого напряжения и измерением сопротивления изоляции. Измерение диэлектрических потерь, тока утечки на выпрямленном напряжении, абсорбционной зависимости, емкости на двух частотах и при двух температурах, измерение частичных разрядов при испытании высоким напряжением завод до сих пор не производит.

Техническое управление МЭС под давлением монтажных и эксплуатационных организаций было вынуждено принять решение (циркуляр З/Э), направленное на ускорение включения в сеть силовых масляных трансформаторов, отвергнув ряд неосновательных требований, выдвигаемых заводом. Следует признать, что при разработке эксплуатационного циркуляра З/Э об определении необходимости сушки трансформаторов были допущены некоторые ошибки. Многие энергосистемы и монтажные организации пошли значительно дальше и вовсе отказались от сушки трансформаторов, даже тогда, когда она была безусловно необходима. Многие энергосистемы перестали сушить трансформаторы при очередных ремонтах, когда в этом есть необходимость, не учитывая того, что увлажненная изоляция старится во много раз быстрее, чем сухая.

Ошибканым в эксплуатационном циркуляре была установка, что в качестве основного критерия для оценки увлажнения изоляции трансформаторов выдвигался емкостный метод и недооценивался метод измерения диэлектрических потерь, тока утечки, сопротивления изоляции и другие показатели, хотя все показатели в сумме лучше и более правильно определяют состояние изоляции трансформаторов, чем одно измерение по емкостному методу. Между тем в самом циркуляре правильно указывалось, что решение вопроса о необходимости сушки должно приниматься на основании комплексного рассмотрения всех результатов испытаний и условий, в которых находился трансформатор. Следует, однако, отметить, что большинство энергосистем в своей практике осуществляло весь комплекс измерений

и оценка состояния изоляции производилась с учетом всех показателей.

В статье А. К. Ашрятова подвергнута критическому разбору оценка влажности трансформаторов методами измерения емкости на двух частотах при двух температурах измерения сопротивления изоляции, коэффициента абсорбции и диэлектрических потерь. Однако в основном статья направлена на доказательство того, что сам по себе метод контроля влажности измерением емкости на двух частотах позволяет в некоторых случаях включать явно увлажненные трансформаторы.

В статье приводится много интересного фактического материала, но признать все выводы и представленные материалы правильными нельзя. Главные выводы статьи базируются на опытном материале, полученном на заводе с одним трансформатором. Данные, полученные в этом опыте, находятся отчасти в противоречии с результатами, полученными на заводе на многих трансформаторах в совместном исследовании ЦЛ ВВС, ЦНИИЭЛ и лаборатории завода.

Следует также отметить, что достаточно обоснованных критериев для определения оптимального состояния сухого трансформатора нет. Известно, что пересушивать трансформаторы также вредно, как и недосушивать. Пересушенный трансформатор, быстро увлажняясь, возвращается к оптимальному равновесному состоянию. Не доказано также, какая влажность является недопустимой и какими параметрами она определяется.

Для полного обследования состояния изоляции трансформаторов во многих энергосистемах применяются следующие испытания и измерения:

- 1) сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции при помощи мегомметра на 2,5 кв, 10 000 мгом;
- 2) токов утечки на выпрямленном напряжении;
- 3) диэлектрических потерь главной изоляции трансформаторов;
- 4) емкости на двух частотах; если производится прогрев трансформатора, то измеряется емкость при двух температурах: 20 и 60...80°C;
- 5) масла;
- 6) изоляции приложенным напряжением переменного тока.

Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции позволяет судить как о местных дефектах изоляции, так и о степени увлажнения. Диэлектрические потери в изоляции характеризуют общее состояние и главным образом общее увлажнение твердой изоляции или дефектность масла.

Ниже приводятся обобщенные данные многолетних испытаний: 1) трансформаторов, находящихся в эксплуатации, 2) новых трансформаторов, поступивших с завода на монтажные пло-

щадки, трансформаторов в различных стадиях производства на заводе.

**Методы емкость — частота и емкость — температура.** В BBC Мосэнерго было произведено сравнение метода оценки влажности изоляции трансформаторов емкость — температура с данными измерения диэлектрических потерь (рис. 1). Результаты сравнения даны на рис. 1.

Измерение емкости на двух частотах или при двух температурах и измерение диэлектрических потерь дают сопоставимые результаты и друг друга дополняют. Сравнение данных метода емкость — частота с данными измерения диэлектрических потерь подтверждает правильность норм оценки состояния увлажненности изоляции трансформаторов по  $\operatorname{tg} \delta$ . На рис. 2 для 60 трансформаторов дано сопоставление отношения  $C_2/C_{50}$  со значениями диэлектрических потерь. Из рис. 2 следует, что принятые в циркуляре З/Э нормы оценки изоляции  $C_2/C_{50} = 1,2$  при  $10^\circ\text{C}$ , а по  $\operatorname{tg} \delta 3\dots 5\%$  при  $10\dots 30^\circ\text{C}$  дают правильную характеристику состояния изо-

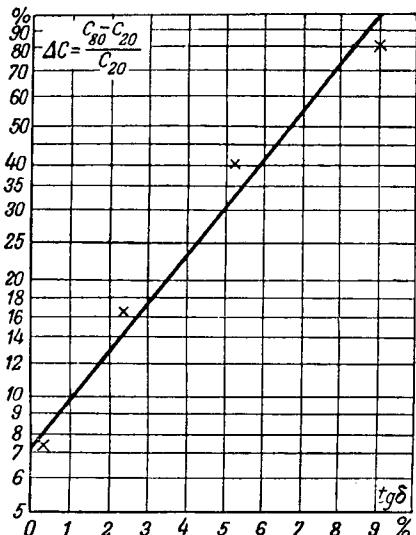


Рис. 1.  $\frac{C_{80} - C_{20}}{C_{20}}$  в зависимости от диэлектрических потерь изоляции трансформаторов с различной степенью увлажнения.

ляции трансформаторов. На рис. 2 ряд точек отношения  $C_2/C_{50}$  расположился на пограничной линии при очень больших значениях  $\operatorname{tg} \delta$  ( $5\dots 8\%$ ). Это подтверждает то положение, что только одно отношение емкостей не является достаточным критерием для того, чтобы судить о том, является ли трансформатор увлажненным.

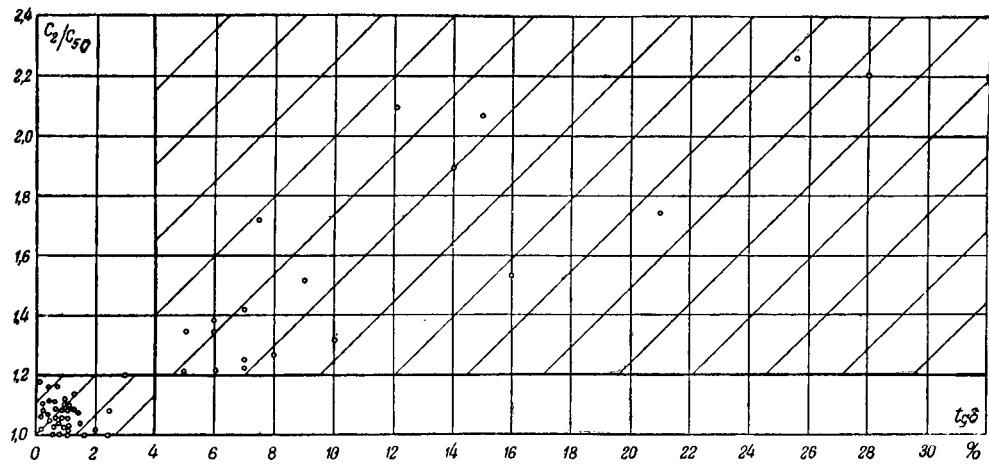
**Измерения сопротивления изоляции, коэффициента абсорбции и токов утечки.** При измерениях сопротивления изоляции долгое время не придавали значения хорошо известному физическому явлению абсорбции и производили отсчет по приборам показаний сопротивления изоляции, не учитывая время, протекшее с момента включения, чем обесценивались данные измерений.

На рис. 3 даны сопротивления изоляции в зависимости от момента отсчета для увлажненного трансформатора (кривая 1) и после его сушки (кривая 2). На рисунке отношение сопротивлений изоляции сухого и увлажненного трансформатора составляет примерно 10. Коэффициент абсорбции  $R_{60}/R_{15}$  является хорошим индикатором степени увлажненности трансформатора.

Одноминутное сопротивление изоляции  $R_{60}$  имеет большой разброс для разных трансформаторов, поэтому дополнительный учет коэффициента абсорбции значительно повышает ценность метода измерения сопротивления изоляции.

На рис. 4 отношение  $R_{60}/R_{15}$  сопоставлено с диэлектрическими потерями. Измерения проведены на 110 трансформаторах различных габаритов. Ряд точек располагается на пограничных линиях (рис. 4), что свидетельствует о том, что в некоторых случаях малый коэффициент абсорбции не определяет увлажненности трансформаторов, а обусловлен местными дефектами изоляции.

Завод предлагает принять допускаемое отклонение сопротивления изоляции от значения, указанного в заводском протоколе, не более 30%. При этом измерение должно производиться при той же температуре и в масле того же качества, что и при заводских испытаниях. Это предложение является нереальным: установить в условиях монтажной площадки ту же температуру и обеспечить те же качества масла невозможно.



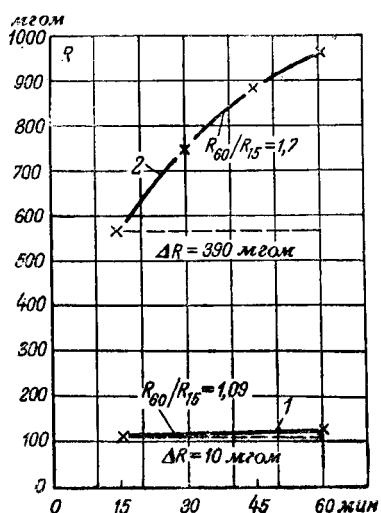


Рис. 3. Сопротивление изоляции трансформаторов—увлажненного (1) и после сушки (2)—в зависимости от момента отсчета показаний прибора.

Затем завод в своих протоколах обычно сообщает данные о сопротивлении изоляции, измеренном в нагретом состоянии при 60 ... 75° С или же при 30 ... 35° С. Значит, как правило, для сравнения данных потребуется прогрев трансформаторов, так как на монтажной площадке измерения без прогрева производятся при 5 ... 25° С.

Завод должен сообщать данные, позволяющие сравнивать сопротивление изоляции трансформаторов в холодном состоянии, и должен доводить до сведения потребителей коэффициенты для пересчета сопротивлений изоляции, измеренных при температурах, отличных от заводских.

В большинстве случаев сопротивление изоляции и измерение тока утечки дают тождественные результаты в части оценки влажности, и

некоторые энергосистемы отсюда сделали неправильный вывод и отказались от измерения тока утечки. Следует отметить, что ряд местных дефектов в концевой изоляции выявляется только при измерении тока утечки на выпрямленном напряжении. Например, при измерении обмотки 11 кв трансформатора ОДТГ 60000/220 ток утечки оказался 600 мка, что было вызвано трещиной в изоляторе. Изолятор был пробит при напряжении переменного тока 31 кв. Трещина в изоляторе, возможно, не была обнаружена на заводе, так как завод не производит измерения тока утечки.

В практике профилактических испытаний подобные случаи отмечались неоднократно.

**Измерение диэлектрических потерь.** Измерение диэлектрических потерь в изоляции трансформаторов, несомненно, дает много полезного, однако не следует, как это делает А. К. Ашрятов, переоценивать этот метод.

Измерение диэлектрических потерь в условиях действующих подстанций связано с рядом трудностей и погрешностей. Влияние высокого напряжения соседних присоединений и загрязнения поверхности изоляторов вносят существенные погрешности в измерения. Поэтому и рекомендуется производить весь комплекс измерений в целях сопоставления, анализа и взаимной проверки результатов. Точность метода измерений диэлектрических потерь в условиях монтажной площадки или эксплуатации лежит в пределах тех 30 %, которые завод рекомендует как норму для отбракования. Следует признать установки новой инструкции [Л. 1], указывающей абсолютные значения диэлектрических потерь и дающей указания к пересчету для различных температур, более правильными.

При измерении диэлектрических потерь трансформаторов, вновь залитых маслом, отмечались случаи повышенных значений потерь вследствие попадания воздуха в каналы между обмотками. После отстоя, а тем более прогрева трансформатора воздух удалялся и диэлектрические потери принимали нормальные значения.

Следует объяснить наблюдающийся большой разброс в данных, приводимых в разных инструкциях по температурной зависимости диэлектрических потерь.

При увлажнении изоляции диэлектрические потери возрастают; одновременно с этим снижается крутизна нарастания  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от температуры. Наиболее характерные кривые изменения диэлектрических потерь в зависимости от температуры приведены на рис. 5.

Крутизну нарастания диэлектрических потерь с увеличением температуры можно оценить отношением диэлектрических потерь при 70° С к потерям при 20° С. Значения этого отношения, заимствованные из различных источников, приведены в таблице.

Из таблицы и кривых рис. 5 следует, что у сухой изоляции отношение диэлектрических потерь лежит в пределах 8 ... 14, для несколько увлажненной изоляции оно составляет 5 ... 7, а для увлажненной — 3 ... 5.

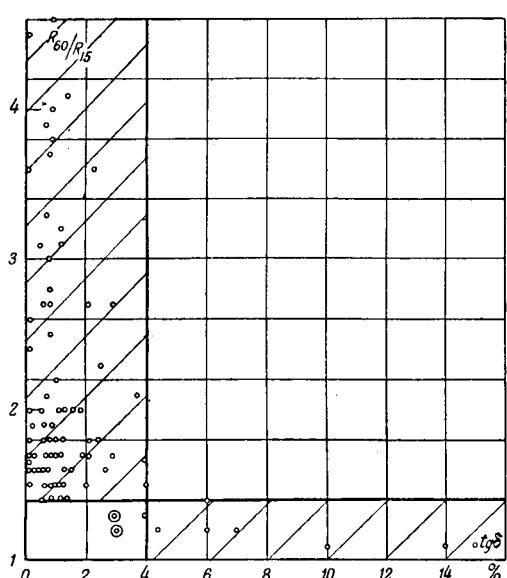


Рис. 4. Коэффициент абсорбции  $R_{60}/R_{15}$  в сопоставлении с  $\operatorname{tg} \delta$  для 110 трансформаторов различных габаритов (измерения производились при температуре 10 ... 30° С).

## Диэлектрические потери в изоляции крупных силовых трансформаторов различной степени увлажненности в зависимости от температуры

Диэлектрические потери $\operatorname{tg} \delta$ , %	Температура в верхних слоях масла, °C						$\frac{\operatorname{tg} \delta_{70}}{\operatorname{tg} \delta_{20}}$	Примечание
	20	30	40	50	60	70		
По опытным данным ВВС Мосэнерго	0,35 2,0 7,0 8,0	0,58 2,9 10 11	0,9 4,0 12 14	1,55 5,4 15 18	2,4 8,0 18 25	4,0 10,0 22 32	11,5 5,0 3,2 4,0	Сухая изоляция средняя } сильно увлажненная
По инструкции Мосэнерго	2,5 3,5	4,0 5,5	6,0 8,0	8,0 12	11 17	18 23	7,2 6,7	
По инструкции ВВС И-5	2,0 3	2,8 4,3	4,0 6,5	5,6 9	8 14	12 20	6,0 6,7	
По инструкции Ленэнерго	2,5 3,5	4,0 5,2	6,0 8,0	8,0 12	11 19	18 30	7,2 8,6	
E1. Eng. <sup>1</sup> , январь, № 1, 1941	2 4	4 6	7,6 9,6	12 14	18 22	28 32	14 8	Сухая изоляция влажная
По огибающей кривой на рис. 5 статьи Ашрятова	0,8	1,0	1,3	1,7	2,4	3,6	4,5	
По временной инструкции МЭС и МЭП, 1954	0,8	—	1,3	—	3,0	4,5	5,6	
Трансформаторное масло разного качества (по данным автора)	3,0 0,3 0,15	5,0 0,5 0,25	7,5 0,7 0,3	14 0,9 0,4	20 1,6 0,45	37 2,1 0,5	12,4 7,0 3,3	плохое среднее хорошее

<sup>1</sup> См. реферат в журнале „Электрические станции“, № 9, 1943.

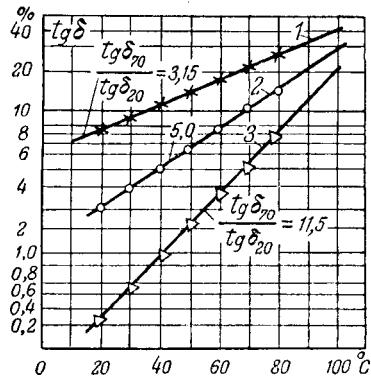


Рис. 5. Диэлектрические потери изоляции трансформаторов в зависимости от температуры и степени увлажненности.

1 и 2 — увлажненная изоляция; 3 — сухая.

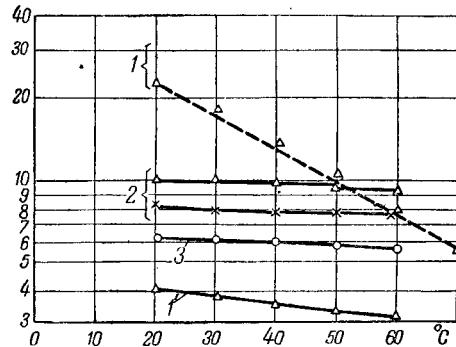


Рис. 6. Чувствительность различных методов испытания изоляции трансформаторов в зависимости от степени увлажненности и температуры верхних слоев масла.

1 и 1' — отношение  $\operatorname{tg} \delta$  увлажненной изоляции к  $\operatorname{tg} \delta$  после сушки;  
2 — отношение значений  $R_{60}$  при тех же условиях;  
3 — то же для  $R_{15}$ .

Отношение потерь сильно колеблется в зависимости от сорта изоляционных материалов и масла. Например, для хорошо очищенного масла типа конденсаторного это отношение составляет 3 ... 4, для большинства трансформаторных масел — 6 ... 7, а для некоторых загрязненных масел, особенно для масел импортных трансформаторов, отношение диэлектрических потерь достигает 12 ... 14.

Если сопоставить методы испытания трансформаторов на увлажнение по их чувствитель-

ности, то разница будет не столь резкой, как это полагает (судя по рис. 5 его статьи) А. К. Ашрятов. Средние значения чувствительности методов измерения диэлектрических потерь и сопротивления изоляции в зависимости от степени увлажнения и температуры приведены на рис. 6.

Следует отметить, что для разной степени увлажненности изоляции трансформаторов отношение  $\operatorname{tg} \delta$  увлажненной изоляции к  $\operatorname{tg} \delta$  ее после сушки имеет большой разброс и лежит в пределах кривых 1—1' рис. 6.

**О косвенных методах оценки увлажненности изоляции.** Рекомендацию завода о проверке на монтажной площадке герметичности прибывших без масла силовых трансформаторов следует осуществлять и принимать во внимание при оценке состояния изоляции трансформаторов. Испытание на пробивное напряжение пробы масла, взятой из трансформатора в холодном состоянии, и пробы, взятой после прогрева, дает ценные сведения о возможном попадании влаги в изоляцию трансформатора. При этом следует учесть, что способ прогрева трансформатора не безразличен: прогрев должен осуществляться путем пропускания через обмотку постоянного тока, переменного рабочего или тока короткого замыкания.

Прогрев индукционным способом не дает желаемых результатов, так как при этом способе влага при нагреве не переходит из твердой изоляции в масло.

Нормы оценки результатов испытания масел, допускающих отклонения только на 15%, очень жестки и не соответствуют точности самого метода. Соблюдение этих норм приведет к ничем не оправданной и бесцельной сушке трансформаторов.

Разброс пробивного напряжения масла зависит от случайного распределения неоднородностей (волокон, влаги и т. п.) в области пробивного промежутка между электродами. На степень разброса пробивного напряжения, кроме механических загрязнений и наличия влаги, оказывает влияние также скорость подъема напряжения при испытании: чем медленнее осуществляется подъем напряжения, тем больше будет разброс пробивных напряжений.

Нормально разброс пробивных напряжений свежих и регенерированных, хорошо очищенных масел лежит в пределах 10 ... 15%, а для масла, взятого из аппаратов и трансформаторов, находившихся в длительной эксплуатации, он составляет 15 ... 30%. Учитывая эти обстоятельства, следует допускать отклонения пробивных напряжений масла в пределах 30 ... 50%.

Можно делать отбор пробы остатков масла со дна трансформатора, но не следует этой пробе придавать очень большого значения: в инструкции МЭП и МЭС правильно указывается,

что если пробивное напряжение остатков масла ниже 30 кв и если оказывается, что пробы масла содержит большое количество механических примесей, то полученные значения пробивного напряжения в дальнейшем не следует принимать во внимание при оценке состояния изоляции трансформаторов.

Требование МТЗ в части нахождения выемной части трансформатора в воздухе ничем не обосновано и неправильно. Если путем прогрева током поддерживать температуру выемной части на несколько градусов выше температуры окружающей среды, то выемную часть можно держать в воздухе столько, сколько это нужно по условиям работы, и изоляция трансформатора при этом не увлажнится. Если же температура выемной части трансформатора, соприкасающейся с воздухом, ниже температуры воздуха, то изоляция трансформатора может в очень короткий промежуток времени сильно увлажниться. В основе рекомендации должны лежать именно эти соображения.

**Выводы.** 1. Для ускорения монтажа и ввода в эксплуатацию неуваженных трансформаторов можно не производить дорогостоящего прогрева трансформаторов на монтажной площадке. Существующие методы испытания изоляции трансформаторов позволяют оценить состояние изоляции, не прибегая к прогреву.

2. Снятие исходных данных характеристик изоляции крупных трансформаторов следует производить в рабочем состоянии в один из дней, когда по условиям нагрузки возможно отключение трансформатора.

3. Для правильной и более полной оценки состояния изоляции трансформаторов необходимо производить полный комплекс измерений характеристик изоляции, принятый в энергосистемах, и по сумме всех показателей оценивать состояния изоляции. Не следует игнорировать неудовлетворительные данные по любому из показателей; дефект следует отыскать и устранить.

#### Литература

1. Временная инструкция № 1/55—1954 г. Технического управления МЭП по монтажу и включению в сеть масляных силовых трансформаторов номинальным напряжением 220 кв, транспортируемых без масла.

[18. 4. 1955]



# Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле

Доктор техн. наук, проф. М. В. КОСТЕНКО

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В практических расчетах влияния воздушных линий высокого напряжения на линии связи, при определении взаимного сопротивления между проводами, приходится учитывать поверхностный эффект в земле.

Методика расчетов взаимного сопротивления разработана и многократно проверена контрольными измерениями на линиях. Однако расчеты иногда оказываются весьма сложными и трудоемкими, в частности в тех случаях, когда линии пересекаются или имеет место косое сближение линий, или, наконец, влияющая линия работает в симметричном режиме. В то же время исходные данные, особенно удельное сопротивление земли, известны лишь приближенно и изменяются в широких пределах. Поэтому, а также вследствие ряда дополнительных допущений получающаяся в результате трудоемких расчетов точность весьма сомнительна.

В данной работе путем некоторого видоизменения подинтегральных функций в формулах Карсона получены приближенные формулы для комплекса и модуля взаимного сопротивления между однопроводными линиями, учитывающие конечную проводимость земли. Эти формулы представлены в виде аналитических зависимостей, допускающих дифференцирование и интегрирование, и из них получены расчетные формулы для взаимных сопротивлений между одно- и многопроводными линиями при параллельном и косом сближении и пересечении.

В диапазоне частот 50 гц—250 кгц погрешность в результате расчетов по формулам для комплексов взаимных сопротивлений не превосходит 6%, а погрешность в расчетах по упрощенным формулам для модулей взаимных сопротивлений — 20%. Эти формулы пригодны для большинства практических расчетов.

**Вносимое землей сопротивление.** Взаимное сопротивление  $Z'_{12}$  между параллельными проводами 1 и 2 (рис. 1) будем определять как коэффициент пропорциональности между током  $I_1$  в проводе 1 и создаваемой этим током в проводе 2 продольной э. д. с. взаимоиндукции  $E_2$ :

$$E_2 = Z'_{12} I_1. \quad (1)$$

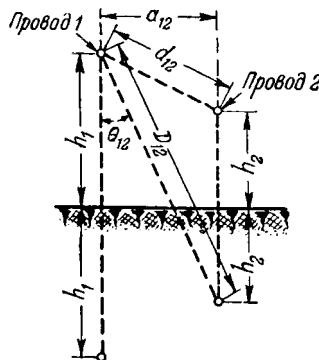


Рис. 1. Схема расположения двух параллельных проводов.

Если потери в проводах и земле не очень велики, а поперечные размеры  $a_{12}$ ,  $h_1$  и  $h_2$  (рис. 1) значительно меньше длины волн, то сопротивление  $Z_{12}$  можно представить в виде суммы:

$$Z_{12} = j\omega M_{12} + Z'_{12}, \quad (2)$$

где  $M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{12}}{a_{12}}$  — коэффициент взаимоиндукции между проводами 1 и 2 при удельном сопротивлении земли  $\rho_3 \rightarrow 0$ ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость воздуха, проводов и земли<sup>1</sup>;

$Z'_{12}$  — вносимое землей сопротивление, учитывающее конечную проводимость земли и влияние поверхностного эффекта.

Пренебрегая токами смещения в земле, для простейшего случая однородной земли ( $\rho_3 = \text{const}$ ;  $\mu_3 = \mu_0$ ) с плоской поверхностью, сопротивление  $Z'_{12}$  можно определить по формулам Карсона<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} Z'_{12} &= \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2e^{-\lambda(h_1+h_2)}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \beta^2}} \cos \lambda a_{12} d\lambda = \\ &= \frac{\omega\mu_0}{2\pi} (P_{12} + jQ_{12}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\beta = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho_3}} = \frac{1+j}{b_3}$  — параметр земли;

$b_3 = \sqrt{\frac{2\rho_3}{\omega\mu_0}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}}$  — глубина в метрах, проникнув на которую электромагнитная волна затухнет в  $e = 2,72$  раза; будем  $b_3$  сокращенно называть глубиной проникновения;

$P_{12}$  и  $Q_{12}$  — вещественная и мнимая части интегралов для  $Z'_{12}$ ;  $P_{12}$  и  $Q_{12}$  являются сложными функциями параметра  $s_k = \frac{\beta D_{12}}{\sqrt{j}}$  =  $\frac{D_{12}}{b_3} \sqrt{2}$  и угла  $\theta_{12}$  (рис. 1);

$h_1$ ,  $h_2$ ,  $a_{12}$  и  $D_{12}$  — поперечные размеры (рис. 1);

$\rho_3$  — удельное сопротивление земли, ом·м.

При малых значениях параметра  $s_k$  ( $s_k < 0,25$ ), т. е. низких частотах и малых расстояниях  $D_{12}$ , вещественная и мнимая части  $P_{12}$  и  $Q_{12}$

<sup>1</sup> В работе принята система единиц МКСА [Л. 1].

<sup>2</sup> В работе Карсона [Л. 2]  $Z'_{12} = \frac{\omega\mu_0}{\pi} (P_k + jQ_k)$ , а значения  $P_k$  и  $Q_k$  в 2 раза меньше соответствующих значений  $P_{12}$  и  $Q_{12}$ .

выражаются по Карсону в виде быстро сходящихся рядов:

$$\begin{aligned} P_{12} &= \frac{\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{3} s_k \cos \theta_{12} + \\ &+ \frac{1}{8} s_k^2 \left[ \left( 1 + \ln \frac{1,44}{s_k} \right) \cos 2\theta_{12} + \theta_{12} \sin 2\theta_{12} \right] + \dots; \\ Q_{12} &= \ln \frac{1,86}{s_k} + \frac{\sqrt{2}}{3} s_k \cos \theta_{12} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

При больших значениях параметра  $s_k$  ( $s_k > 5$ ), т. е. высоких частотах, получается сравнительно простое решение в виде асимптотических рядов:

$$\left. \begin{aligned} P_{12} &\sim \sqrt{2} \frac{\cos \theta_{12}}{s_k} - 2 \frac{\cos 2\theta_{12}}{s_k^2} + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\cos 3\theta_{12}}{s_k^3} + \dots; \\ Q_{12} &\sim \sqrt{2} \frac{\cos \theta_{12}}{s_k} - \sqrt{2} \frac{\cos 3\theta_{12}}{s_k^3} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для промежуточных значений параметра  $s_k$  значения  $P_{12}$  и  $Q_{12}$  определяются по кривым.

Ряды и кривые Карсона удобны для вычисления взаимного сопротивления между параллельными проводами. Однако в расчетах влияния трехфазных линий электропередачи на линии связи приходится вычислять разности между приблизительно одинаковыми взаимными сопротивлениями, и при пользовании кривыми в этом случае могут получиться весьма большие погрешности. Кривые Карсона не позволяют вычислить взаимное сопротивление и индуктивное влияние в случае пересечения линии электропередачи с линией связи. Поэтому было бы желательно получить приближенные выражения для интеграла (3) в виде элементарных аналитических функций, допускающих как прямое вычисление  $Z'_{12}$ , так и дифференцирование или интегрирование.

Умножим числитель и знаменатель подинтегральных функций в выражении (3) на  $\sqrt{\lambda^2 + \beta^2} - \lambda$  и представим  $\cos \lambda a_{12}$  в показательной форме. Тогда получим:

$$Z'_{12} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\beta} \left[ \sqrt{\frac{\lambda^2}{\beta^2} + 1} - \frac{\lambda}{\beta} \right] (e^{-\lambda p_1} + e^{-\lambda p_2}) d\lambda, \quad (6)$$

где  $p_1 = h_1 + h_2 + ja_{12}$ ,  $p_2 = h_1 + h_2 - ja_{12}$ .

Благодаря экспоненциальным функциям под интегралами последние сходятся. Несмотря на то, что верхним пределом  $\lambda$  является  $\infty$ , величина интегралов определяется в основном областью малых  $\lambda \leq \frac{5}{h_1 + h_2}$ .

Полученные интегралы не удается взять из-за того, что функции в квадратных скобках имеют вид:

$$F_1(z) = \sqrt{z^2 + 1} - z,$$

где  $z = \frac{\lambda}{\beta}$ .

Попытаемся заменить функцию  $F_1(z)$  функцией  $F_2(z)$ , достаточно близкой к  $F_1(z)$  при малых значениях  $z$  и стремящейся к тому же пределу при  $|z| \rightarrow \infty$ . После ряда попыток такую функцию удалось подобрать; она имеет следующий вид:

$$F_2(z) = \frac{1}{2z} (1 - e^{-2z}).$$

В пределах круга с радиусом  $|z| < 1$  функции  $F_1(z)$  и  $F_2(z)$  имеют разложения:

$$F_1(z) = 1 - z + \frac{1}{2} z^2 - \dots;$$

$$F_2(z) = 1 - z + \frac{2}{3} z^2 - \dots$$

При  $|z| \rightarrow \infty$  они стремятся к нулю, так же как  $\frac{1}{2z}$ . Поэтому можно ожидать, что замена под интегралом функции  $F_1(z)$  функцией  $F_2(z)$  не приведет к существенной ошибке в величине самого интеграла.

Произведя в формуле (6) указанную замену, получим [Л. 3, стр. 166]:

$$\begin{aligned} Z'_{12} &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left[ \left( 1 + \frac{2}{\beta p_1} \right) \left( 1 + \frac{2}{\beta p_2} \right) \right] = \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left[ 1 + \frac{4\cos \theta_{12}}{\beta D_{12}} + \frac{4}{\beta^2 D_{12}^2} \right] = \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{B_{12}}{D_{12}} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} (P'_{12} + jQ'_{12}), \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$B_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + h_s^2}; \quad h_s = h_1 + h_2 + b_s(1 - j).$$

Учитывая, что  $\beta D_{12} = s_k \sqrt{j}$ , при малых  $s_k$  получим:

$$\begin{aligned} P'_{12} + jQ'_{12} &= \frac{j}{2} \ln \left( 1 + \frac{4\cos \theta_{12}}{s_k \sqrt{j}} + \frac{4}{js_k^2} \right) = \\ &= j \ln \frac{2}{s_k \sqrt{j}} + j \ln \left( 1 + s_k \cos \theta_{12} \sqrt{j} + \frac{js_k^2}{4} \right). \end{aligned}$$

Разложив  $P'_{12} + jQ'_{12}$  в ряды по степеням малого  $s_k$  и разделив вещественные и мнимые, получим:

$$\left. \begin{aligned} P'_{12} &= \frac{\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{4} s_k \cos \theta_{12} + \\ &+ \frac{1}{8} s_k^2 \cos 2\theta_{12} + \dots; \\ Q'_{12} &= \ln \frac{2}{s_k} + \frac{\sqrt{2}}{4} s_k \cos \theta_{12} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Разложив  $P'_{12} + jQ'_{12}$  в ряды по степеням малого  $\frac{1}{s_k}$  и разделив вещественные и мнимые, для больших  $s_k$  получим:

$$\left. \begin{aligned} P'_{12} &= \sqrt{2} \frac{\cos \theta_{12}}{s_k} - 2 \frac{\cos 2\theta_{12}}{s_k^2} + \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\cos 3\theta_{12}}{s_k^3} + \dots; \\ Q'_{12} &= \sqrt{2} \frac{\cos \theta_{12}}{s_k} - \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\cos 3\theta_{12}}{s_k^3} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Сравнивая полученные ряды (8) и (9) с приведенными выше рядами (4) и (5), видим, что как при малых, так и особенно при больших значениях параметра  $s_k$  получается достаточное для практических расчетов их совпадение.

Для оценки погрешности, которую дают формулы (7) при промежуточных значениях параметра  $s_k$ , по этим формулам вычислены  $P'_{12}$  и  $Q'_{12}$  при  $\theta_{12} = 0; \frac{\pi}{8}; \frac{\pi}{4}; \frac{3\pi}{8}$  и  $s_k = 0,5; 1; 2; 3; 4$  и 5. Сравнение полученных значений  $P'_{12}$  и  $Q'_{12}$  с соответствующими значениями  $P_{12}$  и  $Q_{12}$ , по данным Карсона, показало, что относительная погрешность не превосходит 6% для  $ReZ'_{12}$  и  $ImZ'_{12}$  и 4% для  $|Z'_{12}|$ .

Таким образом, формула (7) дает возможность вычислить с достаточной для практических расчетов точностью вносимые землей сопротивления при всех значениях параметра  $s_k$ , при которых справедливы основные формулы (3).

При высоком удельном сопротивлении земли (свыше 1 000  $\text{ом}\cdot\text{м}$ ) и высокой частоте, а также большом расстоянии между проводами формулы Карсона (3) и приближенная формула (7) могут дать значительные погрешности, так как все они не учитывают влияния продольного поля в воздухе, поперечного электрического поля в земле и токов смещения в земле. Решение уравнений поля с учетом этих факторов получено Г. А. Гринбергом и Б. Э. Бонштедтом [Л. 4]. Однако его пока что не удается представить в простой форме, удобной для практических расчетов, и это потребует дальнейших исследований.

**Взаимное сопротивление между однопроводными линиями.** Воспользовавшись формулой (2) и разложив  $B_{12}$  в формуле (7) на множители, получим

$$B_{12}^2 = [(h_1 + h_2 + b_3) - j(b_3 + a_{12})][(h_1 + h_2 + b_3) - j(b_3 - a_{12})];$$

после преобразований получим:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{12}}{a_{12}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{B_{12}}{D_{12}} = \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \frac{a_{12}^2 + b_3^2}{a_{12}^2 + (h_1 - h_2)^2} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \times \\ &\times \ln \frac{[(h_1 + h_2 + b_3) - j(b_3 + a_{12})][(h_1 + h_2 + b_3) - j(b_3 - a_{12})]}{d_{12}^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Разделив в формуле (10) вещественные и мнимые, получим:

$$Z_{12} = r_{12} + jx_{12};$$

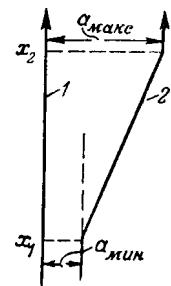
$$r_{12} = 4\pi \cdot 10^{-7} f \frac{\alpha_{12} + \beta_{12}}{2};$$

$$x_{12} = 4\pi \cdot 10^{-7} f \ln \frac{h_1 + h_2 + b_3}{d_{12} \sqrt{\cos \alpha_{12} \cos \beta_{12}}}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{12} = \arctg \frac{b_3 + a_{12}}{h_1 + h_2 + b_3}$ ;  $\beta_{12} = \arctg \frac{b_3 - a_{12}}{h_1 + h_2 + b_3}$ .

Рис. 2. Схема участка косого сближения линии электропередачи и линии связи.

1 — линия электропередачи; 2 — линия связи.



Формулы (10) и (11) допускают сравнительно простое дифференцирование и интегрирование. Поэтому из них можно получить расчетные формулы для взаимных сопротивлений между одно- или многопроводными линиями при косых сближениях и пересечениях. Например, если пренебречь затуханием и изменением фазы влияющего тока в пределах рассматриваемого участка, то выражение для суммарного взаимного сопротивления (в омах) между двумя прямолинейными однопроводными линиями с учетом влияния земли на всем косом участке сближения (рис. 2) может быть получено в следующем виде:

$$\begin{aligned} Z_{\text{кос}} &= \int_{x_1}^{x_2} Z_{12} dx = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi \operatorname{tg} \alpha} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \ln \frac{a_{12}^2 + b_3^2}{a_{12}^2 + (h_1 - h_2)^2} da_{12} = \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi \operatorname{tg} \alpha} [F(a_{\max}) - F(a_{\min})], \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} F(a) &= a \ln \frac{a^2 + b_3^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2} + 2h_3 \operatorname{arctg} \frac{a}{h_3} - \\ &- 2(h_1 - h_2) \operatorname{arctg} \frac{a}{h_1 - h_2}. \end{aligned}$$

$\alpha$  — угол между линиями.

Аналогично выражение для взаимного сопротивления на участке пересечения ( $a_{\min} = -a_{\max}$ ) будет иметь следующий вид:

$$Z_{\text{пер}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi \operatorname{tg} \alpha} F(a_{\max}). \quad (13)$$

Расчет по формулам (10) ... (13) проще, чем по кривым Карсона, но для обычных практических вычислений он все же слишком трудоемок. В то же время удельное сопротивление земли известно весьма приближенно, ширина сближения изменяется в широких пределах, а при повышенных и высоких частотах существенно изменяются также фазы токов и э. д. с. вдоль линии. В связи с этим на практике приходится ограничиться лишь весьма приближенными расчетами влияния линий высокого напряжения на линии связи по модулям взаимных сопротивлений.

Для вычисления модулей взаимных сопротивлений с учетом влияния земли желательно иметь возможно более простые формулы, основанные на таких не строгих, но наглядных физических представлениях, как, например, представление об «уровне нулевого потенциала»<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Вследствие частичного проникновения электромагнитного поля в землю взаимное сопротивление несколько возрастает. Это увеличение учитывается тем, что уровень нулевого потенциала принимается условно на некоторой

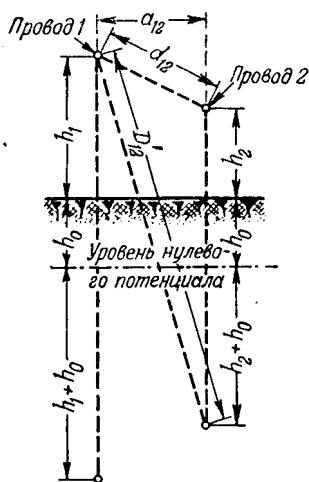


Рис. 3. Схема к расчету модуля взаимного сопротивления

Одна из таких формул для вычисления модуля взаимного сопротивления ( $\text{ом}/\text{км}$ ) между параллельными однопроводными линиями при частоте  $50 \text{ гц} - 250 \text{ кгц}$  имеет следующий вид:

$$|Z_{12}| \approx \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{D'_{12}}{d_{12}} = f \frac{1}{346} \lg \frac{D'_{12}}{d_{12}}, \quad (14)$$

где  $D'_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + (h_1 + h_2 + 2h_0)^2}$  — приведенное расстояние (в метрах) от провода 1 до зеркального изображения провода 2 в плоскости уровня нулевого потенциала (рис. 3);

$h_0 = 0.8b_s = 400 \sqrt{\frac{p_s}{f}}$  — глубина (в метрах) уровня нулевого потенциала под поверхностью земли.

В случае косого сближения линий можно воспользоваться этой же формулой, если в качестве расчетной ширины эквивалентного параллельного сближения принимать<sup>4</sup>

$$a_{12} = \frac{a_{\max} + 2a_{\min}}{3}, \quad (15)$$

где  $a_{\max}$  и  $a_{\min}$  — ширина сближения в начале и конце косого участка сближения ( $a_{\max} \leq 5a_{\min}$ ).

глубине  $h_0$  под фактической поверхностью земли, а земля ниже уровня нулевого потенциала считается сверхпроводящей. Глубина  $h_0$  зависит от удельного сопротивления земли  $p_s$  и частоты  $f$ . Кроме того, для получения правильных модулей  $|Z_{12}|$  приходится брать несколько различных  $h_0$  при разных ширинах сближения  $a_{12}$ . Однако это изменение оказывается сравнительно небольшим и можно выбрать некоторое среднее значение  $h_0$ , общее для всех значений  $a_{12}$ , представляющих практический интерес. Выбранное в данной работе значение  $h_0 = 0.8b_s$  дает в большинстве случаев несколько (до 20%) преувеличенные значения модулей  $|Z_{12}|$  по сравнению со значениями, получающими по формулам и кривым Карсона.

<sup>4</sup> Можно было бы воспользоваться также формулой  $a_{12} = \sqrt{a_{\max} a_{\min}}$ , рекомендованной «Правилами ограждения» [Л. 5]. Однако сравнительные расчеты показывают, что формула (15) справедлива при  $a_{\max} \leq 5a_{\min}$  и даже при пересечении, когда  $a_{\min} = 0$  (при некоторых не очень жестких ограничениях для  $a_{\max}$ ), в то время как формула «Правил ограждения» справедлива только при  $a_{\max} \leq 3a_{\min}$ .

Взаимное сопротивление для случая пересечения можно вычислить по формулам (14) и (15) так же, как для эквивалентного параллельного сближения, причем  $a_{\min} = 0$ , а  $a_{\max}$  — ширина сближения до и после пересечения. Ширина сближения  $a_{\max}$  должна удовлетворять неравенствам

$$h_1 + h_2 + 2h_0 \geq a_{\max} \geq 4(h_1 - h_2).$$

**Взаимное сопротивление между многопроводными линиями.** На практике ширина сближения между линиями обычно значительно превосходит как высоту провода над поверхностью земли, так и расстояния между отдельными проводами каждой из линий. Можно без большой погрешности значительно упростить расчеты, если пренебречь обратным влиянием линии связи на линию электропередачи и вычислить э. д. с., или разности э. д. с., индуцированных в линии связи токами линии электропередачи.

Почти каждый случай сближения может быть сведен к одному или нескольким типичным случаям сближения одно-, двух- или трехпроводной линии электропередачи с одно- или двухпроводной линией связи. Рассмотрим эти типичные случаи.

**Взаимное сопротивление между двухпроводной и однопроводной линиями.** Если в двух проводах линии электропередачи<sup>5</sup> протекают равные, но противоположные направленные токи ( $I_2 = -I_1$ ), то взаимное сопротивление  $Z_{121}$  будем определять как коэффициент пропорциональности между током  $I_1$  и суммарной продольной э. д. с.  $\dot{E}_1$ , индуцированной токами  $I_1$  и  $I_2$ :

$$\dot{E}_1 = (Z_{11} \cdot I_1 + Z_{21} I_2) l_1 = (Z_{11} - Z_{21}) I_1 l_1 = Z_{121} I_1 l_1.$$

Взаимное сопротивление между однопроводной линией электропередачи и двухпроводной линией связи определяем как коэффициент пропорциональности между током  $I_1$  в проводе линии электропередачи и разностью продольных э. д. с.  $\dot{E}_1 - \dot{E}_{11}$ , индуцированных этим током в проводах линии связи:

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_{11} = (Z_{11} I_1 - Z_{11} I_1) l_1 = (Z_{11} - Z_{11}) I_1 l_1 = Z_{111} I_1 l_1.$$

Если пренебречь  $d_{12}^2$ ,  $d_{11}^2$  и  $(h_1 - h_1)^2$ , так как они малы по сравнению с  $a^2$ , то при параллельном сближении и расположении проводов линии связи или линии электропередачи в одной горизонтальной плоскости получим:

$$Z_{121} \approx \frac{\partial Z_{11}}{\partial a} d_{12} = -\frac{j \omega \mu_0 d_{12}}{4\pi} \left[ \frac{2a}{a^2 + h_s^2} - \frac{2a}{a^2 + (h_1 - h_1)^2} \right] \approx \frac{j \omega \mu_0 d_{12}}{2\pi a} \frac{h_s^2 - (h_1 - h_1)^2}{a^2 + h_s^2}. \quad (16)$$

<sup>5</sup> Провода линии электропередачи обозначаются индексами 1, 2 и 3, а провода линии связи — индексами I и II.

Аналогично  $Z_{11\text{II}} \approx -\frac{\partial Z_{11\text{II}}}{\partial a} d_{1\text{II}}$ . Положив здесь  $h_s = h_1 + h_1 + b_s(1-j)$  и разложив на множители, получим:

$$Z_{121} = Z_{11\text{II}} = \frac{\omega \mu_0 d}{2\pi a} \left( \frac{b_s}{h_1 + h_1 + b_s} \right)^2 \times \\ \times \frac{\cos \alpha_{12} \cos \beta_{12}}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2} (\sin A + j \cos A), \quad (17)$$

где  $a$  — ширина сближения между осями линии;  $d$  — расстояние между проводами линии электропередачи или линии связи;

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg \frac{b_s}{2h_1 + b_s}; \\ \alpha_2 &= \arctg \frac{b_s}{2h_1 + b_s}; \\ A &= \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_{12} - \beta_{12}; \\ \alpha_{12} &= \arctg \frac{b_s + a}{h_1 + h_1 + b_s}; \\ \beta_{12} &= \arctg \frac{b_s - a}{h_1 + h_1 + b_s}. \end{aligned}$$

При расчете по модулям, после аналогичных преобразований из формулы (14) получим в ом/км:

$$|Z_{121}| = |Z_{11\text{II}}| \approx \frac{fd}{200a} \cdot \frac{(h_1 + h_0)(h_1 + h_0)}{a^2 + (h_1 + h_1 + 2h_0)^2}. \quad (18)$$

При косом сближении двухпроводной линии электропередачи и однопроводной линии связи среднее взаимное сопротивление, отнесенное к единице длины линии электропередачи,

$$\begin{aligned} Z_{121}^{(c)} &= \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} Z_{121} dx = \\ &= -\frac{d_{12}}{a_{\max} - a_{\min}} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{\partial Z_{11\text{II}}}{\partial a} da = \\ &= d_{12} \frac{Z_{11}(a_{\min}) - Z_{11}(a_{\max})}{a_{\max} - a_{\min}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Аналогично для случаев косого сближения однопроводной линии электропередачи и двухпроводной линии связи получим:

$$Z_{11\text{II}}^{(c)} = \frac{d_{1\text{II}}}{\cos \alpha} \cdot \frac{Z_{11}(a_{\min}) - Z_{11}(a_{\max})}{a_{\max} - a_{\min}}, \quad (20)$$

где  $\alpha$  — угол между линией электропередачи и линией связи;

$Z_{11}(a)$  — взаимные сопротивления между однопроводными линиями в начале ( $a = a_{\min}$ ) и конце ( $a = a_{\max}$ ) косого сближения, вычисленные по формулам (11) или (14).

При расположении проводов линии электропередачи или линии связи в одной горизонтальной плоскости  $Z_{121}$  и  $Z_{11\text{II}}$  на участке прямолинейного пересечения ( $a_{\min} = -a_{\max}$ ) практически равны нулю, так как э. д. с. индукции или их разности справа и слева от линии электропередачи взаимно компенсируются.

При иных расположениях проводов формулы усложняются. Например, если пренебречь  $d_{1\text{II}}^2 = (h_1 - h_{1\text{II}})^2$ , так как оно мало по сравнению с  $h_c^2 = \left(\frac{h_1 + h_{1\text{II}}}{2}\right)^2$ , и  $(h_1 - h_c)^2$ , так как оно мало по сравнению с  $a^2$ , то при расположении проводов линии связи в вертикальной плоскости получим: при параллельном сближении

$$|Z_{11\text{II}}| \approx \frac{\partial Z_{11}}{\partial h_1} d_{1\text{II}} \approx \frac{fd_{1\text{II}}(h_1 + h_0)}{400a^2} \times \\ \times \frac{a^2 + (h_1 - h_c)(h_1 + h_c + 2h_0)}{a^2 + (h_1 + h_c + 2h_0)^2};$$

при пересечении ( $a_{\min} = -a_{\max}$ )

$$|Z_{11\text{II}}| \approx \frac{fd_{1\text{II}}}{800a_{\max}} \left[ \arctg \frac{a_{\max}}{h_1 - h_c} + \arctg \frac{a_{\max}}{h_1 + h_c + 2h_0} \right].$$

Взаимное сопротивление между трех- и однопроводной линиями. Если в проводах трехпроводной линии электропередачи протекают одинаковые по величине и сдвинутые по фазе на  $120^\circ$  токи  $I_1 = \frac{-1+j\sqrt{3}}{2} I_2$ ;  $I_2$  и  $I_3 = \frac{-1-j\sqrt{3}}{2} I_2$ , то взаимное сопротивление  $Z_{1231}$  между этой линией и однопроводной линией связи будем определять как коэффициент пропорциональности между током  $I_2$  и суммарной продольной э. д. с.  $\dot{E}_1$ , индукированной в линии связи токами  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ :

$$\dot{E}_1 = (Z_{11} I_1 + Z_{21} I_2 + Z_{31} I_3) I_1 = Z_{1231} I_2 I_1,$$

где

$$Z_{1231} = \frac{2Z_{21} - Z_{11} - Z_{31}}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} (Z_{11} - Z_{31}).$$

Произведенный анализ показал, что в практических расчетах при расположении проводов линии электропередачи в горизонтальной плоскости при  $a \geq 10d_{13}$  можно без существенной погрешности пренебречь  $2Z_{21} - Z_{11} - Z_{31}$ , так как оно мало по сравнению с  $j\sqrt{3}(Z_{11} - Z_{31})$ . При этом взаимное сопротивление  $Z_{1231}$  можно вычислить по формуле

$$Z_{1231} \approx j \frac{\sqrt{3}}{2} Z_{131},$$

где  $Z_{131}$  — взаимное сопротивление, вычисленное по формулам (17)...(20), в которых за  $d_{12}$  принимается расстояние между крайними проводами линии электропередачи  $d_{13}$ . В частности, при параллельном сближении получим:

$$|Z_{1231}| \approx \frac{fd_{13}}{230a} \cdot \frac{(h_1 + h_0)(h_1 + h_0)}{a^2 + (h_1 + h_1 + 2h_0)^2}.$$

Взаимное сопротивление между двухпроводными линиями будем определять как коэффициент пропорциональности между током  $I_1$  ( $I_2 = -I_1$ ) в проводе линии электропередачи и разностью э. д. с., инду-

тированных в двух проводах линии связи токами  $I_1$  и  $I_2$ :

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_{II} = (I_1 Z_{1I} + I_2 Z_{2I} - I_1 Z_{1II} - I_2 Z_{2II}) l_1 = \\ = I_1 l_1 Z_{12I\text{II}},$$

где  $Z_{12I\text{II}} = Z_{1I} - Z_{2I} - Z_{1II} + Z_{2II}$ .

Если пренебречь  $d_{1II}^2$ ,  $d_{12}^2$  и  $(h_1 - h_2)^2$ , так как они малы по сравнению с  $a^2$ , то приближенно формулы для  $Z_{12I\text{II}}$  можно получить аналогично тому, как они были получены в предыдущих случаях. В частности, для линий с расположением проводов в горизонтальных плоскостях получаются следующие формулы:

при параллельном сближении

$$[(D'_{1I})^2 = a^2 + (h_1 + h_2 + 2h_0)^2] \\ |Z_{12I\text{II}}| = \frac{f}{200} \cdot \frac{d_{12} d_{1II}}{a^2} \cdot \frac{(h_1 + h_0)(h_1 + h_2)}{(D'_{1I})^2} \left( 1 + \frac{2a^2}{(D'_{1I})^2} \right);$$

при косом сближении (18)

$$|Z_{12I\text{II}}| = \frac{d_{1II}}{\cos \alpha} \cdot \frac{Z_{12}(a_{\min}) - Z_{12}(a_{\max})}{a_{\max} - a_{\min}};$$

при пересечении ( $a_{\max}$  — ширина сближения до и после пересечения)

$$|Z_{12I\text{II}}| = \frac{f}{200} \cdot \frac{d_{12} d_{1II}}{a_{\max}^2 \cos \alpha} \cdot \frac{(h_1 + h_0)(h_1 + h_2)}{a_{\max}^2 + (h_1 + h_2 + 2h_0)^2}.$$

**Выводы.** 1. В практических расчетах электрических цепей, связанных с протеканием токов в земле, в частности в расчетах индуктивного влияния линий высокого напряжения на цепи

◊ ◊ ◊

## Максимальное значение к. п. д. четырехполюсника

Инж. Б. А. ХАНОВ

Научно-исследовательский институт Министерства связи

Аналитическое решение задачи определения максимального к. п. д. четырехполюсника было дано К. М. Поливановым [Л. 1]. Цель настоящей заметки — изложить геометрическое решение, любопытное само по себе и приводящее к предельно простому выражению для максимального к. п. д.

Имея систему общих уравнений линейного четырехполюсника

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

напишем равенства для его входного сопротивления и отношения тока нагрузки к входному току:

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{AZ_2 + B}{CZ_2 + D}; \quad \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{1}{CZ_2 + D}. \quad (2)$$

Результат подстановки этих равенств в выражение для к. п. д. передачи энергии<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Символ  $\partial$  указывает на действительную часть, символ  $m$  — на мнимую часть комплекса.

связи, необходимо учитывать влияние поверхностного эффекта в земле.

2. В таких расчетах важно правильно оценить порядок величины сопротивления и нет необходимости стремиться к высокой точности результатов. Более того, так как исходные данные и особенно удельное сопротивление земли обычно известны весьма приближенно, а также вследствие ряда дополнительных допущений получающаяся в результате трудоемких расчетов точность весьма сомнительна.

3. В работе получены сравнительно простые приближенные расчетные формулы для взаимных сопротивлений между однопроводными линиями, учитывающие конечную проводимость земли и справедливые с погрешностью до 6 ... 20% при частотах 50 Гц—250 кГц.

4. На основе этих формул получены расчетные формулы для взаимных сопротивлений между наиболее характерными одно- и многопроводными линиями при параллельном и косом сближении и пересечении.

### Литература

1. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1954.

2. J. R. Carson. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell Syst. Techn. J. стр. 539, 1926.

3. И. М. Рыжик и И. С. Градштейн. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений ГТТИ, 1951.

4. Г. А. Гринберг и Б. Э. Бонштедт. Основы точной теории волнового поля линий электропередачи. ЖТФ, стр. 67, 1954.

5. Правила ограждения сооружений связи и сигнализации от вредного действия установок сильного тока. Госэнергоиздат, 1944.

[13. 11. 1954]

$$\eta = \frac{I_2 I_2^*(Z_2)_{\partial}}{I_1 I_1^*(Z_1)_{\partial}} = \frac{R_2}{[(AZ_2 + B)(C^*Z_2^* + D^*)]_{\partial}}, \quad (3)$$

в развернутой форме будет:

$$\eta = \frac{R_2}{(AC^*)_{\partial}(R_2^2 + X_2^2) + (AD^* + BC^*)_{\partial}R_2 - (AD^* - BC^*)_m X_2 + (BD^*)_{\partial}}. \quad (4)$$

Если принять  $R_2$  и  $X_2$  за абсциссу и ординату плоскости комплексного сопротивления нагрузки  $Z_2$ , то нетрудно заметить, что выражение (4) представляет собой уравнение окружности в этой плоскости. Если, далее, привести его к канонической форме:

$$(R_2 - R_0)^2 + (X_2 - X_0)^2 = r^2, \quad (5)$$

то значения координат центра и квадрата радиуса будут равны соответственно:

$$R_0 = \frac{1/\eta - (AD^* + BC^*)_{\partial}}{2(AC^*)_{\partial}}; \quad X_0 = \frac{(AD^* - BC^*)_m}{2(AC^*)_{\partial}}; \quad (6)$$

$$\rho^2 = \frac{[1/\eta - (AD^* + BC^*)_\partial]^2 + (AD^* - BC^*)_\mu^2 - 4(AC^*)_\partial(BD^*)_\partial}{4(AC^*)_\partial^2}. \quad (7)$$

В силу следующего тождества, справедливого для линейного пассивного четырехполюсника и легко проверяемого непосредственным вычислением:

$$(AD^* + BC^*)_\partial^2 + (AD^* - BC^*)_\mu^2 - 4(AC^*)_\partial(BD^*)_\partial = \\ = (AD - BC)(A^*D^* - B^*C^*) = 1, \quad (8)$$

выражение (7) может быть заменено более простым:

$$\rho^2 = \frac{1/\eta^2 - 2/\eta(AD^* + BC^*)_\partial + 1}{4(AC^*)_\partial^2}. \quad (9)$$

Уравнения (5), (6) и (9), содержащие к. п. д.  $\eta$  в неявном виде, говорят о том, что в комплексной плоскости сопротивления нагрузки  $Z_2$  произвольный четырехполюсник характеризуется семейством окружностей, координаты центров и радиусы которых суть функции от к. п. д.  $\eta$  и комплексных параметров  $A, B, C$  и  $D$ . Центры окружностей лежат на прямой линии, параллельной оси абсцисс  $R_2$ .

Равенство нулю выражения (9), равного квадрату радиуса окружности, соответствует максимальному значению к. п. д., однаковому для обоих направлений передачи энергии через четырехполюсник. Решение образованного правой частью (9) квадратного уравнения относительно  $\eta$  дает максимальный к. п. д., выраженный непосредственно через коэффициенты общих уравнений четырехполюсника:

$$\eta_{\max} = (AD^* + BC^*)_\partial - \sqrt{(AD^* + BC^*)_\partial^2 - 1}. \quad (10)$$

◊ ◊ ◊

## Электрокерамика, стекло и органические пластические материалы

*Доктор техн. наук, проф. Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ,  
кандидат техн. наук П. А. МУЛЯР  
Ленинград*

Электротехника сейчас располагает весьма богатой и разнообразной номенклатурой хорошо изученных изоляционных материалов, свойства которых характеризуются точными количественными показателями. Учение об электроизолирующих материалах выросло в обширную отрасль знания, опирающуюся на физику, механику, химию и ряд других наук. При исследовании изолирующих материалов используются новейшие приемы химического, рентгеновского, спектрального анализа. В число современных изолирующих материалов входят многочисленные твердые, жидкые и газообразные вещества, природные и искусственно синтезированные, неорганического и органического состава. Новейшей керамике — радиокерамике, стеклу и особенно органическим пластическим массам были приданы разнообразные и во многих случаях строго предусмотренные свойства.

4\*

Для придания последней формуле более простого и симметричного вида воспользуемся тождеством

$$(AD - BC)_\partial = 1 = AD - BC. \quad (11)$$

Затем заменим единицу в (10) квадратом левой части (11) и произведем разложение разности квадратов. Если, далее, выразим комплексные коэффициенты через их компоненты:

$$\begin{aligned} A &= A_1 + jA_2; & C &= C_1 + jC_2; \\ B &= B_1 + jB_2; & D &= D_1 + jD_2, \end{aligned} \quad (12)$$

то получим выражение, свертываемое в квадрат разности:

$$\eta_{\max} = (\sqrt{A_1 D_1 + B_2 C_2} - \sqrt{A_2 D_2 + B_1 C_1})^2. \quad (13)$$

Более простую формулу, выражющую максимальное значение к. п. д. четырехполюсника непосредственно через компоненты коэффициентов общих уравнений, получить, очевидно, невозможно.

Пользуясь случаем, автор приносит искреннюю благодарность проф. К. М. Поливанову за тему и внимание.

### Литература

1. К. М. Поливанов. О коэффициенте полезного действия передачи энергии через четырехполюсник. Электричество, стр. 42—44, № 12, 1949.
2. Г. А. Чаянов. О наибольшей величине к. п. д. четырехполюсника. Электричество, стр. 59, № 1, 1952.  
[17. I. 1955]

Здесь будут рассмотрены две группы новых и весьма важных электроизолирующих материалов, а именно электрокерамика и органические пластические массы, а также стекло, которое благодаря большим достижениям в области его технологии приобрело совершенно новые свойства и получило разнообразные новые применения.

**Керамика и радиокерамика.** Десятки лет в электротехнике использовался только один вид керамики — обычный или электротехнический фарфор. Из этого фарфора и сейчас изготавливают такие электроустановочные изделия, как штыревые, подвесные, опорные, проходные изоляторы. Обычный изоляторный фарфор долгое время в достаточной мере удовлетворял требованиям электротехники, что и явилось основной причиной его замедленного прогресса. Однако непрерывное повышение в последнее время рабочих напряжений и мощностей энергосистем, а также развитие

высокочастотной техники предъявили к электротехническому фарфору новые и все более растущие требования как в части его электрических свойств, так и механической прочности. Старая электротехническая керамика должна была уступить место новой керамике, одновременно стала интенсивно развиваться радиокерамика.

Радиотехника и другие области высокочастотной техники выдвинули на первое место проблему создания особо качественных электроизолирующих материалов.

В радиокерамике наряду с обычными ингредиентами используется ряд новых составных частей: тальк, корунд, рутил, циркон, цельзиан, шпинель, первоскит и другие природные и искусственные неорганические соединения.

Многие виды отечественной радиокерамики являются весьма высококачественными материалами: достаточная высокая механическая прочность, весьма большая диэлектрическая проницаемость, малые диэлектрические потери, незна-

чительный или, наоборот, необходимый для многих потребителей большой температурный коэффициент диэлектрической проницаемости. Некоторые виды радиокерамики отличаются исключительно высокой термостойкостью при весьма малом коэффициенте теплового расширения.

Имеются три основные группы радиокерамики: 1) установочная радиокерамика, в которой особое место занимают керамика для электровакуумных приборов и для оснований непроволочных и проволочных сопротивлений; 2) конденсаторная керамика и 3) сегнетокерамика.

В табл. 1 сведены основные данные новейших керамических материалов.

В последнее время выявилось особое значение для радиотехники сегнетокерамики, используемой для изготовления конденсаторов низкой частоты, пьезоэлементов и нелинейных элементов. Перспективы развития сегнетокерамики особенно благоприятны в связи с внедрением в технику

Основные свойства перспективных керамических материалов

Таблица 1

Вид керамического материала	Основное назначение	Основные электрические и механические свойства					
		$\epsilon$ при $t = 20^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент $\epsilon$ , $1^\circ\text{C}$	Пределный $\tan \delta$ при 1 мгГц при температуре		$\sigma_{\text{изг}}^2$ (не ме-нее), $\text{k}^2/\text{см}^2$	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ (не бо-льше)
				20° C	300° C		
I. Сегнетокера-мика	Конденсаторы цепей низкой частоты	Около 3 500	Изменение $\epsilon$ в интервале $-60^\circ\text{...}+80^\circ\text{C}$ не более $\pm 15\%$	Около 0,01	—	—	—
	Пьезоэлементы	$\epsilon \approx 1500$ Пьезомодули $d_{31} \geq 1,5 \cdot 10^{-6}$ ; $d_{33} \geq 4 \cdot 10^{-6}$	Изменение $\epsilon$ в интервале $-60^\circ\text{...}+80^\circ\text{C}$ не более $\pm 40\%$	Около 0,03	—	600	—
	Нелинейные элемен-ты	$\epsilon_{\text{макс}} \approx 15000$ при $E \approx 200 \text{ в/мм}$	Коэффициент не-линейности $\frac{\epsilon_6}{\epsilon_0} \geq 3$	Около 0,03	—	—	—
II. Конденсатор-ная керамика	Конденсаторы термо-компенсирующие, блокировочные, разного вида вы-сокого напряжения	800 . . . 1 000 250 . . . 300 130 . . . 150 60 . . . 80	$-(5000 \pm 500) \cdot 10^{-6}$ $-(2500 \pm 250) \cdot 10^{-6}$ $-(1350 \pm 150) \cdot 10^{-6}$ $-(700 \pm 100) \cdot 10^{-6}$	0,0010 0,0006 — 0,0003	— — — 0,0015	800 — — 10	—
	Термостабильные конденсаторы	20 . . . 25 15 . . . 20	$-(50 \pm 10) \cdot 10^{-6}$ $+(30 \pm 10) \cdot 10^{-6}$	0,0003	—	—	—
	Мелкие установоч-ные детали		$+(110 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0005	0,0060	1 600	7,0
	Детали высокой ста-бильности	6,5 . . . 7,5	$+(50 \pm 15) \cdot 10^{-6}$	Около 0,0001	0,0004	800	2,2
	Детали крупных раз-меров	.	$+(130 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0020	0,0060	1 800	3,6
	Детали особо высо-кой механической прочности	8,0 . . . 8,5	$+(110 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0003	0,0015	3 000	5,0
	Изоляция для ваку-умных приборов	7,5 . . . 8,0	$+(110 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0006	0,0015	1 500	5,0

полупроводниковых приборов, в частности германьевых, обеспечивающих исключительно малые габариты аппаратуры. Пьезоэлементы из сегнетокерамики успешно используются для ультразвуковых излучателей, звукоснимателей, индикаторов давления. Нелинейные элементы на базе сегнетокерамики применяются в диэлектрических усилителях, умножителях частоты, стабилизаторах напряжения и др.

Керамика для высокочастотных конденсаторов распадается на две подгруппы: материалы со значением диэлектрической проницаемости от 60 до 1 000 для термокомпенсирующих, блокировочных, импульсных, высоковольтных конденсаторов; термостабильная конденсаторная керамика с очень малым разбросом значений температурного коэффициента диэлектрической проницаемости до  $\pm 10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}$ . Эти материалы почти не содержат двуокиси титана и характеризуются высокой стабильностью при температурах до 300° С в отличие от титаносодержащей керамики, применение которой ограничивается температурой 100 ... 150° С в связи с явлением восстановления окислов титана.

Для обеспечения быстро развивающихся электро- и радиотехники необходимо изыскивать и осваивать все более совершенные электротехнические материалы и детали из них и без перебоев удовлетворять растущий спрос на них путем организации массового автоматизированного производства. Научно-исследовательские центры должны продолжать глубокое и всестороннее изучение сложнейших керамических систем с учетом не только роли фазового состояния, но и влияния особенностей каждого отдельного компонента. Следует отметить, что до сих пор нет достаточно разработанной теории старения керамики.

**Стекло.** Несмотря на появление ряда новых высококачественных изолирующих материалов, стекло в электроизоляционной технике не утратило своего значения. Благодаря своей прозрачности стекло нашло исключительно важное применение в изготовлении баллонов для электрических ламп самого разнообразного назначения. Возможность получения из расплавленного стекла тончайших гибких нитей, пряжи и ткани из стеклянных волокон значительно расширило его использование как электроизолирующего материала. Большое значение получили легкоплавкие непрозрачные стекла в виде эмали. Чрезвычайный интерес представляет выяснившаяся совсем недавно возможность получения из расплавленного стекла тончайшей гибкой ленты толщиной до 15 мкн, пригодной для изготовления малогабаритных электрических конденсаторов. Перспективны конденсаторы для цепей высокой частоты взамен слюдяных, изготовленные из легкоплавких стеклянных эмалей.

В области теоретического изучения особенностей стекла и стеклообразного состояния вещества советская и зарубежная наука достигли больших успехов. С достаточной точностью установлена зависимость между составом, условиями термиче-

ской обработки стекла и его физическими, механическими, химическими и особенно диэлектрическими свойствами.

В однородном электрическом поле пробивная напряженность стекла при электрическом пробое достигает весьма высоких значений, более 5 000 кв/см. На пробивную напряженность стекла главным образом влияют газовые включения в толще стекла. В неоднородном поле пробой стекла сопровождается краевыми явлениями. При высоких частотах пробой носит термический характер.

Влияние состава стекла на диэлектрические потери оказывается очень резко. Диэлектрические потери в силикатных натриевых стеклах весьма велики и быстро возрастают с температурой. Частичная или полная замена окислов натрия окислами калия снижает диэлектрические потери и замедляет возрастание угла диэлектрических потерь с температурой. Стекла, содержащие тяжелые окислы в большом количестве, отличаются низкими диэлектрическими потерями и малой их зависимостью от температуры, даже при наличии щелочей.

Особое значение при использовании стекла получила возможность его изготовления с заранее заданными значениями коэффициента теплового расширения. Явилась возможность осуществлять герметическую пайку стекла с металлическими вводами в стеклянные баллоны. Возможность согласования коэффициентов теплового расширения получило большое значение при нанесении слоя стеклянной эмали на поверхность деталей. В последнее время показано, что некоторые стеклянные эмали, глазури могут иметь повышенную электропроводность, что позволяет использовать их для выравнивания градиента электрического поля в высоковольтных изоляторах.

Большое значение приобрело бесщелочное кварцевое стекло — плавленый кварц — благодаря его ничтожно малому коэффициенту теплового расширения, а также исключительной термостойкости.

Необходимо продолжать изыскание новых составов стекол с учетом требований последних достижений техники. Например, есть потребность в стеклах для вакуумных конденсаторов на весьма большие реактивные мощности при высоких напряжениях, а также для конденсаторов, наполняемых газом под высоким давлением. Возможно, что стекло найдет применение в ряде деталей вместо керамики.

**Органические диэлектрики.** Современные органические диэлектрики разнообразного состава, жидкые и твердые, широко используются в самых разнообразных областях техники. Недавно основным недостатком органических электроизолирующих материалов была их малая теплостойкость, ограничивающая их применение. Поэтому разработка новых органических диэлектриков за последние годы проводилась главным образом в направлении значительного повышения их теплостойкости.

Наряду с минеральными маслами широкое

**Основные свойства новых органических материалов**  
I. Прессовочные и литьевые

Таблица 2

Свойства Материал	Химическая формула	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Диэлектрическая про- нициаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь при ра- диочастотах $f = 20^\circ \text{C}$	Длительная рабочая температура, $^\circ\text{C}$	Морозо- стойкость, $^\circ\text{C}$	Временное сопротивле- ние изгибу, $\text{кг}/\text{см}^2$	Удельная ударная вязкость $\text{кг см}/\text{см}^3$	Особенности материала
Полистирол	$(-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5)_n$	1,03 ... 1,05*	2,5 ... ,7	Около 0,0002	60 ... 85*	—	400 ... 1 000*	6 ... 20*	
Полидихлорсти- рол (симмет- ричного стро- ения)	$(\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}_2)_n$	1,40	2,5 ... 2,6	Около 0,0002	110 ... 120	—	400 ... 1 000	6 ... 10	
Полиэтилен (по- литиен)	$(-\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$	0,92 ... 0,95	2,0 ... 2,3	Около 0,0003	105 ... 115	До -50	—	—	
Политетрафтор- этилен (тэф- лон)	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n$ (полимеризованный)	2,10 ... 2,30	2,0	Около 0,0002	До 300**	До -100	500 ... 700	—	Высокая те- плостойкость, высокочастотный
Кремнийоргани- ческие мате- риалы	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \text{R} \\   \quad   \\ -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\   \quad   \\ \text{R} \quad \text{R} \end{array}$	—	2,5 ... 3,5	0,0002 ... 0,0006	До 200***	До -70***	—	—	
Лавсан	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	1,57	2,3	0,01	150	—	—	—	
Полиамидные смолы	$-(\text{CH}_2)_p-\text{CO}-\text{NH}-(\text{CH}_2)_q-$	1,1 ... 1,2	4,9 ... 6,5	0,03 ... 0,05	100 ... 130	-30:(-50)	1 000	100	Высокие ме- ханические свой- ства и адгезия к металлу и кера- мике
ФКП-М	Фенольно-формальдегидная с минеральными напол- нителями	—	6,5	0,037	140	—	550	8,2	Повышенная удельная удар- ная вязкость
K-211-34	Анилино-фенольно-формальдегидная с минеральными наполнителями	1,9 ... 2,0	6,0 ... 6,7	0,01	130	—	500	2,8	
K-114-35	Фенольно-формальдегидно-полиамидная с минераль- ными наполнителями	1,75 ... 1,9	6,0 ... 80	0,01	120 ... 130	—	900	5,0	Повышенная удельная удар- ная вязкость
<b>II. Заливочные и пропиточные компаунды</b>									
КГМ-С	Термореактивный	1,1 ... 1,3	3,6	0,011 ... 0,015	120	-60	—	—	Широкий интер- вал рабочих тем- ператур $\rho_v =$ $= 8 \cdot 10^{15} \text{ ом} \cdot \text{см}$
РГЛ-450/19	Термореактивный	1,10 ... 1,20	5,0	0,056	80	-50	—	—	$\rho_v = 10^{12} \text{ ом} \cdot \text{см}$
Эпоксисмолы	$\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2-\text{[O}-\text{R}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{]}_n-\text{O}-\text{R}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O})-\text{CH}_2-$	1,19 ... 1,30	4,0 ... 5,0	0,015 ... 0,019	120	—	—	—	Обладают вы- сокой адгезией, быстрая полиме- ризация

III. Лаки кремнийорганические: K-44 ( $\text{tg } \delta=0,005$ ); K-47 ( $\text{tg } \delta=0,007$ ); K-48 ( $\text{tg } \delta=0,01$ ). Термостойкие, рабочая температура =  $200^\circ \text{C}$

\* В зависимости от степени полимеризации.

\*\* Температура предельного нагрева в эксплуатации.

\*\*\* Для жидкости.

применение для пропитки бумажных конденсаторов нашли синтетические жидкости — продукты хлорирования дифенила. Эти жидкости имеют более высокую диэлектрическую проницаемость, чем масла, что позволило значительно уменьшить габариты конденсаторов.

Введение фтора в состав ряда органических соединений позволило значительно повысить их теплостойкость. В эту группу входят жидкие фтористоуглеродистые соединения — диперфторгексилэфир. Эти соединения теплостойки, влагостойки, негорючи и невзрывчаты. Они не разрушаются до  $300^{\circ}\text{C}$ . Эти диэлектрики также применяются в конденсаторостроении.

Большой интерес представляют кремнийорганические жидкости, разработанные К. А. Андриановым, пригодные для применения в широком интервале температур, от  $-70^{\circ}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . К теплостойким жидкостям, пригодным для использования до температуры  $+125^{\circ}\text{C}$ , относится низкомолекулярный полиизобутилен, известный за рубежом как «витамин Q».

К новым материалам для целей пропитки волокнистой изоляции относятся винилкарбозол и полиэфиры, обладающие способностью затвердевать в результате полимеризации после пропитки в жидком состоянии.

Органические изолирующие материалы, применяемые в виде пленок, подразделяются на две группы. Неполярные полимеры имеют высокие электрические свойства в широком интервале частот. Они используются для изготовления высокочастотных конденсаторов, кабелей и других изделий. Полярным полимерам свойственны повышенные диэлектрические потери. Они используются для конденсаторов, предназначенных для применения в цепях постоянного тока и низкой частоты и для других назначений.

К неполярным полимерам относятся политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон) с теплостойкостью до  $200^{\circ} \dots 300^{\circ}\text{C}$ . Пленки из тефлона изготавливаются толщиной 10 ... 30 мкн. Из пленок тефлона за рубежом изготавливаются конденсаторы на напряжение от 200 в до 40 ... 60 кв и емкостью от 50 пф до 10 мкф.

К группе неполярных органических диэлектриков принадлежит также полистирол, из которого изготавливаются тонкие стирофлексные пленки, широко применяемые для изготовления конденсаторов. С целью повышения теплостойкости полистирола используются его сополимеры.

К числу новых теплостойких полимерных диэлектриков относятся политрифторменохлорэти-

лен, фторопласт-3 и полиэтилентерифталат («лавсан»), терилен, майлар. Пленки из этих материалов являются весьма перспективными в связи с их высокой механической прочностью, хорошей адгезией с металлом и высокой теплостойкостью. Пленки из майлара изготавляются толщиной до 6,5 мкн, при одной и той же емкости конденсаторы из таких пленок меньше бумажных.

Новыми влагозащитными органическими материалами, весьма перспективными, являются так называемые эпоксидные смолы. Эти смолы обладают высокими физико-механическими свойствами и, в частности, исключительной адгезией, малой усадкой при затвердевании. Эпоксисмолы применяются в виде заливочных масс, покровных лаков и прессовочных материалов.

К числу пластмасс относится также полиуретан, (полиамидная смола), характеризующийся особо высокой механической прочностью — удельная ударная вязкость около  $100 \text{ кг} \cdot \text{см}/\text{см}^2$  — и хорошим сцеплением с металлом. Полиуретан используется для герметизации некоторых видов керамических, бумажных и других конденсаторов.

Табл. 2, в которой приведены свойства новых органических материалов советского производства, показывает, что наша электропромышленность располагает достаточно обширным ассортиментом материалов в области органической изоляции.

Наука не только достаточно разъяснила процессы полимеризации и поликонденсации, но и овладела возможностью управлять этими процессами. Однако производство органических пластических материалов не всегда и не в полной мере использует достижения науки, и между новым открытием и массовым внедрением проходит нередко весьма большой период. Наша промышленность пластмасс часто не торопится снизить стоимость новых изделий по мере их освоения.

Нами были бегло рассмотрены главнейшие особенности и весьма многообразные ценные качества освоенных и осваиваемых советской промышленностью электрокерамики, электротехнических стекол и органических пластических материалов. Однако возможности новой техники в области электроматериалов далеко не исчерпаны. Для науки и для производства новых электроизолирующих материалов, твердых, жидких, газообразных, неорганического и органического состава, остается еще широкое поле деятельности.

[26. 4. 1955]



# Продолжительность службы новых видов изоляции электрических машин

Кандидат техн. наук В. И. КАЛИТВЯНСКИЙ, кандидат техн. наук А. В. КОВАЛЬСКАЯ  
Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Для продолжительности службы изоляции электрических машин решающее значение имеет температурный режим, так как при нагреве в изоляции происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к ее старению. Поэтому в основу классификации изоляции электрических машин положена ее нагревостойкость — способность изоляции сохранять свои характеристики на определенном уровне при установленной для данного класса изоляции температуре.

Первые нормы, установленные в начале настоящего столетия и регламентировавшие предельно допустимые нагревы, подвергались неоднократной коррекции. Многолетний опыт эксплуатации электрических машин с изоляцией классов А и В является наилучшим обоснованием принятых в настоящее время допустимых перегревов для этих классов.

Огромные успехи в области химического синтеза привели к созданию новых электроизоляционных материалов. В первую очередь к ним относятся синтетические электроизолирующие триацетцеллюзные пленки [Л. 1], а также кремнийорганические соединения [Л. 2..4], производство которых освоено в Советском Союзе. При использовании новых материалов для изоляции электрических машин, по которым еще нет достаточного опыта эксплуатации, возникает весьма важный вопрос — какие рабочие нагревы могут быть допущены для этих материалов?

На начальной стадии изучения вопроса большинство исследователей пришло к выводу, что наиболее надежным критерием в оценке состояния изоляционного материала в процессе теплового старения являются его эластичность и механическая прочность. Это положение, будучи плодотворным, не могло само по себе служить основанием к установлению сроков жизни изоляции электрических машин.

Во-первых, тепловое старение образцов изоляционных материалов в термостатах протекает в условиях, существенно отличных от тех, в которых материалы находятся в эксплуатируемой электрической машине, где они подвергаются воздействию не только температуры, но и влажности, механических усилий, электрического поля, а иногда активных химических реагентов. Кроме того, в электрической машине только наружные слои изоляции соприкасаются с воздухом, а к внутренним, особенно в пазовой части, доступ воздуха ограничен.

Во-вторых, установление предельно допустимой степени старения изоляционных материалов по хрупкости материала, к тому же определяемой субъективно, или по снижению механической прочности является весьма условным и не может быть связано количественно со сроками жизни изоляции электрических машин. Поэтому стали предпринимать попытки приблизить условия, в которых производится тепловое старение

материала к реальным условиям его работы в машине.

Значительным шагом вперед в этом отношении является работа Смита и Скотта, опубликованная в 1939 г. [Л. 5]. В работе приводятся результаты испытаний большого количества образцов изоляционных материалов. Испытуемые материалы в виде лент обматывались вокруг латунных цилиндров диаметром 38 мм и длиной около 800 мм до получения толщины изоляции около 2,5 мм на сторону и подвергались длительному тепловому старению при температурах 105, 120, 135, 160 и 200° С. Однако и в этой работе не были получены достаточно объективные данные для обоснования допустимых сроков жизни изоляции машин при разных температурах.

Аналогичного характера работы были поставлены в 1940 г. В. И. Калитвианским совместно с С. В. Цукерником и В. М. Дегтевым.

В 1942 г. была опубликована часть работы Скотта и Томсона, в которой приведены некоторые результаты, полученные при изучении теплового старения изоляции статоров мелких асинхронных электродвигателей при температурах 135, 160 и 200° С [Л. 6]. Эта работа, хотя и явилась следующим, значительным шагом вперед в отношении установления действительных сроков жизни изоляции электрических машин при разных температурах, но также не была лишена ряда существенных недостатков.

В 1944—1949 гг. были опубликованы первые результаты по установлению нагревостойкости «силиконовой» изоляции электрических машин [Л. 7..10]. Нагревостойкость силиконовой изоляции устанавливалась на основе испытания материалов, а также машин. К недостаткам этих работ в первую очередь относится ограниченное число испытанных машин, что не исключало возможности получения случайных, недостаточно надежных результатов.

В обозреваемых здесь наших работах по установлению сроков жизни пленочной и кремнийорганической изоляции были проведены систематические испытания электрических машин с этими новыми видами изоляции в условиях, наиболее приближающихся к реальным. Ограничность срока испытаний потребовала введения форсированных режимов, особенно по температуре, так как в противном случае для этих испытаний потребовалось бы 8..10 лет.

При установлении продолжительности службы изоляции испытуемые электродвигатели, соединенные с нагрузочным генератором и установленные в специальном помещении с высокой влажностью (90..98% относительной влажности), кроме выходных дней, подключались к рабочему напряжению, и нагрузка генератора устанавливалась с таким расчетом, чтобы за час работы температура обмотки достигала испытательной. Затем нагрузка несколько снижалась до

значения испытательной и электродвигатели работали непрерывно или же в режиме непрерывных реверсов в течение 10...12 час в сутки. Остальное время суток испытуемые электродвигатели находились в нерабочем состоянии в атмосфере с 95...98% относительной влажностью. На всех этапах испытания сопротивление изоляции изменялось меггером при напряжении 500 в (между фазами и каждой фазы относительно корпуса). Для увеличения времени воздействия высокой влажности на испытуемую изоляцию раз в месяц электродвигатели дополнительно выдерживались в нерабочем состоянии трое суток, и в течение этого времени производились систематические измерения сопротивления изоляции.

Характер изменения сопротивления изоляции неработающих двигателей в атмосфере высокой влажности являлся относительным критерием состояния изоляции в процессе ее испытания.

Таким образом, в наших испытаниях изоляция испытуемых электродвигателей подвергалась комплексному воздействию повышенных нагревов, высокой влажности, электрического поля, коммутационных перенапряжений (при пусках, выключениях и реверсах), механических усилий, возникающих при нагревах и охлаждениях, а также при пусках и реверсах (электродинамические усилия в лобовых частях обмотки).

Основным критерием для установления продолжительности службы изоляции был принят выход электродвигателя из строя в рабочем режиме по вине изоляции.

После выхода из строя каждого электродвигателя производилось испытание его изоляции: замер сопротивления и пробивной прочности непосредственно после выхода из строя и после 5-суточного пребывания его в 95...98% относительной влажности, а также внешний осмотр состояния изоляционных материалов при разборке обмотки.

Чтобы убедиться в правильности примененной нами методики, вначале были проведены испытания пяти асинхронных электродвигателей заводского исполнения с изоляцией класса А. Испытание этих электродвигателей проводилось при температуре  $200 \pm 2^\circ\text{C}$  в описанном выше режиме. Определенная нами продолжительность службы изоляции класса А при температуре  $200^\circ\text{C}$  лежала в пределах 162...183 час и в среднем составляла 173 часа. При разборке обмотки этих электродвигателей установлено полное термическое разрушение изоляции, особенно витковой (хрупкость, незначительная механическая прочность). Эти результаты хорошо согласуются с другими экспериментальными данными, в частности с данными Скотта и Томсона [Л. 6], согласно которым срок жизни изоляции класса А составляет 125...182 час при  $200^\circ\text{C}$ .

Это дало основание для принятия предложенной нами методики при определении продолжительности жизни новых видов изоляции.

**Кремнийорганическая стеклослюдяная изоляция.** Испытывалось около 50 асинхронных электродвигателей, обмотка которых была выполнена из провода марки ПСДК, а основная изоляция — из гибкого стекломиканита на лаке ЭФ-5 и стек-

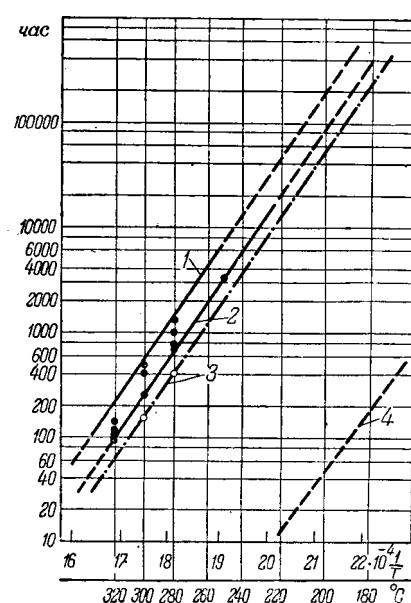


Рис. 1. Сроки жизни стеклослюдяной кремнийорганической изоляции электродвигателей при разных температурах.

1 — максимальные сроки жизни; 2 — минимальные; 3 — кривая резкого падения сопротивления изоляции при отсыревании; 4 — кривая сохранения эластичности пленки лака при перегибе на стержне диаметром 3 мм.

ло-лакоткани ЛСК. Обмотка пропитывалась в лаке ЭФ-3 и покрывалась пигментированной эмалью ПКЭ. Испытания проводились при температурах: 200, 230, 250, 280, 300 и  $320^\circ\text{C}$ .

Как видно из рис. 1, минимальные значения логарифмов сроков жизни кремнийорганической стеклослюдяной изоляции (точки) хорошо укладываются на прямой, что соответствует общим закономерностям теплового старения полимерных диэлектриков [Л. 11]. Следовательно, продолжительность жизни кремнийорганической изоляции при более низких температурах может быть определена из графика рис. 1 или же из уравнения

$$\ln t = \frac{B}{T} + G,$$

где  $t$  — продолжительность жизни изоляции;  
 $T$  — абсолютная температура  $^\circ\text{K}$ ;  
 $B$  и  $G$  — постоянные для данного типа изоляции и определенных условий испытания.

В первый период испытания двигатели работали при температуре 280 или  $300^\circ\text{C}$ . На этом этапе сопротивление изоляции двигателей систематически проверялось путем выдержки в атмосфере 90...98% относительной влажности в нерабочем состоянии. Результаты испытаний показывают (рис. 2), что при температуре 280...300°C практически не изменяется сопротивление изоляции и только незадолго до выхода электродвигателя из строя она обычно падает на два порядка. У электродвигателей при рабочей температуре обмотки  $300^\circ\text{C}$  падение сопротивления наблюдалось примерно через 150 час работы, а при  $280^\circ\text{C}$  — через 400 час.

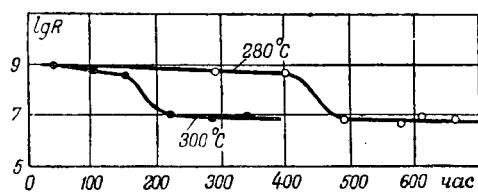


Рис. 2. Сопротивление стеклослюдяной кремнийорганической изоляции двигателей после длительной работы при 280 и 300° С, измеренное после выдержки двигателей в нерабочем состоянии во влажной атмосфере 36 час. ( $R$  в омах.)

Если нанести эти точки в координатах  $\ln t = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , то прямая (1 рис. 3), проведенная через эти точки, расположится параллельно прямой 2 минимальных сроков жизни кремнийорганической стеклослюдяной изоляции. В зоне между прямыми 2 и 3 наблюдается резкое снижение сопротивления в процессе отсыревания.

Следует, однако, отметить, что сопротивление изоляции двигателей в сухом состоянии, измеренное при испытательных температурах (320...200° С) непосредственно перед выходом изоляции из строя, как правило, имеет высокое значение — более 100 мгом. Поэтому сопротивление изоляции не всегда может служить достаточным критерием общего состояния изоляции.

При температурах 230° С и ниже, как правило, не наблюдается снижение сопротивления стеклослюдяной кремнийорганической изоляции после отсыревания.

На рис. 3 и 4 приведены кривые, характеризующие изменение сопротивления кремнийорганической изоляции в процессе испытания после 36-часового (кривая 1) и 86-часового (кривая 2) пребывания двигателей в атмосфере 90...95% относительной влажности. Из кривых следует, что в первый период испытания наблюдается даже некоторое относительное увеличение сопротивления, что обусловлено дополнительной запечкой кремнийорганических лаков, входящих в состав изоляции. Такое же явление имеет место и с электрической прочностью, что подтверждается данными табл. 1.

Таблица 1

Изменение электрической прочности пазовой стеклослюдяной кремнийорганической изоляции электродвигателей в процессе циклических испытаний

Длительность теплового старения при 200° С, час	Время выдержки при 95...98% относительной влажности, час	Пробивное напряжение после 120 час пребывания во влаге, в		
		среднее	минимальное	максимальное
0	120	2 325	2 200	2 600
168	240	2 475	2 000	3 000
336	360	2 450	1 800	2 850
840	690	3 125	2 000	3 500
1 008	810	3 350	1 800	4 500
1 176	930	3 375	2 300	4 000
1 344	1 050	3 080	3 000	3 250
1 512	1 170	3 100	2 000	3 600
1 680	1 290	3 800	3 600	4 200

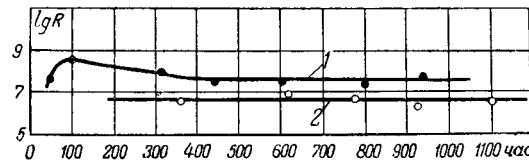


Рис. 3. Сопротивление стеклослюдяной кремнийорганической изоляции двигателей после длительной работы при 230° С, измеренное после выдержки двигателей в нерабочем состоянии во влажной атмосфере 36 час (кривая 1) и 86 час (кривая 2). ( $R$  в омах.)

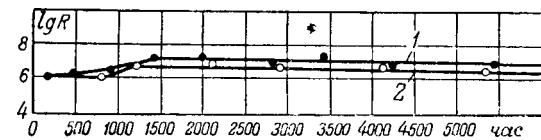


Рис. 4. Сопротивление стеклослюдяной кремнийорганической изоляции двигателей после длительной работы при 200° С, измеренное после выдержки двигателей в нерабочем состоянии во влажной атмосфере 36 час (кривая 1) и 86 час (кривая 2). ( $R$  в омах.)

Приведенные экспериментальные данные с полной очевидностью показывают, что при температурах 200° С и ниже не наблюдается заметного ухудшения влагостойкости кремнийорганической стеклослюдяной изоляции.

Анализ причин выхода из строя электродвигателей с кремнийорганической стеклослюдяной изоляцией показывает, что основное количество электродвигателей с этой изоляцией вышло из строя вследствие витковых замыканий обмотки. Основная изоляция, состоящая из слюды, стеклоткани и полиорганосилоксанового лака сохраняет свои механические и электрические свойства на достаточно высоком уровне. Так, электрическая прочность пазовой изоляции электродвигателей, определенная непосредственно после их выхода из строя, лежит в пределах 600...3 300 в. Следовательно, сроки жизни электродвигателей с обмоткой из провода типа ПЭТКСО и ПСДК определяются в основном уровнем нагревостойкости витковой изоляции.

**Кремнийорганическая стеклолакотканевая изоляция.** Эта изоляция, не содержащая слюды, представляет большой технико-экономический интерес и поэтому также была подвергнута сравнительным испытаниям. У двигателей с этим типом изоляции обмотка была выполнена проводом марки ПЭТКСО или ПСДК. В качестве основной изоляции — относительно корпуса и между фазами — была применена стеклолакоткань на полиорганосилоксановом лаке. Обмотка пропитывалась в лаке ЭФ-3. Лобовые части покрывались пигментированной эмалью типа ПКЭ.

Электродвигатели со стеклолакотканевой кремнийорганической изоляцией подвергались длительным испытаниям при температурах 200...280° С.

На рис. 5 представлена зависимость сроков жизни стеклолакотканевой кремнийорганической

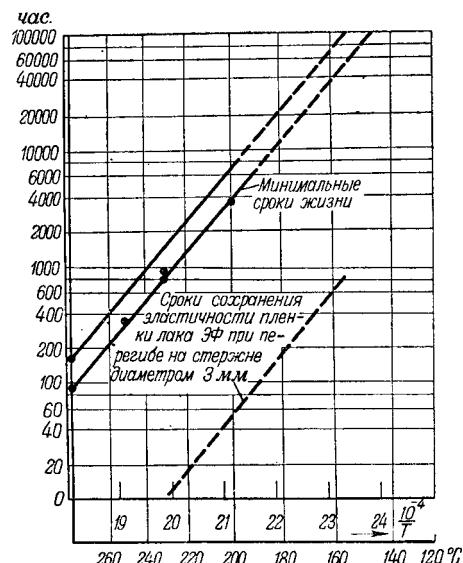


Рис. 5. Срок жизни кремнийорганической стеклотканевой изоляции при разных температурах.

изоляции двигателей от температуры. Эта зависимость может быть представлена в виде функции

$$\ln t = \frac{B}{T} + G.$$

Как следует из рис. 5, зависимость логарифма срока жизни стеклолакотканевой кремнийорганической изоляции от величины, обратной абсолютной температуре, — прямолинейная, и угол наклона «кривой жизни» этой изоляции практически совпадает с углом наклона прямой, характеризующей сроки сохранения эластичности пленки полиорганосилоксанового лака ЭФ, на основе которого изготовлена стеклолакоткань, примененная для основной изоляции. Этот вывод дает все основания для экстраполяции сроков жизни стеклолакотканевой изоляции в область температур ниже 180° С, используя зависимость

$$\ln t = f\left(\frac{1}{T}\right).$$

Для установления влияния повышенных нагревов на влагостойкость стеклолакотканевой кремнийорганической изоляции двигателей были проведены исследования электрических свойств этой изоляции при циклических воздействиях повышенных температур (по 168 час при 180° С в каждом цикле) с последующей выдержкой в атмосфере с 95...98% относительной влажностью (120 час в каждом цикле).

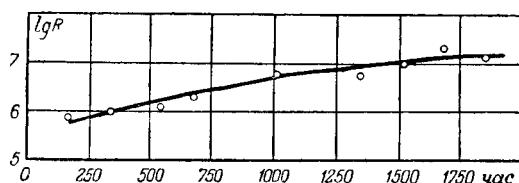


Рис. 6. Сопротивление пазовой стеклотканевой изоляции двигателей, измеренное после 120 часов пребывания во влажной атмосфере в процессе теплового старения. ( $R$  в омах.)

Таблица 2

Изменение электрической прочности пазовой стеклолакотканевой кремнийорганической изоляции в процессе циклических испытаний

Длительность теплового старения при 180° С, час	Время выдержки в 95...98% относительной влажности, час	Пробивное напряжение после 120 час. пребывания во влаге, в		
		среднее	минимальное	максимальное
168	120	1 330	1 000	1 640
504	360	1 675	1 000	2 000
672	480	1 700	1 000	2 100
840	600	1 365	1 200	1 500
1 008	720	1 310	1 125	1 687
1 176	840	1 366	1 300	1 400
1 344	960	1 240	1 150	1 300
1 512	1 080	1 400	1 300	1 500
1 680	1 200	1 380	1 200	1 500
1 848	1 320	1 350	1 200	1 500

Из кривых рис. 6 и данных табл. 2 следует, что:

1) сопротивление пазовой стеклолакотканевой кремнийорганической изоляции электродвигателей, измеренное в увлажненном состоянии, при длительном воздействии температуры 180° С несколько увеличивается;

2) сопротивление изоляции в увлажненном состоянии после 1 848 час теплового старения при 180° С выше, чем в начальный период испытаний;

3) электрическая прочность в процессе циклических испытаний вначале (до 672 час) несколько повышается, а затем снижается до 1 350 в, т. е. до первоначального уровня (после 1 848 час).

Анализ показывает, что основной причиной выхода из строя двигателей со стеклолакотканевой кремнийорганической изоляцией является пробой основной — стеклолакотканевой изоляции. Пробивное напряжение этих двигателей после выхода из строя лежит в пределах 500...1 900 в, что несколько ниже, чем у электродвигателей со стеклослюдянной кремнийорганической изоляцией.

#### Электродвигатели с пленочной изоляцией.

Эти двигатели имели обмотку из провода с винилфлексовой или же триацетатцеллюлозной изоляцией. Для изоляции обмотки относительно корпуса, а также между отдельными фазами применен пленокартон. Обмотанные электродвигатели пропитывались в лаке 447.

На рис. 7 в логарифмическом масштабе приведена зависимость сроков жизни электродвигателей с пленочной изоляцией от величины, обратной абсолютной температуре. Зависимость хорошо укладывается в формулу

$$\ln t = \frac{B}{T} + G$$

и имеет прямолинейный характер.

Сопоставление прямой, выражющей зависимость логарифмов срока жизни от  $\frac{1}{T}$  для пленочной изоляции (рис. 7), с прямой для изоляции класса А показывает, что эти прямые имеют практически одинаковый наклон и прямая для пленочной изоляции сдвинута примерно на 15...17° С в область более высоких температур. Сле-

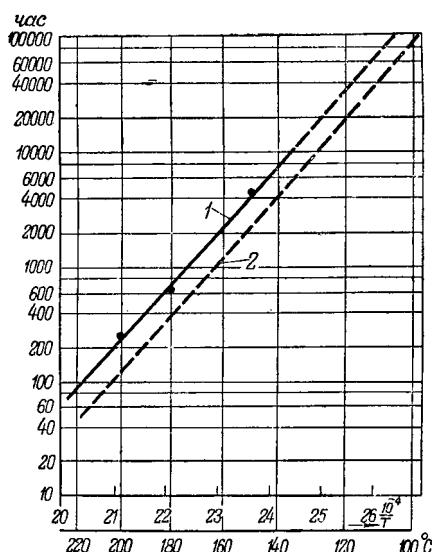


Рис. 7. Срок жизни двигателей с пленочной изоляцией (1 — по данным авторов) и изоляции класса A (2 — Скотт и Томсон).

довательно, при одной и той же температуре срок жизни пленочной изоляции примерно в 1,8 раза больше, чем обычной изоляции класса A.

**Выводы.** 1. Сроки службы стеклослюдяной кремнийорганической, стеклолакотканевой кремнийорганической и пленочной изоляции электродвигателей связаны с температурой уравнением типа

$$\ln t = \frac{B}{T} + G.$$

Это уравнение сходно с уравнением Аррениуса. Сходство это не является чисто формальным, а имеет под собой физическое основание, так как оно показывает, что деструкция изоляции при тепловом старении подчиняется общим закономерностям кинетики химических реакций [Л.1]. Это утверждение дает теоретическую базу для экстраполирования экспериментальных данных в область более низких температур в соответствии с зависимостью  $\ln t = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , которая в логарифмических координатах имеет вид прямой.

2. Угол наклона прямых  $\ln t = \frac{B}{T} + G$  примерно одинаков для различных типов изоляций. Это означает, что энергия активации химической деструкции органических и кремнийорганических высокомолекулярных соединений (лаков) примерно одинакова для разных типов изоляции.

$$\Delta E^* = -BR,$$

где  $R$  — число Авогадро.

3. Константа  $G$  графически представляется собой отрезок, отсекаемый прямой  $\ln t = f\left(\frac{1}{T}\right)$  на вертикальной оси координат, и он определяет относительную нагревостойкость изоляции. Величина  $G$  соответствует логарифму времени срока жизни изоляции при  $T \rightarrow \infty$ .

4. Исходя из экспериментальных данных, полученных в наших работах, а также руководствуясь формулой  $\ln t = \frac{B}{T} + G$ , при экстраполации сроков жизни в область более низких температур можно рекомендовать следующие максимальные длительно допустимые температуры:

стеклослюдяная кремнийорганическая изоляция (изоляция класса СВ по ГОСТ 183-41) . . . . . 180° С  
стеклолакотканевая кремнийорганическая изоляция 145° С  
пленочная (триацетатцеллюлозная изоляция) . . . . . 115° С

Приведенные выше температуры, допустимые для кремнийорганической изоляции, рассчитаны, исходя из работы электродвигателей при этой температуре в течение 20 . . . 30 лет и более. При меньшей продолжительности работы допустимые температуры обмоток могут быть соответственно повышенны, руководствуясь кривыми жизни изоляции.

### Литература

1. В. И. Калитянский. Новые типы изоляции электрических машин. Электричество, стр. 10 . . . 18, № 6, 1947; Труды научно-технической сессии по электрической изоляции. Госэнергоиздат, стр. 70 . . . 90, 1949.
2. К. А. Андрианов, О. И. Грибанова, Д. А. Гамбара и А. Л. Карпова. Новые теплостойкие диэлектрики-силиконы. Электричество, стр. 38 . . . 44, № 4, 1946.
3. К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. Кремнийорганические полимерные продукты для промышленности. ЦБТИ МЭП, ч. II, 1946.
4. К. А. Андрианов и М. В. Соболевский. Высокомолекулярные кремнийорганические соединения. Оборонгиз, 1949.
5. J. J. Smith, J. A. Scott. Temperature Aging Characteristics of Class A Insulation, Electrical Eng., 1939, т. 58, Trans., № 9, стр. 435 . . . 444, Реферат: Электричество, стр. 78, № 2, 1940.
6. J. A. Scott, B. H. Thompson. Temperature-Aging Tests on Class A Insulated Fractione-Horsepower Motor Stators, Electrical Eng., т. 61, стр. 499 . . . 501, № 7, 1942.
7. G. L. Moses. Insulation Temperature Limits Increased by New Silicon Resins, Westinghouse Engineer, № 9, 1944.
8. T. A. Kauppi, G. Grant, G. L. Moses, R. F. Horre. Silicon Insulation Proved by Test, Westinghouse Engineer, № 9, 1945.
9. J. De Kiep, L. R. Hill, G. L. Moses. The Application of Silicon Resins to Insulation for Electric Machinery. Tr. AIEE, т. 64, 1945.
10. G. L. Moses. Silicon Insulation for Railway Motors, Railway Mechanical Engineer, October 1944.
11. В. И. Калитянский. Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков. Электричество, № 3, 1955.

[7.12. 1954]



# Работа бумажно-масляной изоляции на переменном напряжении при наличии постоянной составляющей

Кандидат техн. наук Г. С. КУЧИНСКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В ряде случаев изоляция аппаратуры работает на переменном напряжении при наличии значительной постоянной составляющей. Например, конденсаторы продольной компенсации линий электропередачи могут подвергаться воздействию пульсирующего напряжения [Л. 1].

Для исследования процессов, происходящих в изоляции в режиме наложения постоянного напряжения на переменное, была применена методика осциллографирования тока потерь, так как в образцах бумажно-масляной изоляции наблюдается значительная зависимость формы кривой тока потерь от значения и формы приложенного напряжения.

Наиболее резко эта зависимость проявляется для секций конденсаторов после нескольких лет [Л. 3 и 4] их эксплуатации. При малой напряженности синусоидального напряжения, когда  $E < 2 \text{ кв/мм}$ , ток потерь в секциях синусоидален. При  $E > 2 \text{ кв/мм}$  кривая тока потерь начинает сильно искажаться, появляется пик, соответствующий области нарастания приложенного напряжения. Такое искажение кривой тока потерь можно ожидать, когда ионы масла проходят в направлении силовых линий поля расстояние, равное толщине масляной прослойки между листами бумаги, за время менее одного полупериода приложенного напряжения. Чем больше проходит время от начала полуволны напряжения до момента образования ионного пика, тем меньше ионов будет находиться в толще масляной пленки и тем больше ионов сосредоточится на границе масла и бумаги. В этом случае наблюдается пик ионного тока. С увеличением напряжения амплитуда ионного пика возрастает, а время формирования пика уменьшается.

Время формирования ионного пика определяется как значением приложенного напряжения, так и подвижностью ионов. Можно считать, что до напряженностей порядка 50 кв/мм подвижность ионов  $\chi$  слабо или вовсе не зависит от напряженности поля [Л. 3]. Тогда при заданной амплитуде напряженности в масляной прослойке  $E'_{\max}$  условие образования ионного пика можно представить следующим выражением:

$$d_m < E'_{\max} \chi \int_0^{T/2} \sin \omega t dt,$$

где  $d_m$  — средняя толщина прослойки масла между двумя соседними листами бумаги.

Если время формирования ионного пика  $t_1 < \frac{T}{2}$ , то

$$d_m \approx E'_{\max} \chi \int_0^{t_1} \sin \omega t dt = \frac{1}{\omega} E'_{\max} \chi (1 - \cos \omega t_1).$$

Таким образом,

$$\chi = \frac{2 \cdot \pi f d_m}{E'_{\max} (1 - \cos \omega t_1)}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота приложенного напряжения.

Пренебрегая сквозной проводимостью — пропусканием ионов масла сквозь толщу клетчатки, можно найти общий заряд ионов в единице объема масла:

$$n_0 q_0 = \frac{\int_0^{t_1} i_u(t) dt}{v}, \quad (2)$$

где  $i_u$  — мгновенное значение ионной составляющей тока потерь;

$v = S d_m$  — объем масла в пространстве между двумя соседними листами бумаги площадью  $S$ ;

$q_0$  — заряд иона;

$n_0$  — количество ионов в единице объема масла.

Таким образом, площадь ионного пика пропорциональна количеству ионов в единице объема масла  $n_0$ .

Проводимость масла  $\gamma_m$  связана с величинами  $q_0, n_0$  и  $\chi$  следующим соотношением:

$$\gamma_m = n_0 q_0 \chi. \quad (3)$$

Используя формулы (1), (2) и (3), можно по форме ионного пика рассчитать проводимость масла непосредственно в толще изоляции секций конденсатора. В формуле (1) необходимо учитывать увеличение напряженности в масляных прослойках  $E'_m$  по сравнению со средней напряженностью  $E'_c$  вследствие меньшей диэлектрической проницаемости масла  $\epsilon_m$  по сравнению со средней диэлектрической проницаемостью пропитанной маслом бумаги  $\epsilon_c$ :

$$\frac{E'_m}{E'_c} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_m}. \quad (4)$$

При  $\epsilon_c = 3,5$  и  $\epsilon_m = 2,2$  получаем

$$E'_m = 1,6 E'_c.$$

В общем случае потери в изоляции могут быть как поляризационными, так и потерями проводимости. Форма тока потерь позволяет оценить долю обоих видов потерь.

Если к диэлектрику, кроме переменного напряжения, приложить постоянное напряжение такого значения, чтобы в масляной прослойке напряженность поля не меняла знака (не проходила через нуль), то можно ожидать, что ионы масла будут прижаты к соответствующим границам раздела между клетчаткой и

маслом и их движение будет ограничено. Одновременно снизятся потери и ослабнет процесс разложения масла.

Можно принять подвижность ионов масла около  $10^{-4} \dots 10^{-5} \frac{\text{см/сек}}{\text{в/см}^2}$ , тогда при напряженностях поля выше  $2 \text{ кв/мм}$  время прохождения ионом масляной прослойки будет значительно меньше одного полупериода. Перемена знака напряженности поля даже в незначительной части периода может привести к перебросу ионов через всю толщу масляной прослойки между листами бумаги. Поэтому для ограничения движения ионов желательно исключить перемену знака напряженности поля в масляной прослойке.

При оценке значения соотношения между постоянным  $U_-$  и переменным  $U_~$  напряжениями, при котором напряженность поля в масляной прослойке не меняет знака, следует исходить из того, что в первом приближении переменное напряжение распределяется между прослойками обратно пропорционально диэлектрическим проницаемостям, а постоянное — обратно пропорционально проводимостям. Напряженность поля  $E'_m$ , соответствующая  $U_~$ , определяется выражением (4).

Проводимость масляной прослойки будет меняться в пределах периода, так как будет изменяться число ионов, участвующих в направленном перемещении по полю. Осциллографмы тока потерь показывают, что после прохождения ионного пика проводимость масляной прослойки значительно падает и определяется в основном сквозной проводимостью диэлектрика. Поэтому в первом приближении можно считать, что при постоянном напряжении  $U_-$  распределение напряжения происходит пропорционально толщине диэлектрика.

При этом

$$E''_m \approx E''_c. \quad (5)$$

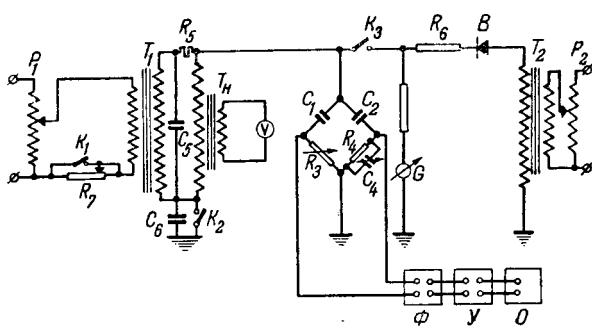


Рис. 1. Принципиальная схема установки наложения постоянного напряжения на переменное.

$T_1$  и  $T_2$  — испытательные трансформаторы;  $T_m$  — трансформатор напряжения;  $P_1$  и  $P_2$  — регуляторы напряжения;  $C_1$  — испытуемый объект;  $C_2$  — эталонная емкость;  $C_4$  — магазин емкостей;  $C_5$  — фильтровая емкость;  $C_6$  — зазарная емкость;  $R_3$  — магазин сопротивлений;  $R_4$  — сопротивление ветви моста;  $R_5$  — защитное сопротивление;  $R_6$  — зарядное сопротивление;  $R_7$  — балластное сопротивление;  $B$  — вентиль;  $K_1$  — контактор;  $K_2$  и  $K_3$  — разъединители;  $\Phi$  — фильтр;  $У$  — усилитель;  $O$  — осциллограф.

Согласно выражениям (4) и (5), масляная прослойка будет находиться под унипольярным напряжением при соотношении

$$\frac{U_-}{U_~} \approx 1,6 \cdot \sqrt{2} = 2,3,$$

где  $U_~$  — действующее значение переменного напряжения.

При прохождении пульсирующего напряжения через минимум возможна компенсация внешнего поля полем, создаваемым зарядами на границе масла и бумаги. Для напряженностей порядка  $20 \dots 40 \text{ кв/мм}$  и при отсутствии ионизационных процессов в изоляции это поле невелико — менее  $1 \text{ кв/мм}$ . Действительно, при проводимости масла  $\gamma_m = 10^{-12} \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{см}}$  заряд ионов в единице объема  $n_0 q_0$  не превышает  $10^{-7} \text{ к/см}^3$ . Когда нет ионизации,  $n_0 q_0$  слабо зависит от напряженности электрического поля. Плотность заряда, образующегося на границе масла и клетчатки, при полном обеднении ионами прослойки масла

$$\sigma = n_0 q_0 d_m.$$

$$\text{При } d_m = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$\sigma = 4 \cdot 10^{-11} \text{ к/см}^2.$$

Напряженность поля в масляной прослойке, создаваемая этими зарядами,

$$E'''_m = \frac{\sigma}{\epsilon_m} = 2 \cdot 10^2 \text{ в/см}.$$

Таким образом, достаточно незначительного превышения напряжения при его прохождении через минимум для воспрепятствования компенсации внешнего поля.

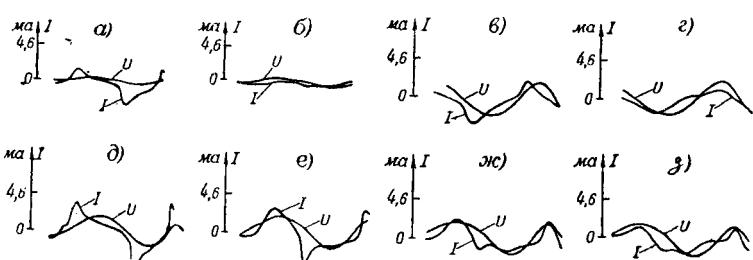
Исследование конденсаторной изоляции в режиме наложения постоянного напряжения на переменное производилось на схеме, приведенной на рис. 1. Для регистрации тока потерь осциллографировалось напряжение в диагонали моста для измерения потерь при выключенном емкости  $C_4$ . Напряжение на осциллограф подавалось через широкополосный усилитель с коэффициентом усиления 50 000.

На рис. 2 приведены характерные осциллографмы изменения формы кривой тока потерь при наложении постоянного напряжения. Осциллографмы приведены для секций конденсаторов, бывших длительное время в эксплуатации, так как в этих образцах наиболее полно проявляются все особенности работы изоляции в режиме пульсирующего напряжения. Как следует из приведенных осциллографм, наложение постоянного напряжения резко изменяет форму кривой тока потерь: в кривой тока потерь исчезает ионный пик, наблюдающийся при переменных напряженностях более  $2 \text{ кв/мм}$ . При низких напряженностях, менее  $5 \text{ кв/мм}$ , наложение постоянного напряжения приводит к резкому уменьшению амплитуды тока потерь.

На рис. 3 и 4 для тех же образцов приведены зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от переменной составляющей

Рис. 2. Изменение формы тока потерь при наложении постоянной напряженности  $E''$  на переменное  $E'$ .

*a, б* —  $E'' = 0$  и  $E'' = 20 \text{ кв/мм}$ ,  $E' = 3,6 \text{ кв/мм}$ , температура  $60^\circ \text{C}$ ; *в, г* —  $E'' = 0$  и  $E'' = 20$ ,  $E' = 14,3$ , температура  $25^\circ \text{C}$ ; *д, е, ж, з* —  $E''$  соответственно 0; 20; 35,7 и  $50 \text{ кв/мм}$ , а  $E' = 14,3 \text{ кв/мм}$ , температура  $60^\circ \text{C}$ .



напряжения без и при наложении постоянного напряжения. Как следует из рис. 2, 3 и 4, при наложении постоянного напряжения потери значительно уменьшаются в области малых переменных напряженностей. Такое уменьшение потерь в бумажно-масляной изоляции было отмечено ранее и другими авторами. С. К. Медведев [Л. 2] также объясняет снижение потерь при наложении постоянного напряжения тем, что в этом случае почти отсутствуют потери, обусловленные ионной проводимостью масла. К сожалению, С. К. Медведев проводил опыты лишь при малых напряженностях, в основном до  $5 \text{ кв/мм}$ , а регистрация потерь производилась в мостовой схеме только по величине  $\operatorname{tg} \delta$ .

Осциллографирование тока потерь позволяет наглядно вскрыть причины их уменьшения при наложении постоянного напряжения на переменное. Действительно, наиболее сильное уменьшение потерь наблюдается в области слабых напряженностей — менее  $2 \text{ кв/мм}$ , т. е. в случае, когда при переменном напряжении движение ионов масла в масляных прослойках почти не ограничено. Отсутствие ионного пика в токе потерь при униполярной напряженности поля в масляной прослойке свидетельствует о том, что в этом случае потери определяются в основном потерями в клетчатке и сквозной проводимостью бумаги (проводимостью при постоянном напряжении), которая при напряженностях менее  $35 \text{ кв/мм}$  крайне незначительна. При больших напряженностях порядка более  $35 \text{ кв/мм}$  потери при наложении постоянного напряжения начинают увеличиваться (рис. 3). Значительное увеличение первой гармо-

ники тока потерь говорит о том, что в этом случае наложение постоянного напряжения приводит к увеличению сквозной проводимости и увеличению потерь в клетчатке.

Если в некоторой части периода приложенного напряжения напряженность в масляной прослойке проходит через нуль, то происходит быстрое рассасывание ионного заряда на поверхности раздела клетчатки и масла, что при последующем изменении знака напряжения приводит к резкому ионному пику. По отсутствию ионного пика и по его сглаживанию можно судить об униполярности напряженности в масляной прослойке.

Осциллограммы рис. 2 подтверждают это положение. Отсутствие ионного пика наблюдается при соотношении между значениями постоянного и переменного напряжения, равном  $2 \dots 2,8$ . Однако уже при наложении постоянного напряжения, равного амплитуде переменного, наблюдается значительное сглаживание формы тока потерь и уменьшение его амплитуды.

Аналогичные опыты по осциллографированию тока потерь были произведены на секциях конденсаторов, высушенных и пропитанных при остаточном давлении  $0,1 \text{ мм рт. ст.}$  конденсаторным маслом, имеющим при  $100^\circ \text{C}$   $\operatorname{tg} \delta = 0,005$ . Секции не подвергались ранее воздействию напряжения. В этом случае в кривой потерь при напряжении переменного тока отсутствует ионный пик. Это объясняется малой проводимостью свежего, хорошо очищенного трансформаторного масла. Наложение постоянного напряжения в этом случае не приводит к уменьшению потерь и сглаживанию формы тока потерь. В этом случае потери, определяемые проводимостью масла, значительно меньше, чем потери в клетчатке.

Из рис. 5 следует, что для этих образцов в области напряженностей от 0 до  $35 \text{ кв/мм}$  наложение постоян-

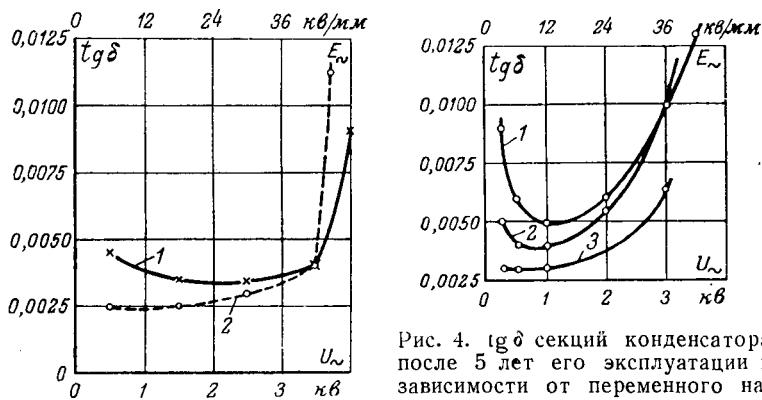


Рис. 3.  $\operatorname{tg} \delta$  секций конденсатора после 5 лет его эксплуатации в зависимости от переменного напряжения без (кривая 1) и при наложении (кривая 2) дополнительного постоянного напряжения.

$$U_- = V\sqrt{2} U_\sim; t^\circ = 20^\circ \text{C}.$$

1 — к секциям приложено только переменное напряжение; 2 — при наложении дополнительного постоянного напряже-

$$\text{ния } U_- = V\sqrt{2} U_\sim;$$

$$3 - \text{то же } U_- = 2V\sqrt{2} U_\sim.$$

$$t^\circ = 60^\circ \text{C}.$$

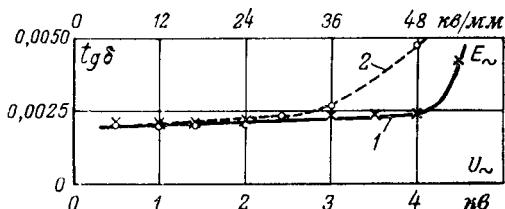


Рис. 5.  $\operatorname{tg} \delta$  секций конденсаторов, не бывших в эксплуатации, в зависимости от переменного напряжения без (кривая 1) и при наложении (кривая 2) дополнительного постоянного напряжения  $U_- = V\sqrt{2} U_\sim$ .

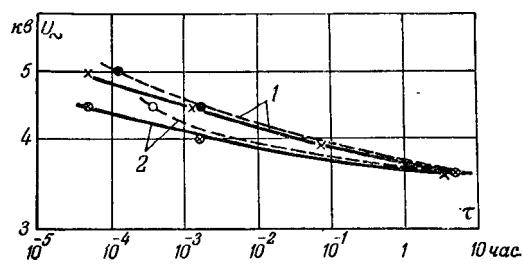


Рис. 6. Напряжение возникновения высокочастотных разрядов в зависимости от времени его воздействия для секций новых конденсаторов (7 листов бумаги толщиной 12 мкн).

1 — к секциям приложено переменное напряжение; 2 — приложено постоянное напряжение  $U_{\perp} = V_2 U_{\omega}$ . (Сплошные линии — возникновение высокочастотных разрядов при напряжении выдержки, указанном на ординате. Пунктирные линии — возникновение высокочастотных разрядов, остающихся при последующем снижении напряжения до 1,2 кВ).

ногого напряжения не изменяет значения потерь.

Подобные опыты были также проведены на секциях конденсаторов, залитых конденсаторным маслом различной степени очистки. Опыты показали, что заметное уменьшение потерь при наложении постоянного напряжения происходит в том случае, когда потери в масле сравнимы с потерями в клетчатке.

Как показано в процессе эксплуатации проводимость масла в толще изоляции секций конденсаторов увеличивается значительно больше, чем проводимость свободного масла, что объясняется затрудненностью обмена масла в секциях. Масло в конденсаторах, бывших несколько лет в эксплуатации, имеет при  $20^{\circ}\text{C}$   $\text{tg } \delta = 0,008$ , что соответствует проводимости  $\gamma_m \approx 5 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$ . В этом случае можно уже ожидать облегчения работы изоляции при наложении постоянного напряжения на переменное.

Крайне важными, определяющими процессы старения изоляции, являются также ионизационные характеристики.

Кривые рис. 6 показывают, что наложение постоянного напряжения весьма слабо изменяет напряжение ионизации. Это объясняется тем, что для появления ионизационных процессов определяющим является переменная составляющая приложенного напряжения, создающая напряжение на газовом включении, достаточное для его ионизации. В этих опытах возникновение ионизационных процессов определялось по появлению высокочастотных колебаний напряжения в диагонали моста.

Приведенный экспериментальный материал показывает, что при наложении на переменное напряжение постоянного, равного или несколько большего амплитуды переменного, возможно уменьшение потерь в изоляции за счет изменения формы кривой тока потерь (отсутствие ионной составляющей). Ионизационные характеристики изоляции при этом практически не изменяются. Следствием этого можно было ожидать замедление процессов старения изоляции конден-

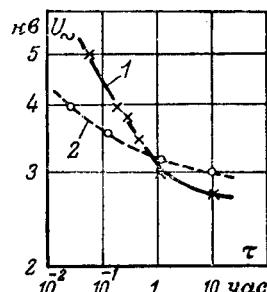


Рис. 7. Пробивное напряжение секций новых конденсаторов в зависимости от времени его воздействия.

1 — к секциям приложено переменное напряжение; 2 — приложено постоянное напряжение  $U_{\perp} = V_2 U_{\omega}$ .

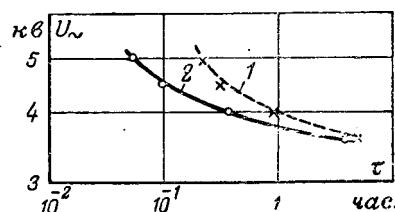


Рис. 8. Пробивное напряжение секций новых конденсаторов в зависимости от времени выдержки.

1 — к секциям приложено переменное напряжение; 2 — приложено постоянное напряжение  $U_{\perp} = V_2 U_{\omega}$ .

сатора. Однако следует иметь в виду, что при наложении постоянного напряжения изоляция будет подвергнута воздействию напряжения, равного по амплитуде сумме постоянного напряжения и амплитуды переменного напряжения.

Учитывая большой запас электрической прочности бумажно-масляной изоляции при обычных рабочих напряженостях, было признано целесообразным провести испытания в целях выяснения возможности замедления процессов старения изоляции.

Для этой цели были произведены две серии опытов. Первая серия проводилась на образцах с резко повышенной электропроводностью масла. Для этой цели были использованы секции конденсатора, бывшего около 5 лет в эксплуатации. Сравнительные данные среднего срока жизни этих образцов при переменном и пульсирующем напряжениях приведены на рис. 7. Средние сроки жизни кривых рис. 7 определялись при каждом значении напряжения на 6...10 образцах.

Вторая серия опытов проводилась на новых секциях, залитых очищенным минеральным маслом с проводимостью  $\gamma = 10^{-14} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$  (рис. 8).

Как для новых, так и для старых образцов в области напряженностей более 35 кВ/мм при наложении постоянного напряжения на переменное заметно значительное снижение срока жизни образцов.

При напряженностях поля ниже 35 кВ/мм наложение постоянного напряжения на новые секции приводит к незначительному уменьшению срока жизни. Наложение постоянного напряжения на секции, бывшие в эксплуатации, приводит к увеличению срока жизни. Область напряжений, которая соответствует возрастанию срока жизни при наложении постоянного напряжения, совпадает с областью снижения потерь в этом же режиме (рис. 3 и 7).

Пробою образцов, бывших в эксплуатации, предшествуют сильный их разогрев и резкое увеличение сквозной проводимости, легко фиксируемое в процессе выдержки образца при пульсирующем напряжении по значению зарядного тока, необходимого для сохранения заряда на конденсаторе. Следовательно, пробой старых секций имеет тепловой характер. Уменьшение потерь при наложении постоянного напряжения в определен-

ной области напряженностей приводит к возрастанию срока жизни изоляции.

В новых секциях пробой носит несколько иной характер. При большой амплитуде пульсирующего напряжения пробой происходит вследствие возникновения ионизационных процессов (высокочастотных разрядов) и он может произойти при меньшем разрушении диэлектрика, иначе говоря, при меньшем сроке его жизни. В этом случае наложение постоянного напряжения несколько ухудшает режим работы изоляции. Однако при напряженностях менее 35 кв/мм это ухудшение незначительно.

Описанные опыты позволяют сделать следующее заключение.

Для бумажно-масляной изоляции с проводимостью масла не более  $10^{-13} \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{см}}$  наличие постоянной составляющей в напряжении практически не влияет на режим работы изоляции. Наложение постоянного напряжения весьма слабо изменяет напряжение ионизации изоляции, которое предопределется переменной составляющей напряжения.

Значительные запасы по пробивному напряжению, принятые в настоящее время для изоляции конденсаторов переменного напряжения, позволяют считать не опасным повышение амплитуды приложенного напряжения за счет постоянной составляющей. В этом режиме появляется опасность электролитического разрушения изоляции и электродов (обкладок фольги). Это обстоятельство является существенным для работы изоляции с хлорированной пропиткой. Учитывая,

однако, хорошую работу бумажно-масляной изоляции на постоянном напряжении при напряженностях 40 ... 45 кв/мм, эти опасения следует считать излишними.

Для изоляции с проводимостью масла  $\gamma > 10^{-13} \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{см}}$  наличие постоянной составляющей в напряжении облегчает работу при напряженностях ниже 35 кв/мм. Наложение постоянного напряжения ликвидирует ионную составляющую тока потерь и уменьшает потери. Это приводит к увеличению срока службы изоляции.

Рабочие напряженности в конденсаторах на переменном напряжении при наличии постоянной составляющей могут быть выбраны, только исходя из переменной составляющей напряжения, при условии, что амплитуда напряженности не превзойдет значения, обычно принятого для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении (35 ... 40 кв/мм).

### Литература

1. Е. А. Марченко. Перенапряжения в установках продольной компенсации. Электричество, стр. 10, № 12, 1953.
  2. С. К. Медведев. Измерение угла диэлектрических потерь при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения. Электричество, стр. 52, № 6, 1952.
  3. Г. И. Сканави. Физика диэлектриков, ГИТТЛ, 1949.
  4. F. Liebscher. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens Werken, т. XXI, стр. 74, № 2, 1943.
- [28.12.1954]



## Учет сопротивлений трансформатора при определении сопротивления петли фаза—нуль

**Инж. М. Р. НАЙФЕЛЬД и инж. С. М. ЗАК**

Центрэлектромонтаж

В основе применения занулений в сетях низкого напряжения с заземленной нейтралью лежит требование отключения аварийной цепи. Для достижения отключения необходимо обеспечить такое сопротивление петли фаза — нуль, при котором ток однофазного замыкания (замыкание на зануленные части) был бы достаточным для расплавления ближайшей плавкой вставки или отключения автомата.

Чтобы обеспечить надежное отключение, необходимо соблюсти условие  $I_3 \geq k I_n$ , где  $I_3$  — ток короткого замыкания в цепи фаза — нуль;  $I_n$  — номинальный ток плавкой вставки или уставки максимального токового реле автомата;  $k$  — коэффициент, равный в соответствии с требованиями Правил 2,5 при защите плавкими вставками и 1,2 при защите автоматами.

Для проверки соответствия зануляющих устройств требованиям Правил необходимо определить полное сопротивление всего контура аварийного тока. Оно состоит из активных и реактивных сопротивлений: 1) питающего трансформатора; 2) фазного провода сети; 3) нулевого провода сети (или сети зануления); 4) других менее значительных сопротивлений в цепи замыкания — сопротивления контактов аппаратов и шин и реактивного сопротивления трансформаторов тока и проводников. Оно зависит также от: 1) мощности трансформатора; 2) рода прокладки проводов (кабель, воздушная линия, провода в стальных трубах); 3) материала фазных проводов и нулевого (зануляющего) провода; 4) взаимного расположения и расстояния между собой фазных проводов и нулевого (зануляющего) провода

В практике проектирования и монтажа занулений расчеты и измерения сопротивления петли фаза — нуль производятся часто без учета сопротивления питающего трансформатора. Такое допущение при стандартных трансформаторах со схемой соединений звезда — звезда может дать значительную погрешность, и расчетный ток однофазного замыкания может оказаться значительно выше фактического.

Для проверки влияния сопротивлений трансформатора авторы произвели ряд расчетов занулений в сетях с трансформаторами мощностью от 20 до 560 ква. Расчет тока однофазного замыкания в петле фаза — нуль с учетом сопротивлений обмоток трансформаторов производился по формуле

$$I_s = \frac{3U_\phi}{Z_{1m} + Z_{2m} + Z_{0m} + Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a} + 3Z_3}, \quad (1)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение сети;  $Z_{1m}$ ,  $Z_{2m}$ ,  $Z_{0m}$  — полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора;  $Z_{1a}$ ,  $Z_{2a}$ ,  $Z_{0a}$  — полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей линии;  $Z_3$  — полное сопротивление зануляющего провода.

Сопротивление зануляющего провода входит в формулу уточненным, так как ток однофазного замыкания в петле фаза — нуль равен уточненному току нулевой последовательности.

Ниже рассматриваются результаты расчетов для двух характерных случаев.

*Пример 1.* Воздушная линия протяженностью 200 м, напряжение сети 380/220 в, сечение проводов  $3 \times 50 + 1 \times 25 \text{ мм}^2$ , провода алюминиевые.

Реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей для воздушной сети определялись по следующим формулам:

$$X_{1a} = X_{2a} = 0,145 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_s}, \quad (2)$$

где  $D_{cp} = \sqrt{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}}$  — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A, B и C;

$r_s = 0,75r$  — эквивалентный радиус провода, см;  $r$  — истинный радиус провода;

$$X_{0a} = 0,435 \lg \frac{D_{0cp}}{\sqrt[3]{r_s D_{cp}^2}}, \quad (3)$$

где  $X_{0a}$  — реактивное сопротивление нулевой последовательности линии с учетом взаимоиндукции нулевой последовательности между фазным и зануляющим проводами;

$D_{0cp} = \sqrt{d_{A0} \cdot d_{B0} \cdot d_{C0}}$  — среднее геометрическое расстояние между проводами линии и зануляющим проводом;

$\sqrt[3]{r_s D_{cp}^2}$  — средний геометрический радиус системы трех проводов линии;

$$X_s = 0,435 \lg \frac{D_{0cp}}{r_s}, \quad (4)$$

$X_s$  — реактивное сопротивление нулевой последовательности зануляющего провода.

Полные сопротивления равны:

$$Z_{1a} = Z_{2a} = r_a + jX_a = r_a + j0,145 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_s};$$

$$Z_{0a} = r_a + jX_{0a} = r_a + j0,435 \lg \frac{D_{0cp}}{\sqrt[3]{r_s D_{cp}^2}};$$

$$3Z_3 = 3r_s + j3X_s = 3r_s + j0,435 \lg \frac{D_{0cp}}{r_s},$$

где  $r_a$  — активное сопротивление фазного провода;

$r_s$  — активное сопротивление зануляющего провода.

*Пример 2.* Провода проложены в стальных трубах, протяженность линии 100 м, напряжение сети 380/220 в, материал фазных проводов — медь, для зануления используются стальные трубы. Расчеты проводились для труб диаметром  $3/4"$  и  $1\frac{1}{2}"$ . Сечения фазных проводов принимались соответственно 6 и  $35 \text{ мм}^2$ .

Реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей при коротком замыкании между фазой и зануляющим проводом для проводов, проложенных в стальных трубах с использованием трубы в качестве зануляющего провода, определялись по формуле (2) и формуле

$$X_{0a} = 0,435 \cdot \lg \frac{r_n + r_s}{2 \sqrt[3]{r_s D_{cp}^2}}, \quad (5)$$

где  $r_n$  и  $r_s$  — наружный и внутренний радиусы трубы, см.

Внешней индуктивностью провод — труба пренебрегаем ввиду ее незначительности. Остальные обозначения аналогичны приведенным выше. Полные сопротивления равны:

$$Z_{1a} = Z_{2a} = r_a + j0,145 \lg \frac{D_{cp}}{r_s};$$

$$Z_{0a} = r_a + j0,435 \lg \frac{r_n + r_s}{2 \sqrt[3]{r_s D_{cp}^2}};$$

$$3Z_3 = 3r_s + j3X_s.$$

Результаты подсчетов сведены в табл. 1 и 2. Сопротивления стальных труб принимались по данным, приведенным в [Л. 1], сопротивления

трансформаторов — по табл. 3; сопротивления нулевой последовательности трансформаторов — по данным МТЗ.

Таблица 1

**Расчетные данные тока однофазного замыкания в конце воздушной линии по примеру 1 с учетом сопротивления трансформатора**

Мощность трансформатора, ква	Ток однофазного короткого замыкания, а	Мощность трансформатора, ква	Ток однофазного короткого замыкания, а
50	265	180	470
		320	500
100	420	560	520

В примере 1 без учета сопротивления трансформатора ток однофазного замыкания составил 565 а.

Таблица 2

**Расчетные данные тока однофазного замыкания (а) для примера 2 с учетом сопротивления трансформатора**

Мощность трансформатора, ква	Диаметр труб и сечения проводов	
	3/4"; 6 мм <sup>2</sup>	1 1/2"; 35 мм <sup>2</sup>
50	256	338
100	400	694
180	440	849
320	505	1 016
560	520	1 150

Без учета сопротивления трансформатора ток однофазного замыкания составил: при диаметре трубы 3/4" и сечении провода 6 мм<sup>2</sup> — 545 а, при диаметре трубы 1,5" и проводе 35 мм<sup>2</sup> — 1 600 а.

Таблица 3

**Активные и реактивные сопротивления трансформаторов, приведенные к напряжению 400 в**

Мощность трансформатора, ква	Сопротивления, ом			
	активное	реактивное прямой или обратной последовательности	полное нулевой последовательности <sup>1</sup>	полное сопротивление, поделенное <sup>2</sup> на 3
20	0,240	0,369	2,10	0,970
30	0,151	0,251	1,60	0,720
50	0,085	0,154	1,20	0,508
100	0,038	0,079	0,354	0,174
180	0,020	0,044	0,252	0,115
320	0,0095	0,026	0,170	0,075
560	0,0044	0,0127	0,119	0,0483

<sup>1</sup> Для определения  $r_{om}$  и  $X_{om} \cos \varphi$  может быть принят равным 0,3 — 0,5.

<sup>2</sup> Для удобства последующих подсчетов.

Данные табл. 1 и 2 подтверждают, что при определении тока однофазного замыкания в петле фаза — нуль недоучет в расчетах и измере-

4\*

ниях сопротивления питающих трансформаторов дает значительное завышение величины тока короткого замыкания и может привести в ряде случаев к отказу в отключении и появлению опасных напряжений на зануленных частях.

Например, для принятых в табл. 1 условий и номинальном токе плавкой вставки 200 а необходимо обеспечить ток замыкания 500 а, что возможно получить при трансформаторе мощностью 320 ква и выше. При расчете без учета сопротивления трансформатора можно прийти к ошибочному выводу о возможности сгорания вставок аварийной линии при более низких мощностях трансформаторов.

При защите той же линии автоматами их уставка может быть принята на 50% выше номинального тока плавкой вставки, а ток отключения — 1,2 тока уставки, что дает лучшие условия для защиты.

Для приведенного выше примера отключение будет обеспечено при токе 360 а, т. е. уже при трансформаторе мощностью 100 ква.

Влиянием сопротивления трансформатора можно пренебречь, если речь идет о линии с заданным большим сопротивлением проводов, значительно превышающим сопротивление трансформатора, например, при линиях со стальными проводами.

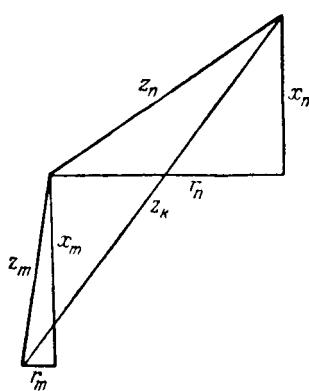
Оценивая результаты расчетов, приведенных в табл. 1 и 2, необходимо учесть, что ряд факторов облегчает условия отключения, другие утяжеляют их. В частности, чем меньше мощность трансформатора и чем меньше сопротивление линии, тем относительно больше влияние сопротивления трансформатора на общее сопротивление петли фаза — нуль. Вместе с тем уменьшение сопротивления линии всегда снижает общее сопротивление петли фаза — нуль и тем самым приводит к увеличению тока замыкания.

При замыканиях на выводах трансформатора длина линии и ее сопротивление равны нулю, в цепи замыкания участвуют только сопротивления трансформатора, и ток замыкания имеет максимальное значение для данной мощности трансформатора. Таким образом, произойдет ли в каждом отдельном случае отключение, — это целиком зависит от соотношения значений тока замыкания и тока плавления вставки или срабатывания автомата.

Приведенная методика дает возможность в необходимых случаях рассчитать ток однофазного замыкания в сетях с заземленной нейтралью трансформаторов, соединенных по схеме звезда — звезда. В обычной проектной практике производить столь сложные расчеты в большинстве случаев не требуется. Выбор надлежащих сечений зануляющих проводников обычно обеспечивает отключение аварийных участков<sup>1</sup>.

Вместе с тем после окончания монтажа установки и периодически в процессе эксплуатации

<sup>1</sup> Исключение могут составить воздушные линии относительно большой протяженности.



требуется проверять, удовлетворяет ли система зануления требованиям Правил. При измерениях сопротивления петли фаза — нуль автоматически учитываются все указанные выше факторы, включая проводимости всякого рода параллельных путей протекания тока замыкания — металлоконструкции, оболочки кабелей и т. п.

Сопротивление петли фаза — нуль  $r_n$  можно измерить постоянным током, а полное сопротивление петли  $Z_n$  — с использованием источника переменного тока без учета сопротивления трансформатора.

Зная  $r_n$  и  $Z_n$ , можно определить реактивное сопротивление петли  $X_n = \sqrt{Z_n^2 - r_n^2}$ .

Ток короткого замыкания аварийной цепи

$$I_s = \frac{U_\phi}{Z_n + \frac{Z_{1m} + Z_{2m} + Z_{0m}}{3}}. \quad (6)$$

После подстановки соответствующих величин формула (6) примет следующий вид:

$$I_s = \frac{U_\phi}{r_n + jX_n + \frac{2r_m + r_{om} + j2X_m + jX_{0m}}{3}}.$$

Сопротивления трансформатора принимаются по табл. 3.

Для практических целей можно пользоваться более простым приближенным методом, не прибегая к измерению сопротивления петли фаза — нуль постоянным током. Достаточно лишь измерить без учета сопротивления трансформатора полное сопротивление петли и сложить арифметически с полным сопротивлением питающего трансформатора по табл. 3. Такое допущение даст погрешность в сторону увеличения общего сопротивления. Величина погрешности будет зависеть от отношений активных и реактивных сопротивлений петли и трансформатора. Погрешность будет наибольшей тогда, когда активное сопротивление трансформатора и реактивное сопротивление петли малы, а активное сопротивление петли примерно равно реактивному сопротивле-

нию трансформатора. Наоборот, при малых значениях активного и больших значениях реактивного сопротивлений петли погрешность уменьшается. Сказанное может быть подтверждено векторной диаграммой (рисунок). Погрешность при таком допущении увеличивает общее сопротивление петли, создавая, таким образом, некоторый резерв. Учитывая, что особо неблагоприятное соотношение сопротивлений трансформатора и петли фаза — нуль встречается крайне редко, возможно, как показали расчеты, во избежание излишних затрат металла на сеть зануления принимать полное сопротивление петли фаза — нуль как арифметическую сумму сопротивления трансформатора и замеренной величины  $Z_n$  с введением понижающего коэффициента 1,05. Сделав такое допущение, мы существенно упрощаем измерения и подсчеты тока замыкания в петле фаза — нуль.

Для уяснения сказанного приведем один числовой пример подсчета тока однополюсного замыкания двумя методами: 1) путем геометрического сложения активных и реактивных сопротивлений (точный метод) и 2) при арифметическом сложении полных сопротивлений (приближенный метод).

Примем для рассмотрения наиболее простой случай, когда нулевой провод заземлен только в одном месте — у нейтрали трансформатора. Сеть воздушная 380/220 в питается от трансформатора мощностью 100 ква. Длина линии 300 м, провода — медные, сечение фазного провода 50 мм<sup>2</sup>, нулевого 25 мм<sup>2</sup>.

1. Точный метод. В аварийной цепи замерены следующие сопротивления:  $r_n = 0,31$  ом,  $Z_n = 0,38$  ом,

$$X_n = \sqrt{Z_n^2 - r_n^2} = \sqrt{0,38^2 - 0,31^2} = 0,22 \text{ ом.}$$

По табл. 3 определяем активное и реактивное сопротивления трансформатора 100 ква, принимая  $r_{om} = 0,177$  и  $X_{om} = 0,285$ . Полное сопротивление цепи

$$Z = 0,31 + j0,22 + \frac{2 \cdot 0,038 + 0,177 + j0,443}{3} = 0,39 + j0,367.$$

Ток короткого замыкания в петле

$$I_s = \frac{220}{0,39 + j0,367} = 410 \text{ а.}$$

2. Приближенный метод.  $Z_n = 0,38$  ом. Из табл. 3 для трансформатора 100 ква находим  $Z_m = 0,174$  ом:

$$I_s = \frac{1,05 \cdot U_\phi}{Z_n + Z_m} = \frac{1,05 \cdot 220}{0,38 + 0,174} = 417 \text{ а.}$$

Погрешность составляет  $\frac{417 - 410}{417} \cdot 100 = 1,6\%$ .

Допущение, практически приемлемое.

### Литература

- М. Р. Найфельд. О выборе стальных проводников в сетях зануления. Энергетик, № 1, 1954.
- М. Р. Найфельд и С. Г. Шестаков. Защита трансформаторов с заземленным нулем на стороне низкого напряжения от однофазных коротких замыканий. Электрические станции, № 9, 1946.
- С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1952.

# Расчет режимов сосредоточенных электродов при магнитоупругих измерениях

Кандидат техн. наук Б. Б. ТИМОФЕЕВ

Тбилисский научно-исследовательский институт сооружений и гидроэнергетики

Применение магнитоупрого метода для измерения упругих напряжений в стали связано с необходимостью пропускания через образец переменного тока такого значения, который создает в его поверхности напряженность магнитного поля, соответствующую наиболее сильному проявлению магнитоупрого эффекта. Если стальные образцы имеют периметры поперечных сечений порядка десятков сантиметров и больше, то для пропускания через образец переменного тока приходится применять электроды в виде перпендикулярных к поверхности образца проводников, своими концами прижатых (или припаянных) к ней.

Допустим, что размеры исследуемого образца таковы, что его можно представить заполняющим бесконечное полупространство. Допустим также, что электроды, через которые в образец поступает переменный ток, удалены друг от друга на бесконечно большое расстояние, а диаметр каждого из уединенных электродов настолько мал, что контакты между ними и проводящим материалом, заполняющим полупространство, являются точечными. Очевидно, что ток будет растекаться от такого уединенного точечного электрода радиально по поверхности проводящего материала при условии его электрической и магнитной изотропии, а также при условии перпендикулярности подводящего ток провода относительно поверхности раздела.

Предположив, что поверхностный эффект проявляется достаточно резко, для определения падения напряжения между двумя точками, взятыми на поверхности раздела, можно воспользоваться известной формулой для вычисления сопротивления при поверхностном эффекте, выведенной для равномерного поля на поверхности [Л. 1]:

$$Z = (1 + j) \frac{l}{p} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\gamma}}, \quad (1)$$

где  $Z$  — сопротивление проводника переменному току;

$\omega$  — частота;

$\mu$  — магнитная проницаемость;

$\gamma$  — удельная электропроводность;

$p$  — периметр поперечного сечения проводника;

$l$  — расстояние между точками измерения вдоль направления тока.

В случае точечного электрода можно считать поле равномерным только в пределах кольцевой поверхности с бесконечно малой шириной  $dr$ . Подставляя в формулу (1) вместо  $p$  длину периметра кольца  $2\pi r$ , а вместо  $l$  — величину  $dr$ , получаем:

$$\begin{aligned} U &= iZ = \frac{i(1+j)}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\gamma}} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \\ &= \frac{i(1+j)}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\gamma}} \ln \frac{r_2}{r_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U$  — падение напряжения между точками с координатами  $r_1$  и  $r_2$ ;  
 $i$  — ток, втекающий через точечный контакт.

Естественно, что поверхностный эффект проявляется достаточно резко только в тех областях проводящего материала, заполняющего полупространство, для которых существует условие

$$r \gg \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}.$$

Сравнение с результатами расчета по более точным формулам показало, что ошибка, вносимая при использовании упрощенной формулы (2), не превышает десятых долей процента уже при

$$r \geq 4 \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}, \quad (3)$$

что для обычной конструктивной стали и при переменном токе частоты 50 Гц составляет приблизительно 2 мм.

Расстояние до ближайшей к токовому электроду точки измерения  $r_1$  не следует брать меньше указанного, так как вблизи электрода относительные падения напряжения сильно возрастают и перестают зависеть от магнитной проницаемости. Указанное объясняется тем, что в непосредственной близости от точечного контакта плотность тока распределяется в проводящем материале по сферическому закону (обратно пропорционально квадрату радиуса) независимо от физических постоянных проводящего материала, заполняющего полупространство.

Таким образом, при расчетах, связанных с магнитоупрежими измерениями, нет необходимости использовать сложные формулы, учитывающие падения напряжения при любых значениях  $r$  (от нуля до бесконечности), а вполне допустимо ограничиться более простыми и достаточно точными формулами типа (2).

В большинстве случаев оказывается возможным получить расчетным путем (по Л. Р. Нейману [Л. 2]) или непосредственными измерениями на протяженных образцах зависимость сопротивления при поверхностном эффекте от напряженности равномерного магнитного поля на поверхности:

$$R = f_1(H); \quad X = f_2(H),$$

где  $R$  и  $X$  — активное и реактивное сопротивления, отнесенные к квадрату, выделенному на поверхности;

$H$  — действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности проводника.

По аналогии с формулой (2) можно написать:

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{f_1(H)}{r} dr = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{I}{2\pi r_1}}^{\frac{I}{2\pi r_2}} \frac{f_1(H)}{H} dH. \quad (4)$$

Соответствующее выражение можно написать и для реактивного сопротивления.

Обычно подбор непрерывной аналитической функции, заменяющей  $f(H)$ , является довольно трудоемким. Поэтому для единичных расчетов по формуле (4) удобнее пользоваться кусочно-линейной аппроксимацией, которая, как это будет видно из дальнейшего, обеспечивает вполне достаточную точность.

На рис. 1 представлена зависимость активного сопротивления углеродистой неотожженной стали, отнесенного к квадрату, выделенному на поверхности, от тока, приходящегося на единицу длины периметра поперечного сечения, при частоте 1 000 гц. Пунктирные прямые дают кусочно-линейную замену рассматриваемого участка  $f(H)$ .

Пользуясь обозначениями, приведенными на рис. 1, можно формулу (4) переписать в следующем виде:

$$R = \frac{1}{2\pi} \left\{ R'_0 - R_0 - \frac{I}{2\pi H_m} \left( \frac{R_m - R_0}{r_2} + \frac{R'_0 - R_{10}}{r_1} \right) + R_0 \ln \frac{H_m 2\pi r_2}{I} + R'_0 \ln \frac{I}{2\pi r_1 H_m} \right\}. \quad (5)$$

На рис. 2 изображена зависимость между сопротивлением и током при удалении точек измерения от центра электрода на расстояния  $r_1 = 2,4$  мм и  $r_2 = 12$  мм. Кривая получена опытным путем на массивном листе из той же стали, что и образец, которому соответствует кривая рис. 1. Нанесенные крестиками результаты расчета по формуле (5) хорошо ложатся на основную кривую.

При более сложном очертании графика зависимости между сопротивлением и током, чем это изображено на рис. 1, можно применить кусочную аппроксимацию не двумя, а тремя или большим числом прямых (парабол или гипербол), что соответственно увеличит число членов формулы (5).

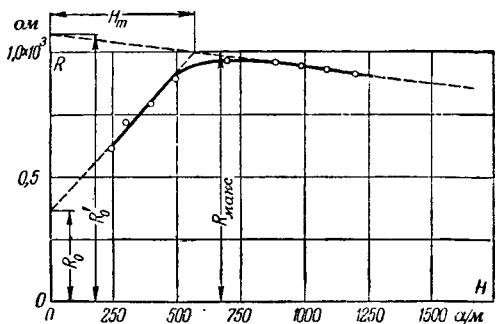


Рис. 1. Сопротивление стального протяженного образца при  $f = 1000$  гц в зависимости от напряженности магнитного поля на его поверхности.

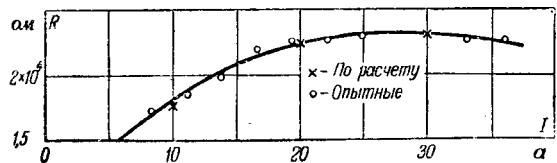


Рис. 2. Активное сопротивление при  $f = 1000$  гц между точками  $r_1 = 2,4$  мм и  $r_2 = 12$  мм, полученное опытным путем.

Магнитоупругий эффект наиболее резко проявляется при напряженности магнитного поля, соответствующей максимуму магнитной проницаемости. При некотором выбранном расположении измерительных контактов через точечный электрод следует пропускать ток вполне определенного значения. Для рассмотренного выше числового примера наивыгоднейший ток — 28 а, соответствует максимуму сопротивления по кривой рис. 2. Такое большое значение тока приводит к необходимости осуществления токового контакта не точечным, а в виде поверхности касания конечных размеров. В зависимости от материала токового контакта, значения тока, расположения измерительных контактов и т. п. площадь касания колеблется от десятых долей до нескольких  $\text{мм}^2$ .

Следует заметить, что падение напряжения, соответствующее наивыгоднейшему току, весьма мало. Для рассмотренного примера оно составляет  $6,53 \cdot 10^{-3}$  в. Измерение таких незначительных напряжений переменного тока приходится осуществлять при помощи компенсационных или дифференциальных схем.

Рассмотренная выше комбинация уединенного точечного токового электрода с двумя измерительными контактами наиболее удобна для измерения напряженного состояния стальных пластин, как, например, в магнитоупругих манометрах [Л. 3]. Для массовых измерений напряжений в стальных конструкциях магнитоупругим методом автор применяет прижимные четырехэлектродные щупы с двумя токовыми и двумя измерительными контактами (рис. 3). Для расчета такого щупа или устройства с большим числом токовых контактов следует воспользоваться более общей формулой, выведенной на основании решения волнового уравнения для случая резкого проявления поверхностного эффекта (приложение):

$$\dot{U} = \frac{1+j}{4\pi} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \times \times \ln \frac{[(x_2 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2][(x_2 - d_q)^2 + (y_2 - b_q)^2]}{[(x_1 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2][(x_2 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2]}, \quad (6)$$

где  $x_1, y_1, x_2$  и  $y_2$  — координаты точек измерения на поверхности материала, заполняющего полупространство;

$I_q$  — ток, протекающий через  $q$ -тый токовый контакт с координатами  $d_q$  (вдоль оси  $x$ ) и  $b_q$  (вдоль оси  $y$ ).

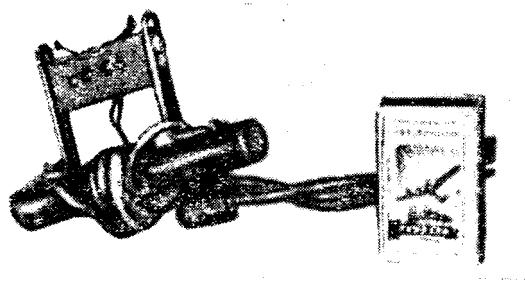


Рис. 3. Прижимной четырехэлектродный щуп.

Следует заметить, что выражение (2) является частным случаем формулы (6).

Чтобы получить расчетную формулу для щупа с двумя токовыми и двумя измерительными контактами (рис. 3), следует в (6) подставить следующие значения:

$$\begin{aligned} n &= 2; I_1 = -I_2 = I; b_1 = b_2 = 0; d_1 = 0; \\ d_2 &= d; x_1 = d - x_2 = x, \end{aligned}$$

после чего получаем:

$$\dot{U} = I \frac{1+j}{\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\alpha}} \ln \frac{d-x}{x}.$$

Принимая во внимание рекомендации Л. Р. Неймана [Л. 2] относительно учета нелинейности и неоднозначности магнитной проницаемости, можно написать:

$$\dot{U} = I \frac{1+j0,6}{\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu_e}{\gamma}} \ln \frac{d-x}{x}, \quad (7)$$

где  $d$  — расстояние между токовыми электродами;

$x$  — расстояние между токовым и ближайшим к нему измерительным электродами;

$\mu_e$  — магнитная проницаемость, определяемая из основной кривой намагничивания для напряженности, равной действующему значению напряженности магнитного поля на поверхности раздела.

В рассматриваемом случае линии вектора плотности тока не перпендикулярны к линиям, вдоль которых значение напряженности магнитного поля на поверхности постоянно<sup>1</sup>. Это исключает возможность применения расчета, аналогичного рассмотренному выше случаю уединенного электрода. Поэтому падение напряжения, соответствующее наивыгоднейшему режиму, находится приближенно путем подстановки в (7) следующего значения сопротивления, отнесенного к квадрату, выделенному на поверхности:

$$Z_\kappa \approx 0,8Z_m = 0,8(1+j0,6) \sqrt{\frac{\omega \mu_{sm}}{\gamma}},$$

где  $\mu_{sm}$  — наибольшее значение магнитной проницаемости по основной кривой намагничивания.

Таким образом расчетная формула для щупа приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} U &= \frac{0,8IZ_m}{\pi} \ln \frac{d-x}{x} = \\ &= \frac{0,8I}{\pi} (1+j0,6) \sqrt{\frac{\omega \mu_{sm}}{\gamma}} \ln \frac{d-x}{x}. \end{aligned} \quad (8)$$

Наивыгоднейшее значение тока тоже находится приближенно. Для этого делается близкое к действительности допущение, что при наивыгоднейшем значении тока напряженность магнитного поля на поверхности раздела, в середине расстояния между токовыми электродами, равна напряженности, соответствующей максимуму сопротивления при равномерном поле на поверхности. Так как составляющие напряженности магнитного поля в этом случае имеют значения (приложение)

$$H_x = 0; H_y = \frac{2I}{\pi d},$$

то наивыгоднейший ток щупа

$$I_\kappa = \frac{\pi d (H_m)_e}{2}, \quad (9)$$

Если в нашем распоряжении имеется основная кривая намагничивания, то значение наивыгоднейшего тока определяется с использованием правила Л. Р. Неймана [Л. 2]:

$$(H_m)_e = H_{sm},$$

где  $H_{sm}$  — значение напряженности, соответствующее максимальной магнитной проницаемости.

Размеры щупа (рис. 3):

$$d = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad x = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Для стали, характеризующейся графиком рис. 1,

$$(H_m)_a = 700 \text{ а/м}, \quad R_m = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ ом}.$$

Воспользовавшись формулой (9), находим наивыгоднейший ток:

$$I_\kappa = \frac{\pi 45 \cdot 700 \cdot 10^{-3}}{2} \approx 50 \text{ а.}$$

Расчетное падение напряжения при механически незагруженной стали определим по формуле (8):

$$(\dot{U}_\kappa)_a = 0,8 \frac{50}{\pi} \cdot 9,7 \cdot 10^{-4} \ln \frac{45 - 8,5}{8,5} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ в.}$$

**Приложение.** Формула для случая нескольких токовых электродов. Примем допущение о постоянстве магнитной проницаемости. Тогда для решения поставленной задачи о поверхностном эффекте необходимо воспользоваться следующей записью волнового уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} &= j \omega \mu H_x; \\ \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} &= j \omega \mu H_y; \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} &= j \omega \mu H_z, \end{aligned} \right\} \quad (I,1)$$

где  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$  — проекции вектора напряженности магнитного поля на оси  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

<sup>1</sup> За исключением плоскости, проведенной через оси токовых электродов.

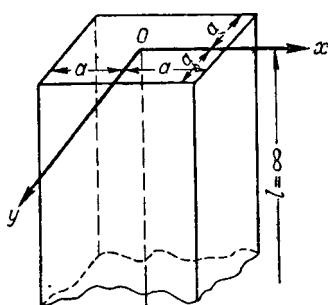


Рис. 4.

Нетрудно убедиться, что следующие решения удовлетворяют системе уравнений (I,1):

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} M_q \frac{y - b_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ H_y &= e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} M_q \frac{x - d_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ H_z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (I,2)$$

где  $M_q$ ,  $b_q$  и  $d_q$  — некоторые произвольные постоянные.

Для определения составляющих вектора плотности тока воспользуемся следующим уравнением:

$$\delta = \operatorname{rot} \mathbf{H};$$

поэтому

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \sqrt{j \omega \gamma \mu} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} M_q \frac{x - d_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ \delta_y &= \sqrt{j \omega \gamma \mu} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} M_q \frac{y - b_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ \delta_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (I,3)$$

Полученное решение соответствует  $n$  параллельным осевидным токовым электродам, которые пересекают поверхность проводящего материала, заполняющего полупространство, совмещенное с плоскостью  $z = 0$ . Точки пересечения имеют координаты: вдоль оси  $x - d_q$  и вдоль оси  $y - b_q$ .

Каждый из осевидных электродов представляет собой бесконечно тонкую, бесконечно длинную и бесконечно хорошо проводящую нить, параллельную оси  $z$ . Так как проводимость нитей бесконечно велика, линии плотности тока выходят из них, преломляясь под углом  $90^\circ$ . Вследствие этого  $\delta_z = 0$  во всем проводящем материале, заполняющем полупространство. Токи, втекающие или вытекающие из проводящего материала, характеризуются коэффициентами  $M_q$ . Практическое осуществление таких осевидных электродов мало вероятно, однако значимость полученных решений заключается в том, что они в широких пределах применимы к точечным электродам, осуществление которых весьма просто.

Произвольные постоянные  $M_q$  определяются из условия неразрывности линий вектора плотности тока. Для этого допустим, что  $b_i = 0$  и  $d_i = 0$ . Представим себе поверхность в виде бесконечно длинной прямоугольной призмы, ориентированной относительно координатных осей так, как это показано на рис. 4. Размеры призмы вдоль оси  $x$  составляют  $2a$ , вдоль оси  $y — 2a$ , а вдоль оси  $z$  — бесконечность.

Пусть  $a$  меньше любого из  $b_q$  и  $d_q$ , за исключением  $b_i$  и  $d_i$ , которые приняты равными нулю. Полный ток, пронизывающий поверхность,

$$I_i = 4 \left[ \int_{y=0}^{y=a} \int_{z=0}^{z=\infty} \delta_x dy dz + \int_{x=0}^{x=a} \int_{z=0}^{z=\infty} \delta_y dx dz \right]. \quad (I,4)$$

Подставляя в интеграл  $\delta_x$  и  $\delta_y$  из (I,4), нетрудно получить:

$$I_i = 2\pi M_i;$$

поэтому

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -\frac{1}{2\pi} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \frac{y - b_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ H_y &= \frac{1}{2\pi} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \frac{x - d_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \end{aligned} \right\} \quad (I,5)$$

$$\left. \begin{aligned} i_x &= \frac{\sqrt{j \omega \gamma \mu}}{2\pi} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \frac{x - d_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}; \\ i_y &= \frac{\sqrt{j \omega \gamma \mu}}{2\pi} e^{-z} \sqrt{j \omega \gamma \mu} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \frac{y - b_q}{(x - d_q)^2 + (y - b_q)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (I,6)$$

Для определения падения напряжения между какими-либо двумя точками на поверхности проводящего материала, заполняющего полупространство, необходимо воспользоваться следующей очевидной формулой:

$$U = \frac{1}{\gamma} \int_{y=y_1}^{y_2} \delta_x dx + \frac{1}{\gamma} \int_{x=x_1}^{x_2} \delta_y dy.$$

Поэтому, воспользовавшись выражениями (I,6), получаем:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{j \omega \mu}{\gamma}} \sum_{q=1}^{q=n} I_q \times \times \ln \frac{[(x_2 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2][(x_2 - d_q)^2 + (y_2 - b_q)^2]}{[(x_1 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2][(x_2 - d_q)^2 + (y_1 - b_q)^2]}.$$

#### Литература

1. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, ч III, 1954.
2. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1949.
3. Б. Б. Тимофеев. Магнитоупругий манометр. Авторское свидетельство № 96332.

# Из опыта работы

## Автоматический контроль изоляции электрических установок 380 в

Инж. Н. В. ОЛЕХНОВИЧ и инж. В. К. ЯСНЫЙ

Печорский филиал ВУГИ

В промышленных электросетях 380 в в самых разнообразных условиях работает свыше десятка миллионов электродвигателей, от бесперебойной работы которых зависит производительность труда во всех отраслях производства. С ними повседневно сталкиваются многие миллионы рабочих.

В обеспечении высоких показателей эксплуатации сетей 380 в особо важную роль играет наблюдение за состоянием изоляции. Повреждение изоляции и снижение ее сопротивления ниже допустимой величины приводят к авариям, вызывают опасность пожаров, поражения людей электрическим током, а в некоторых отраслях производства — и опасность взрывов.

Для предотвращения аварий и перечисленных опасностей недостаточно периодических измерений изоляции отдельных агрегатов; необходим непрерывный контроль сопротивления изоляции сети в целом.

Известные [Л. 1 и 2] способы измерения изоляции сетей с изолированной нейтралью при помощи регистрирующего прибора с последующей обработкой ленты или посредством нескольких измерений с построением диаграмм хороши для научных исследований, но непригодны для оперативного и инспекторского учета. Контрольный прибор для оперативного и инспекторского учета должен иметь устройство, позволяющее учитывать длительность работы системы с сопротивлением изоляции ниже установленной величины, обеспечивать визуальный непрерывный контроль уровня изоляции, подавать сигнал о снижении уровня изоляции контролируемого объекта в пункт, где дежурит обслуживающий персонал.

Такой прибор по предложению Н. В. Олехновича разработан авторами настоящей статьи и применен в условиях эксплуатации. При этом было использовано преимущество сетей с изолированной нейтралью, заключающееся в возможности контроля сопротивления изоляции трехфазной системы по отношению к земле посредством наложения постоянного тока на цепь переменного тока без отключения рабочего напряжения.

Общий вид взрывобезопасного прибора автоматического контроля изоляции для угольных шахт представлен на рис. 1, а схема его — на рис. 2.

Рабочая цепь прибора состоит из индуктивности со сталью 4, нагрузочного сопротивления 3, магнитоэлектрического реле управления 5, килоомметра 6. Питается она через селеновый выпрямитель 2 от вторичной обмотки присоединенного к сети 380 в трансформатора 1. Второй конец рабочей цепи прибора присоединяется к за-

земленному корпусу прибора. Таким образом, цепь замыкается через сопротивление изоляции всех трех фаз установки, и постоянный ток в цепи определяется суммарным сопротивлением всех трех фаз, соединенных параллельно.

Когда сопротивление изоляции опустится ниже установленной величины, реле управления 5 сработает и включит счетчик 12, отчитывающий время работы со сниженной изоляцией, и контакты сигнализации 10. При этом будет послан сигнал о повреждении изоляции. Уставка, при которой появляется сигнал и начинается отсчет времени работы с пониженной изоляцией, была принята равной 5 ком.

Исследуемые подземные сети, как правило, питались от одного или двух параллельно работающих трансформаторов 180 ква и имели две ... четыре питающие линии низкого напряжения с 15 ... 30 токоприемниками и 30 ... 70 единицами электрооборудования при длине кабеля 1 ... 3 тыс. м. Надземные сети были более разветвлены, питались от трансформатора 560 ква и имели 100 ... 110 токоприемников с установленной мощностью до 1 000 ... 1 200 квт.

Результаты изучения состояния изоляции и опыта эксплуатационного контроля взаимно дополняли друг друга. Были выявлены характерные закономерности динамики изменения состояния изоляции сети и причины, вызывающие ее ухудшение.

При отсутствии контроля сопротивление изоляции всех трех фаз в подавляющем большинстве случаев держалось на уровне 1 ... 2 ком, что было значительно ниже допустимого для данного типа сетей по условиям безопасности нижнего предела 3,5 ком [Л. 1 и 3]. Наличие контроля позволило поднять и устойчиво повсеместно поддерживать сопротивление изоляции на уровне 10 ... 15 ком.

Как видно из рис. 3 и 4, характер изменения изоляции примерно одинаков в случае как

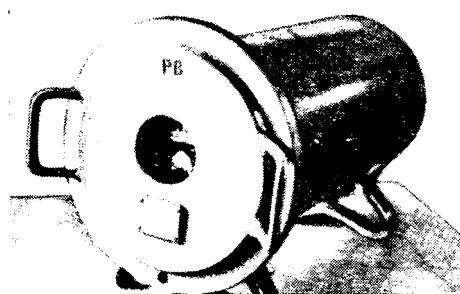


Рис. 1. Общий вид взрывобезопасного прибора автоматического контроля изоляции для угольных шахт.

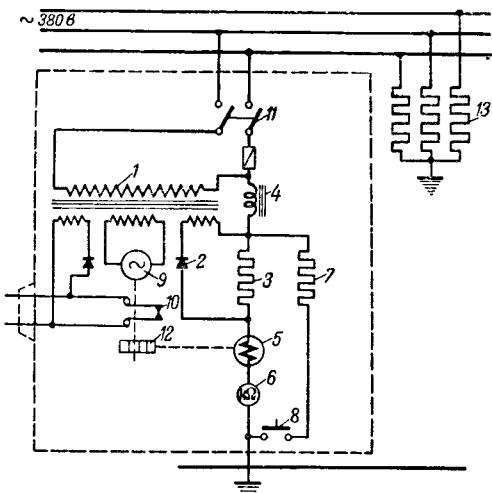


Рис. 2. Схема прибора автоматического контроля изоляции.

1 — трансформатор; 2 — селеновый выпрямитель; 3 — нагрузочное сопротивление; 4 — индуктивность со сталью; 5 — реле управления; 6 — килоомметр; 7 — контролльное сопротивление; 8 — контрольная кнопка; 9 — синхронный двигатель; 10 — контакты сигнала; 11 — рубильник блокировки; 12 — счетчик; 13 — сопротивление изоляции трех фаз.

подземных, так и надземных сетей. Сопротивление изоляции надземных сетей до начала контроля несколько выше, чем подземных. При наличии же контроля различие это исчезает.

Обнаружено, что резкое понижение сопротивления изоляции отдельных агрегатов настолько сильно воздействует на общее сопротивление

изоляции, что по показаниям прибора оказалось возможным следить и за состоянием изоляции отдельных агрегатов, замечать начинающееся повреждение электрооборудования. Такого рода случаи понижения изоляции отмечены на рис. 4 пунктирными кругами. Общее сопротивление изоляции понижается при включении в работу отсыревшего оборудования и сушке его во время работы.

Наблюдения, проводившиеся в течение 6 лет, показали, что источником ухудшения изоляции ниже 5 ... 10 к $\mu$ ом являются не рассредоточенные утечки, а повреждения изоляции в определенных местах. Измерения изоляции отдельных единиц электрооборудования, проведенные в цехах строительных, механических и лесообрабатывающих предприятий, подтвердили это (табл. 1).

Как видно из табл. 1, большая часть двигателей и кабелей имела весьма высокий уровень изоляции; только у отдельных двигателей сопротивление изоляции было ниже 0,3 м $\mu$ ом. Но эти двигатели и определили общее снижение изоляции системы. Характерно, что поврежденную изоляцию, как правило, имели двигатели, соединенные с наименее ответственными агрегатами, которые наиболее доступны для ревизии, но наблюдение за которыми в силу их меньшей значимости ослаблено.

Повседневный контроль изоляции позволил снизить длительность работы с ухудшенной изоляцией. В 1949 г. в первый месяц контроля только 5 % времени система работала с нормальным

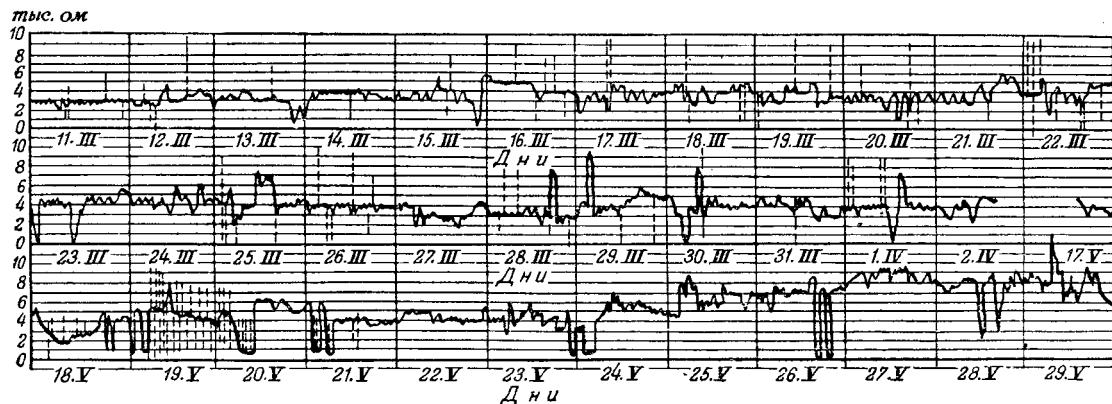


Рис. 3. Изменение сопротивления изоляции шахтной подземной сети 380 в.

Таблица 1

Предприятие	Общее число двигателей (числитель) и кабелей (знаменатель) с сопротивлением изоляции, м $\mu$ ом	Общее сопротивление, м $\mu$ ом															
		при всех двигателях				с наихудшей изоляцией				при всех кабелях							
		100 и выше	15 ... 100	5 ... 15	3 ... 5	0 ... 0,3	0	без одного двигателя	без двух двигателей	без четырех двигателей	без шести двигателей	без одного кабеля	без двух кабелей	без четырех кабелей	без семи кабелей	без восьми кабелей	
Механический завод	110/69	74/4	25/29	3/14	6/14	-/6	2/2	0	-	0,112	0,202	-	-	-	0,055	-	0,085
Лесообрабатывающий завод	73/-	-/-	17/-	43/-	7/-	6/-	-/-	0,021	-	0,039	-	0,078	-	-	0,027	-	-
Завод строительных материалов	69/69	11/24	23/17	17/22	11/3	5/1	2/1	0,058	0,135	-	-	-	0	0,014	0,181	-	1,08

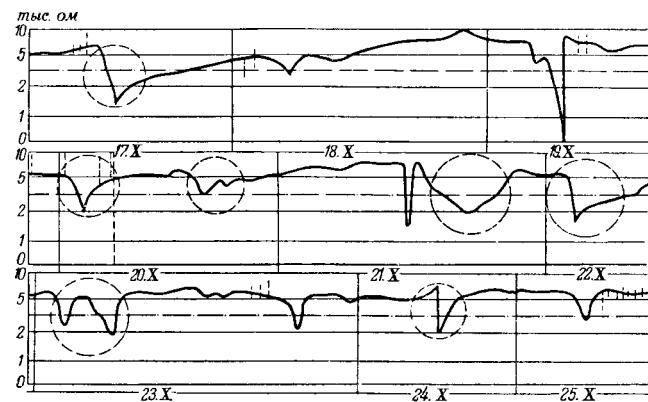


Рис. 4. Изменение сопротивления изоляции 380 в завода строительных материалов.

уровнем изоляции, а на шестой месяц длительность работы с нормальным уровнем поднялась до 60 %. В 1954 г., когда эксплуатационный контроль изоляции был достаточно наложен, время работы сети с ухудшенной изоляцией составляло всего несколько процентов, а на подстанциях с дистанционным контролем—менее 1 % (табл. 2).

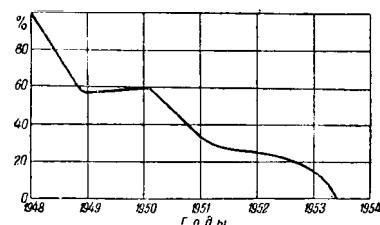
Таблица 2

Число контролируемых подстанций	Длительность работы с уровням изоляции ниже 5 ком. % к общему времени работы	Примечание
8	0,83	Имеется дистанционный контроль сопротивления изоляции
7	1,54	Дистанционный контроль отсутствует
3	1,86	Дистанционный контроль отсутствует
3	2,25	Дистанционный контроль отсутствует
1	5,08	Контроль изоляции только вводится

После введения контроля изоляции число повреждений оборудования на указанных подстанциях резко сократилось. В 1949 г. до начала контроля случаи двухфазного замыкания на корпус имели место 3—4, а однофазного замыкания—до 12 раз в месяц. После введения контроля двухфазные замыкания прекратились, а число однофазных снизилось до 4—5 раз. В 1954 г., когда контроль стал систематическим, на подстанциях насчитывалось в среднем 1,58 случая повреждения изоляции в месяц. Среднее время ликвидации повреждения составило 1...2 часа.

Таким образом, опыт эксплуатации свидетельствует о том, что при наличии непрерывного автоматического контроля изоляции и соответствующей организации этого контроля сопротивление изоляции сетей, даже разветвленных и находящихся в неблагоприятных условиях (шахтные подземные сети), можно поддерживать на высоком уровне, обеспечивающем безаварийность и безопасность. На подстанциях шахт Печорского бассейна, где введен автоматический контроль изоляции, сопротивление изоляции устойчиво поддерживается на уровне 10...20 ком. За все 5 лет эксплуатации приборов автоматического контроля на подстанциях не зарегистрировано ни

Рис. 5. Изменение числа случаев электротравматизма на каждые 1 000 чел. работающих. Число случаев в 1948 г. принято за 100%.



одного случая пожара или взрыва, вызванного неисправностью изоляции электрооборудования, ни одного поражения электрическим током.

Число случаев электротравматизма на шахтах комбината «Воркутуголь» неуклонно снижалось из года в год, пока в 1954 г. не упало до нуля (рис. 5). Существенно снизилась и аварийность электрооборудования. За 1954 г. на обследованных подстанциях удалось в 222 случаях предотвратить выход из строя отсыревших токоприемников.

Контроль изоляции явился средством, дисциплинирующим обслуживающий электроустановки персонал, и существенно усилил внимание к профилактике оборудования. В этом важную роль сыграл учет, который позволил оценивать качество работы каждого электрика и сравнивать работу различных электроустановок и предприятий между собой.

Применение приборов автоматического контроля изоляции дало существенную экономию за счет предупреждения выхода из строя электрооборудования и обеспечения бесперебойности снабжения электроэнергией.

Монтаж и эксплуатация приборов автоматического контроля изоляции не представляли трудностей и осуществлялись дежурным персоналом без дополнительных затрат на рабочую силу. Расходы на контроль изоляции сводились в основном к стоимости приборов. При серийном выпуске стоимость их, вероятно, не будет превышать 500...600 руб.

Условия работы электрооборудования на шахтах комбината «Воркутуголь» не отличаются от условий, имеющих место на шахтах других угольных бассейнов (степень сырости горных выработок, системы ведения работ, применяемые типы оборудования и др.). Поэтому есть все основания предположить, что система автоматического контроля изоляции будет эффективна и в сетях низкого напряжения угольных шахт других бассейнов, а также в сетях тех предприятий, где условия лучше, чем на шахтах, и где сети работают с изолированной нейтралью.

#### Литература

1. Л. П. Подольский. Влияние заземления нейтрали сетей низкого напряжения на условия безопасности. Госэнергоиздат, стр. 128, 1946.
2. Sahilka. Определение сопротивления изоляции и емкости одной фазы цепи переменного тока под напряжением. ЕГЗ, стр. 485 и 457, 1907.
3. Р. М. Лейбов. Утечки в шахтных электрических сетях. Углехимиздат, стр. 369, 1952.

# К вопросу о схемах управления электродвигателями

Инж. Г. К. ЦВЕРАВА и инж. Е. Г. ГУРЕВИЧ

Судя по многочисленным статьям, опубликованным за последнее время в нашей электротехнической периодической литературе, намечается отход от сложных, насыщенных аппаратурой схем управления и автоматики крупных асинхронных и синхронных электродвигателей. Характерно, что тенденция эта, подкрепленная опытом эксплуатации, зародилась не в проектных организациях и не на заводах электротехнической промышленности, а среди работников, занимающихся эксплуатацией электроустановок промышленных предприятий и много перетерпевших от подчас «замысловатых» и не оправдавших себя на деле схем.

Для простых одномашинных электрических приводов нереверсивных механизмов (газодувок, компрессоров, мельниц, насосов), как показывает опыт, в том числе авторов этих строк, могут быть применены довольно простые схемы управления, в которых ускорение или подача возбуждения осуществляются преимущественно в функции времени. Очень важно, что наладка таких схем может быть произведена на остановленном агрегате одновременно с производством ремонтных работ на двигателе или самом механизме.

При выборе аппаратуры предпочтение следует отдать электромагнитным реле типа РЭ180 либо моторным реле типа Е52 или РВТ1200 и полностью отказаться от маятниковых конструкций, весьма ненадежных при частых включениях. Для двигателей сравнительно небольшой мощности (до 100 квт), нуждающихся в регулировании скорости вращения, целесообразно вовсе отвергнуть релейную автоматику и перейти на контроллерное управление контакторами ускорения.

Проблема широкого внедрения переменного оперативного тока может быть решена в полном объеме только после освоения промышленностью дистанционных приводов, работающих на переменном токе.

Ниже описываются некоторые упрощения, внесенные в проектные схемы управления электродвигателями на одном из заводов цветной металлургии. Изменения были вызваны затруднениями, имевшими место при наладке и эксплуатации этих схем, причем результаты переделок доказали правильность приведенных выше соображений.

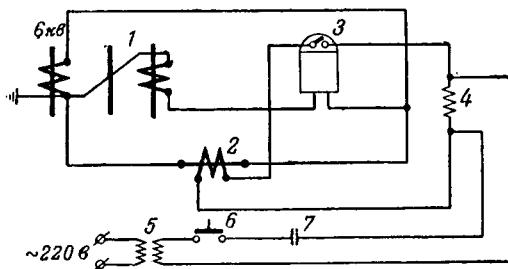


Схема питания цепи аварийной кнопки.

1 — трансформаторы тока ТПФ; 2 — быстро насыщающийся трансформатор тока ТКБ; 3 — реле ИТ-81; 4 — отключающий электромагнит привода ПРБА-500; 5 — трансформатор 220/12 в.; 6 — аварийная кнопка; 7 — блок-кнопка масляного выключателя.

Была подвергнута реконструкции схема пуска двигателя шаровой мельницы с фазным ротором (6 кв, 360 квт).

Двигатель был укомплектован магнитной станцией серии СНЛ6702-65БЗ с реле типа ЭРЭ191, включенными в каждую фазу цепи ротора. Как известно, это реле является основным в автоматике станции, действует в зависимости от величины пускового тока в роторе и предназначено для управления включением контакторов ускорения.

Ввиду непостоянства режима работы мельницы реле не срабатывало при токе в роторе, отличавшемся от выбранного в результате настройки при заданной загрузке, что приводило к отказу магнитной станции. Требовалась повторные наладки схемы, вызывавшие простой оборудования.

Для устранения этого было предложено применить схему с реле времени типа РЭ185, действие которых не зависит от тока ротора и которые с заданной последовательностью выдержек времени действуют на контакторы ускорения. Двухгодичная эксплуатация показала, что новая схема пуска вполне надежна, а аппаратура не требует никакого дополнительного регулирования. Следует добавить, что и при постоянной величине загрузки приводимого механизма (компрессоры) удобнее всего применять пуск в функции времени.

Упрощена схема регулирования скорости вращения асинхронных двигателей вращающихся печей (380 в, 60...100 квт). Предусмотренные проектом маятниковые реле времени, дающие импульс на включение контакторов ускорения, были изъяты как усложняющие эксплуатацию. Оставлены только ручные командоконтроллеры, фиксаторы которых обеспечивают надлежащую выдержку времени при переключениях контакторов ускорения.

В качестве примера внедрения переменного оперативного тока можно привести схему питания цепи аварийной кнопки асинхронных двигателей 6 кв насосных станций.

Включение двигателя производится масляным выключателем с ручным приводом типа ПРБА-500, установленным в камерах комплектного распределительного устройства вне сферы обслуживания машиниста. Защита выполнена при помощи реле ИТ81, действующего через быстро насыщающийся трансформатор тока ТКБ1 на электромагнит привода.

Подсчеты и измерения показали, что имеющийся в данном типе привода электромагнит может питаться не только от трансформатора ТКБ, но и от источника напряжением 12...24 в (в зависимости от длины и сечения соединительных проводов). Это обстоятельство позволило осуществить представленную на рисунке схему, в которой аварийное отключение масляного выключателя с места установки двигателя производится кнопкой, соединяющей цепь электромагнита привода с источником переменного опера-

# Прибор для измерения напряженности электрического поля

Кандидат техн. наук, доц. М. М. НЕКРАСОВ и кандидат техн. наук Л. А. РАХМАНОВ  
Киевский Политехнический институт

Возможность получения картины электрического поля изоляционных конструкций, измерение распределения напряжения по различным участкам изоляционных конструкций и измерение потенциала по отношению к земле любой точки пространства представляют большой интерес для исследователя, конструктора и работника эксплуатации. Ценность метода, позволяющего реализовать все виды этих измерений, увеличивается, если измерения можно производить в любой среде — жидкости или газе. Авторами разработан простой переносный прибор, питаемый от сети переменного тока, решающий эту задачу. Схема прибора приведена на рис. 1.

Прибор представляет собой двухкаскадный реостатный усилитель, на выходе которого предусмотрен ламповый вольтметр. В исследуемое электрическое поле вводится зонд. Зондом является проводник длиной около 1 см, соединенный через разделительный конденсатор с сеткой входной лампы при помощи экранированного шнура. В зависимости от координат и направления зонда меняется переменный потенциал на сетке первой лампы — половины двойного триода 6Н9. Вторая резервная половина входной лампы позволяет в случае необходимости добавить каскад усиления. Ее можно также использовать в качестве катодного повторителя; при этом входное сопротивление первой лампы можно увеличить до сотен мегом. Усиленное переменное напряжение поступает на делитель напряжения (регулировка чувствительности), а затем усиливается вторым каскадом и выпрямляется. В качестве выпрямителя использована половина триода 6Н9, у которой сетка соединена с анодом через сопротивление 1 ком. За выпрямителем следует фильтр, состоящий из сопротивления и емкости. Значение емкости подбирают опытным путем в зависимости от примененного микроамперметра в ламповом вольтметре. Увеличивая

этую емкость, можно усилить успокоение микроамперметра. Усиленное, выпрямленное и сгаженное напряжение измеряется ламповым вольтметром, который выполнен по мостовой балансной схеме на двойном триоде 6Н8. Двумя плечами моста являются внутренние сопротивления триодов 6Н8; сопротивления в цепи анодов лампы представляют собой остальные два плача моста. Потенциометр, включенный в анодные цепи 6Н8, позволяет перераспределить сопротивление плеч моста и уравновесить схему (установить микроамперметр на нуль). Обе половины двойного триода 6Н8 не могут быть совершенно идентичными, поэтому необходим орган установки нуля.

Полярность подводимого к ламповому вольтметру напряжения такова, что на сетку левой части 6Н8 поступает минус. При этом внутреннее сопротивление триода увеличивается и равновесие моста нарушается. Между точками A и B (рис. 1) появляется уравнительный ток, который и показывает микроамперметр. Ламповый вольтметр не боится перегрузок: если на его вход будет подано большое напряжение, левый триод лампы 6Н8 будет заперт. Тогда через микроамперметр будет протекать половина тока правого триода 6Н8, у которого сопротивление анодной нагрузки теперь будет  $\frac{200+50}{2} = 125$  ком. При этом ток через микроамперметр не будет превышать 0,5 ма. В приборе применен микроамперметр на 200 мка, который без ущерба может выдержать трехкратную нагрузку. Необходимое отрицательное смещение на сетках лампы 6Н8 создается автоматически за счет падения напряжения на сопротивлениях в 5 ком, включенных в цепи катодов. Между сеткой и катодом левой части 6Н8 оказывается включенным сопротивление  $3 + 1,5 = 4,5$  мгом. Сеточные токи лампы в доли микроампера создают на этом сопро-

тивного тока 12 в (вторичной обмоткой понизительного трансформатора).

При длине соединительных проводов 20 и 30 м, сечении 2,5 мм<sup>2</sup>, напряжении 12 в отключающий ток электромагнита получается равным 3,5 а, т. е. совпадает с каталожным значением.

Описанное устройство безупречно действует уже в течение 4 лет.

Для прямого пуска от сети синхронных двигателей шаровых мельниц (6 кв, 750 квт) была использована магнитная станция серии СНЛ 7301-42А2. Здесь основным органом является реле типа ЭРЭ, действие которого обусловлено частотой тока в роторной цепи двигателя. Это реле потенциометрически через выпрямитель присоединено к разрядному сопротивлению; оно служит для получения необходимой выдержки

времени перед подачей возбуждения в обмотку ротора. Годичный срок эксплуатации показал ненадежность схемы; реле требовало частой регулировки, а во время его работы наблюдалась пульсация.

В целях обеспечения безотказного пуска двигателя был применен пуск в функции времени, полностью оправдавший себя в этом случае. Взамен реле ЭРЭ установлено реле времени Е52, действующее через промежуточное реле ЭП41 на включение контактора возбуждения. Обмотка реле Е52 включена на напряжение сети переменного тока 220 в; уставка времени выбрана в соответствии с самым длительным режимом вхождения двигателя в синхронизм.

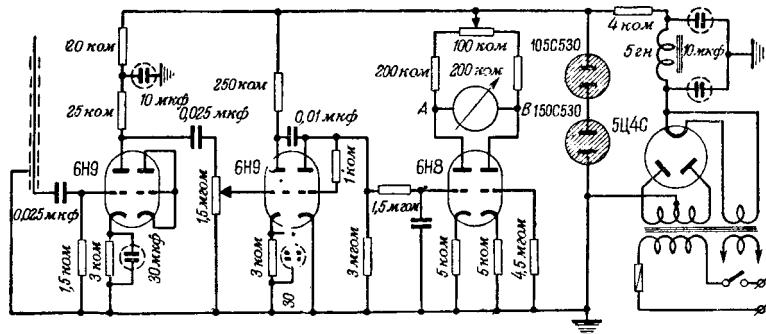


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для измерения напряженности электрического поля.

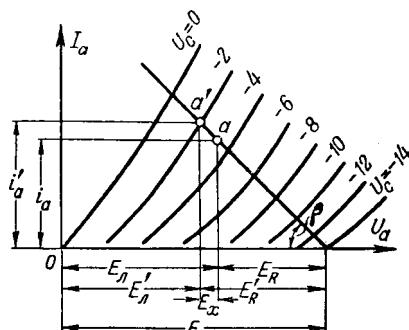


Рис. 2. Графический расчет лампового вольтметра.

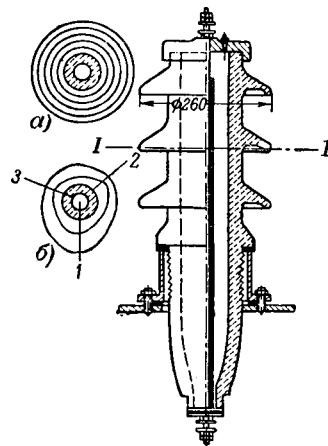


Рис. 3. Поле в сечении I-I нормального (а) и дефектного (б) изоляторов на 35 кв.

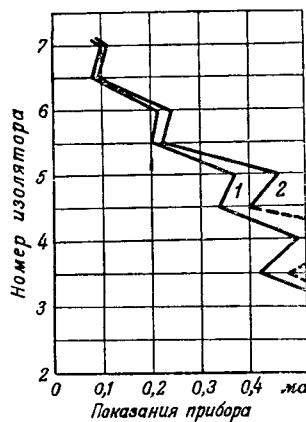


Рис. 4. Распределение напряжения 6 кв по гирлянде из семи изоляторов типа П-4,5, снятое при зонде, удаленном на 1,5 м от гирлянды.  
1 — при движении зонда вверх,  
2 — вниз.

тивлении падение напряжения в доли вольта. Для того чтобы схема была симметрична, в цепь сетки правой части 6Н8 включено такое же сопротивление. Для уменьшения влияния колебаний сетевого напряжения на показания прибора предусмотрена стабилизация анодного напряжения при помощи газовых стабилизаторов. Следует отметить, что прибор работает удовлетворительно и при отсутствии стабилизации напряжения.

Расчет лампового вольтметра удобно производить графически. Располагая семейством анодных характеристик лампы (6Н8) и зная заданное анодное напряжение  $E_a$ , проводим динамическую характеристику под углом  $\beta = \frac{1}{R_a}$  (рис. 2). Задаемся исходным потенциалом на сетке (например,  $-3$  в), рабочей точкой  $a$ . Опустив перпендикуляр из точки  $a$  на ось  $U_a$ , найдем распределение напряжения на лампе  $E_a$  и на сопротивлении анодной нагрузки  $E_R$  (или потенциал анода лампы  $E_a$  в отсутствие измеряемого напряжения). Примем, что на сетку лампы подано измеряемое напряжение 1 в; тогда рабочая точка переместится в положение  $a'$ ; опустив перпендикуляр из  $a'$ , найдем новое значение потенциала анода  $E'_a$ .

Пользуясь теоремой об эквивалентном генераторе, легко определить ток в микроамперметре  $I_n$  при данном измеряемом напряжении:

$$I_n = \frac{E_x}{R_n + R_s},$$

где  $E_x = E_a - E'_a$  — напряжение холостого хода, соответствующее разомкнутой цепи микроамперметра;  $R_s$  — сопротивление схемы между точками  $A$  и  $B$  при разомкнутой цепи микроамперметра и замкнутых зажимах источника питания.

Прибор, изготовленный нами по схеме рис. 1, был отградуирован в вольтах. Для проверки точности измерений было рассчитано электрическое поле у краев воздушного плоского конденсатора и снята картина того же поля при помощи зонда с описанным прибором. Совпадение расчетных и экспериментальных данных получилось довольно хорошим. Эквидистантные поверхности, полученные расчетным путем и экспериментально, практически совместились на графике.

Пользуясь этим прибором, оказалось возможным снять картину электрического поля обмотки силового трансформатора для случаев, когда обмотка помещена в воздухе или масле. Интерес представляют также измерения напряженности электрического поля двух проходных фарфоровых изоляторов на 35 кв, один из которых был заводом дефектным, — вторая сверху юбка частично сколота и имела трещина в фарфоре. Измерение напряженности электрического поля производилось при напряжении на токоведущем стержне не относительно земли 220 в.

При построении эквидистантных линий в плоскости второго ребра I-I оказалось, что эквидистантные линии годного изолятора имеют вид окружностей (рис. 3).

Эквидистантные линии дефектного изолятора отклоняются от окружности. Степень отклонения линий от окружности зависит от меры дефектности изолятора, что нами было проверено путем снятия картины электрического поля в различных плоскостях дефектного изолятора. Незначительные дефекты, например в виде по-

# Стандарты и нормы

## Новый стандарт на листовую электротехническую сталь

Кандидат техн. наук Л. Ш. КАЗАРНОВСКИЙ

Научно-исследовательский институт Министерства электротехнической промышленности

Листовая электротехническая сталь является важнейшим активным материалом в электромашинно- и аппаратостроении, радиотехнике и связи. Характеристики стали часто решающим образом определяют качество изделий, и потому знание их представляет большой интерес для расчетчиков, конструкторов и технологов.

Со времени введения ГОСТ 802-41 металлургическая промышленность достигла некоторых успехов в области изготовления листовых электротехнических сталей; одновременно потребители значительно повысили требования к этим сталям. Поэтому Управление по стандартизации при Госплане СССР пересмотрело ГОСТ 802-41 и заменило его ГОСТ 802-54. Проект нового стандарта в свое время подвергся широкому обсуждению; его окончательная редакция составлена с учетом многих пожеланий и требований основных потребителей.

В отличие от ГОСТ 802-41 новый стандарт распространяется как на обычную горячекатанную, так и на холоднокатанную сталь: Э310, Э320 и Э330 (в старых ВТУ соответственно: ХВП, ХТ18 и ХТ18,5).

В отличие от старого стандарта для обозначения качества стали в пределах группы введены цифровые индексы взамен буквенных. Таких индексов девять (0 ... 8).

В соответствии с требованиями потребителей в стандарт включена группа сталей с гарантированными свойствами при частоте перемагничивания 400 гц (второй цифровой индекс 4). В группе повышенных частот эта ча-

стота является наиболее распространенной. Сталь для применения при частоте 400 гц уже ряд лет выпускается металлургической промышленностью по ведомственным техническим условиям (марка ВЧ), и сейчас есть большой статистический материал по ее электромагнитным характеристикам.

В стандарт включены две новые группы сталей с гарантированными свойствами в слабых полях (менее 0,01 ав/см, второй цифровой индекс 5 или 6) и в средних полях (0,1 ... 1 ав/см, второй цифровой индекс 7 или 8). Ранее обе группы сталей выпускались по ВТУ под одной маркой ВП.

В группе сталей общего применения исключен ряд низших марок и марок, мало отличающихся от соседних по электромагнитным характеристикам. Кроме того, исключены все марки с индексом Б, обозначавшим в старом стандарте повышенную проницаемость в сильных полях. Как показали исследования, повышение проницаемости наблюдается в этих марках при испытании образцов, вырезанных вдоль и поперек листа, тогда как средняя круговая индукция, измеренная на кольцевых образцах, не обнаруживает увеличения. Таким образом, в группе слаболегированных сталей вместо пяти марок осталось две: Э11 и Э12, соответствующие Э1А и Э1АА по старому стандарту.

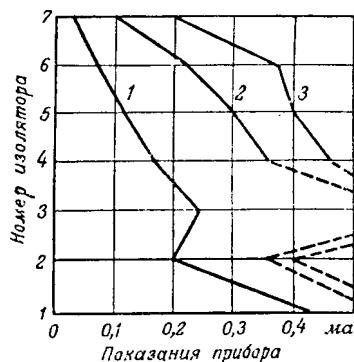
Группа среднелегированных сталей состоит из одной марки Э21, соответствующей прежней Э2.

вреждений глазури без образования трещин, прибор не фиксирует.

Прибор можно также использовать для измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов или юбкам штыревого изолятора. Измерение распределения напряжения можно производить как вблизи, так и на некотором удалении от объекта. Например, для гирлянды из семи элементов типа П-4,5 при напряжении, приложенном к гирлянде, 12 кв можно измерять распределение напряжения на расстоянии 2,5 ... 3 м от гирлянды. При движении зонда параллельно этой гирлянде стрелка прибора меняла свое положение, как это показано на кривой рис. 4. Нулевой дефектный изолятор дал резкое увеличение показания. Наличие неполного пробоя характеризуется заметным отклонением показаний прибора от кривой нормального распределения напряжения.

На рис. 5 приводятся кривые распределения напряжения 6 кв по такой же гирлянде из семи элементов, когда в гирлянде зашунтирован тре-

Рис. 5. Распределение напряжения 6 кв по гирлянде изоляторов типа П-4,5 при зашунтированном изоляторе № 3. Зонд удален от края гирлянды на 1,42 м (кривые 1, 2 и 3 соответствуют различной чувствительности прибора).



тий по счету элемент. Кривые 1, 2, и 3 соответствуют различной чувствительности прибора.

Перечисленное, понятно, не исчерпывает всех возможностей прибора. Прибор, в частности, может быть также использован для измерения малых напряжений переменного тока и как нуль-индикатор малых напряжений.

[20. 9. 1954]



Группа повышенолегированных сталей включает: марку Э31, соответствующую прежней ЭЗА, новую марку Э34 для повышенных частот и новые марки холоднокатанных сталей: Э310, Э320 и Э330—общего применения, Э340—для повышенных частот, Э370—для средних полей.

Группа высоколегированных сталей состоит из марок Э41 и Э42, соответствующих прежним Э4А и Э4АА, и новой высшей марки Э43. Кроме того, имеется новая марка Э44 для применений при повышенной частоте, новые марки Э45 и Э46—для слабых полей и Э47 и Э48 для средних полей. Низшая марка Э4 исключена. Всего в новом стандарте 18 марок сталей; половина из них—новые, что значительно расширило возможности конструктора в части выбора сталей с заданными свойствами.

Сортамент листов в новом стандарте расширен против ГОСТ 802-41, что позволяет сократить отходы стали при раскрое. Например, введены новые форматы листов: 2 000 × 1 000, 1 720 × 860 и 1 340 × 670 мм. Стали, предназначенные для повышенных частот, выпускаются в листах толщиной 0,20; 0,15 и 0,10 мм, причем формат таких листов увеличен до 700 × 720 и 700 × 1 400 мм, тогда как раньше по техническим условиям гарантировался формат не менее 500 × 200 мм.

По холоднокатанной стали наряду с листами уменьшенной ширины (240 и 600 мм) введены ранее не изготавливавшиеся листы нормальной ширины 750 мм и листы толщиной 0,2 мм. Вместе с тем из сортамента исключены листы неупорогительного формата 1 500 × 700 мм, листы толщиной свыше 1 мм (такую сталь нормирует ГОСТ 3836-47) и листы всех форматов толщиной 0,42 и 0,3 мм, так как такие листы часто неотличимы от листов толщиной 0,5 и 0,35 мм, что создает затруднения на заводах-потребителях.

Допускаемые отклонения листов по размерам и толщине, а также максимально допускаемая разнотолщина представляют большой интерес для электротехнических заводов, так как влияют на качество продукции, производительность труда и себестоимость.

Новый стандарт в этом вопросе не сделал большого шага вперед сравнительно с ГОСТ 802-41, что свидетельствует о недостаточном техническом прогрессе прокатного производства металлургических заводов, выпускающих электротехническую сталь. Допускаемые отклонения по толщине листов, а также максимальная разнотолщина сохранены те же, что и в старом стандарте, а для холоднокатанной стали—как во временных технических условиях. Положительным моментом является лишь распространение пониженного допуска по толщине листов на сталь для крупных электрических машин. Кроме того, снижен допуск по длине листов с +1,5 до +1%.

В разделе технические условия следует прежде всего отметить указание пределов содержания кремния в различных группах

сталей, а также значений удельного электрического сопротивления. Эти характеристики не являются браковочными признаками, но дают необходимую ориентировку при расчетах и конструировании. Ряд новых пунктов направлен на улучшение качества поверхности листов, что очень важно для электротехнических заводов:

а) Вдвое снижена глубина проникновения дефектов кромок листов в глубь номинального контура.

б) Указана недопустимость налета, препятствующего нанесению изоляции на листы.

в) Введена обязательная дрессировка<sup>1</sup> листов перед отжигом в целях устранения бугорков на поверхности (рябоватость от валков); наличие бугорков приводит к межлистовым замыканиям в пакетах магнитопроводов электрических машин, что в свою очередь приводит к увеличению потерь на вихревые токи.

г) Снижена предельно допустимая волнистость листов: для слаболегированной стали—с 25 до 20 мм на 1 пог. м, для повышенолегированной—с 25 до 18 мм на 1 пог. м; при этом для стали для крупных электрических машин и трансформаторов—с 18 до 12 мм на 1 пог. м.

д) Снижена предельно допустимая коробоватость листов<sup>2</sup> (с 25 до 10 мм на 1 пог. м), что облегчает сборку больших пакетов.

е) Указано, что отношение длины волны и короба к их высоте во всех случаях должно быть не менее 10. Это также важное обстоятельство при сборке больших пакетов, так как при данной высоте волны или короба наименьший вред при сборке получается при максимальной их длине.

Хрупкость является единственной характеристикой механических свойств электротехнической стали, нормируемой стандартом. Вопрос о том, какая из механических характеристик наиболее правильно определяет технологические и эксплуатационные свойства стали, является дискуссионным, однако несомненно, что принятное в течение многих лет испытание стали на перегиб в общем верно отражает ее поведение при штамповке, сборке пакетов или навивке сердечников. В новом стандарте почти все нормы по среднему числу перегибов оставлены прежними, но наряду с этим введено дополнительное требование гарантии 0,5 перегиба на каждого образце. Для стали, идущей на изготовление особо крупных электрических машин, на каждом образце должно быть не менее одного перегиба. Это, несомненно, уменьшит хрупкость высоколегированной стали, являющуюся в некоторых случаях причиной аварий электрических машин и трансформаторов и ускоренного износа штампов.

Следует отметить, что отечественная высоколегированная сталь по среднему числу перегибов ниже норм иностранных стандартов, требую-

<sup>1</sup> Дрессировка—холодная прокатка с малым обжатием в целях сглаживания поверхности листа (в данном случае).

<sup>2</sup> Коробоватость—волнистость листа одновременно в продольном и поперечном направлениях, вследствие чего он приобретает корытообразную форму.

щих не менее двух перегибов для стали толщиной 0,5 и 0,35 мм. Электромагнитные характеристики сталей общего применения сравнительно с ГОСТ 802-41 и техническими условиями несколько улучшены: индукция и удельные потери низшей марки слаболегированной стали подняты до значений, соответствующих старой марке Э1А, а у высшей марки при той же индукции потери снижены на 3%. Удельные потери среднелегированной стали снижены на 4%. Удельные потери  $P_{15/50}$  повышенолегированной стали толщиной 0,5 мм снижены на 4% по сравнению с данными для марки Э3А. В группе высоколегированных сталей низшая марка по удельным потерям в толщине 0,5 мм соответствует марке Э4А.

Удельные потери высшей марки нового стандарта на 12% меньше, чем стали Э4АА (толщина 0,5) — наилучшей марки в стандарте 802-41.

По холоднокатанной стали произведено снижение потерь у высшей марки на 10% сравнительно с маркой ХТ18,5 (толщина 0,5 мм). При толщине 0,35 мм потери также снижены на 5—10%. Индукция всех марок холоднокатанных сталей оставлена на уровне действующих технических условий.

Следует иметь в виду, что все холоднокатанные стали (последний цифровой индекс «0») являются магнито-анизотропными, т. е. обладают высокой проницаемостью и низкими потерями при намагничивании вдоль листа и значительно худшими свойствами при намагничивании во всяком другом направлении. Поэтому их применение особенно выгодно в тех случаях, когда можно направить магнитный поток вдоль листа (например, в ленточных сердечниках). Именно для этого случая стандарт нормирует электромагнитные свойства. Свойства в других направлениях, а также средние свойства, важные для некоторых применений, в стандарте не указаны.

Для расчетчиков и конструкторов большой интерес представляет вопрос фактических колебаний магнитных характеристик сравнительно со значениями, гарантированными стандартом. Материалов по этому вопросу недостаточно, однако некоторые предварительные данные говорят о том, что разброс характеристик весьма велик. Так, например, для стали марки ВП значение индукции в поле 0,05 ав/см (действующие) колеблется от 140 до 300 гс, тогда как гарантированные значения составляют: 120 гс для ВП-1, 160 гс — для ВП-2 и 200 гс — для ВП-3. Для поля 0,1 ав/см (действующие) разница еще больше: 350 ... 1200 гс при гарантированных значениях: 300 гс для ВП-1, 450 гс — для ВП-2 и 550 гс — для ВП-3. В области сильных полей колебания индукции значительно меньше. Так, у динамных сталей  $B_{25}$  колеблется от 15 000 до 16 000 гс,  $B_{50}$  — от 16 000 до 17 000 гс и  $B_{100}$  — от 17 500 до 18 200 гс; у трансформаторной высоколегированной стали  $B_{25}$  находится в пределах 14 300 ... 15 300 гс. Удельные потери  $P_{15/50}$  колеблются

сильнее, чем индукция в сильных полях: у слаболегированной стали — от 5,5 до 8 вт/кг (толщина 0,5 мм), а у высоколегированной стали — от 2,5 до 4 вт/кг.

Естественно, стандарт не может гарантировать средних значений характеристик, а дает свойства, более близкие к нижнему пределу, однако в интересах народного хозяйства расчетчикам необходимо закладывать в конструкцию изделий не минимальные значения, гарантированные стандартом, а несколько улучшенные.

Следует также учитывать большую неоднородность свойств электротехнической стали не только в разных партиях, но и в пределах данной партии и даже в каждом листе. Для мелких изделий это может иметь существенное значение.

Правила приемки и методы испытаний имеют большое значение для повышения качества листовой электротехнической стали. В новом стандарте многое сделано в направлении ужесточения и уточнения методов испытания:

1. Указано, что завод-изготовитель должен гарантировать соответствие в сех выпускаемых листов требованиям настоящего стандарта.

2. При отборе листов для магнитных испытаний разрешается применение приборов, определяющих коэрцитивную силу на целых листах стали (коэрцитиметров). Таким образом, из общего числа контрольных листов для составления пробы берется половина нужного числа листов, имеющих минимальную коэрцитивную силу, и вторая половина — листов, имеющих максимальную коэрцитивную силу.

По замыслу при этом должны получаться значения, более близкие к средним для данной партии стали, чем при произвольном отборе листов в соответствии с ГОСТ 802-41. Следует отметить, что новый метод отбора листов основан на предположении, что полные удельные потери данной марки стали пропорциональны коэрцитивной силе. Однако этот факт, до последнего времени считавшийся бесспорным, сейчас в ряде случаев находится под сомнением в связи с новыми опытными данными.

Толщина и разнотолщинность определяются по более жесткой методике измерением в четырех точках, расположенных посредине каждой стороны листа на глубине 40 мм от кромки. По старой методике толщина измерялась по сторонам листа на расстоянии не менее 40 мм от кромок листа и не менее 100 мм от углов. Для определения разнотолщинности лист резался по диагонали и толщина измерялась в четырех точках, расположенных по диагонали листа на расстоянии не ближе 100 мм от углов. Очевидно, что при этом толщина в середине листа могла не измеряться и такая методика не давала правильных данных о толщине и разнотолщинности листа.

В связи с тем, что стандарт нормирует свойства сталей в слабых и средних полях, а также

# Терминология электрических машин

## Виды электрических машин

Работа по упорядочению терминологии электрических машин ведется Комитетом технической терминологии Академии наук СССР давно. В 1940 г. был издан Бюллетень КТТ «Терминология электрических машин», ч. 1, куда вошли разделы: «Основные электрические машины», «Специальные электрические машины», «Основные части электрических машин». Непосредственным продолжением упомянутой работы явился изданный в 1941 г. Бюллетень КТТ «Терминология электрических машин», ч. 2, куда вошли разделы: «Части электрических машин», «Расчетные величины», «Коммутация», «Характеристики электрических машин».

В последнее время работа по терминологии электрических машин возобновлена. С учетом ранее выпущенных для широкого обсуждения материалов, а также полученных по ним замечаний в настоящее время подготовлен проект терминологии, охватывающий виды электрических машин. Данный проект разработан комиссией Комитета технической терминологии АН СССР в составе: Е. В. Нитусова (председатель), В. Е. Доценко, В. Т. Гребениченко, В. В. Енько, Я. А. Климовицкого, Г. А. Лаврентьевой, Т. Г. Сорокера. Комитет продолжает работу над другими разделами терминологии электрических машин.

Редакция журнала «Электричество» публикует указанный Проект для ознакомления читателей, желающих сообщить свои отзывы Комитету технической терминологии по адресу: Москва, центр, М. Харитоньевский пер., д. 4, Комитет технической терминологии Академии наук СССР.

### ПРОЕКТ ТЕРМИНОЛОГИИ

1. **Электрическая машина.** Машина, принцип действия которой основан на использовании явления электромагнитной индукции и которая предназначена для преобразования механической энергии в электрическую, электрической энергии в механическую, электрической энергии одного рода (вида) в электрическую энергию другого рода (вида).

2. **Машина постоянного тока.** Электрическая машина, предназначенная для работы в цепи постоянного тока в качестве генератора, электродвигателя или преобразователя напряжения.

3. **Машина переменного тока.** Электрическая машина, предназначенная для работы в цепи переменного тока в

при повышенной частоте 400 гц, введен ряд новых методов испытаний:

а) Измерение удельных потерь при частоте 400 гц производится абсолютным ваттметровым методом на пробе в 1 кг, составленной из четырех пакетов по 250 г. Каждый пакет состоит из полос размером 250 × 30 мм.

б) Измерение магнитной индукции сталей для слабых и средних полей, а также для повышенной частоты производится баллистическим методом на тех же пробах, на которых определялись потери. В целях уменьшения магнитного сопротивления на угловых частях квадрата полосы собирают внахлестку с обеих сторон.

качестве генератора, электродвигателя или преобразователя.

4. **Машина постоянно-переменного тока.** Электрическая машина, предназначенная для работы в цепях как постоянного так и переменного тока.

5. **Коллекторная машина.** Электрическая машина, в которой вращающийся якорь связан с внешней сетью через механический преобразователь частоты (коллектор).

6. **Бесколлекторная машина.** Электрическая машина, у которой неподвижный или вращающийся якорь связан с внешней сетью непосредственно или через контактные кольца.

7. **Однофазная машина.** Электрическая машина переменного тока, предназначенная для работы в сети однофазного переменного тока.

8. **Трехфазная (многофазная) машина.** Электрическая машина переменного тока, предназначенная для работы в сети трехфазного (многофазного) переменного тока.

9. **Синхронная машина.** Бесколлекторная машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора и частота напряжения на зажимах (во внешней сети) связаны точной пропорциональной зависимостью.

10. **Асинхронная машина.** Бесколлекторная электрическая машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора и частота напряжения на зажимах (во внешней сети) не связаны точной пропорциональной зависимостью.

11. **Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором.** Асинхронная машина, имеющая на роторе одну или несколько короткозамкнутых обмоток

12. **Асинхронная машина с контактными кольцами.** Асинхронная машина, имеющая на роторе многофазную (трехфазную) обмотку, выведенную на контактные кольца.

13. **Унипольная машина постоянного тока (унипольная машина).** Бесколлекторная машина постоянного тока, якорь которой вращается в магнитном поле одной (не чередующейся) полярности.

14. **Машина постоянного тока независимого возбуждения** (машина независимого возбуждения). Коллекторная машина постоянного тока, обмотка возбуждения которой питается от источника тока, электрически и магнитно не связанного с целью якоря.

15. **Машина параллельного возбуждения** (шунтовая машина). Коллекторная машина, обмотка возбуждения которой соединена параллельно с целью якоря.

16. **Машина последовательного возбуждения** (серийная машина). Коллекторная машина, обмотка возбуждения которой соединена последовательно с целью якоря.

17. **Машина смешанного возбуждения.** Коллекторная машина с несколькими обмотками возбуждения, включенными параллельно или последовательно с целью якоря или питаемыми от независимого источника.

18. **Машина последовательно-параллельного возбуждения** (компаундная электрическая машина). Машина смешанного возбуждения с двумя обмотками возбуждения, из которых одна соединена последовательно, а другая — параллельно с целью якоря.

Следует заметить, что измерение характеристики  $B_{10}$  по методике, рекомендуемой стандартом, не оправдало себя на практике и по указанию Комитета стандартов заменено измерением в периметре.

**Выводы.** Рассмотрение основных разделов стандарта показывает, что он является прогрессивным, так как составлен с учетом многих требований промышленности. Внедрение ГОСТ 802-54 повысит качество электротехнических сталей и тем самым изделий, в которых они применяются.

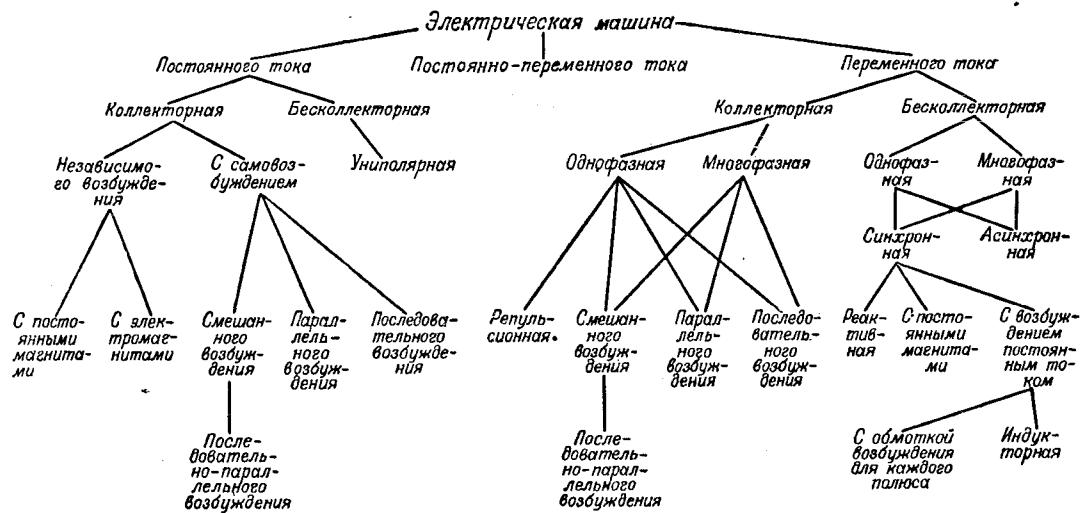


Схема деления электрических машин по роду тока и принципу действия  
(данная схема не охватывает специальных машин).

**19. Репульсионная машина.** Однофазная коллекторная машина, короткозамкнутые щетки на коллекторе которой устанавливаются так, что возникает постоянно действующий момент вращения, вызванный эффектом отталкивания (репульсии).

**20. Реактивная синхронная машина.** Явнополюсная синхронная машина без обмотки возбуждения, магнитное поле которой образуется за счет реакции якоря.

21. Машина с постоянными магнитами (магнитоэлектрическая машина). Электрическая машина, в которой основное поле создается постоянными магнитами.

**22. Индукторная машина.** Синхронная машина повышенной частоты, на якорь которой (или часть его) воздействует магнитное поле постоянного направления с изменяющейся по величине магнитной индукцией.

*23. Трехфазная коллекторная машина с питанием со стороны статора.* Трехфазная коллекторная машина параллельного возбуждения, обмотка статора которой питается от сети непосредственно, а обмотка ротора — через регулируемый трансформатор.

*24. Трехфазная коллекторная машина с питанием со стороны ротора.* Трехфазная коллекторная машина параллельного возбуждения, обмотка статора которой питается от вспомогательной обмотки ротора через коллектор, а основная обмотка ротора — от сети через кольца. Непрекомендуемый термин: двигатель Шраге.

**25. Микроэлектромашин.** Электрическая машина мощностью до 600 вт. Нерекомендуемый термин: электрическая машина малой мощности.

26. *Машина попечного поля*. Электрическая машина постоянного тока, рабочее напряжение которой индуктируется попечным магнитным полем якоря, создаваемым током в цепи попечных короткозамкнутых щеток.

27. Вентильная машина. Электрическая машина, у которой коммутация тока в обмотке якоря достигается при помощи управляемых ионных или полупроводниковых преобразователей (вентиляй).

28. Электромашинный генератор (генератор). Электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую.

29. Генератор *двойного тока*. Генератор, от якоря которого можно получить одновременно электрическую энергию двух родов или видов.

30. Генератор повышенной частоты. Генератор переменного тока частоты 100 гц и выше. Нерекомендуемый термин: высокочастотный генератор.

31. Электрический двигатель (электродвигатель). Электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую.

**32. Универсальный коллекторный двигатель.** Коллекторный двигатель последовательного возбуждения, предназначенный для работы как в сети постоянного тока, так и в однофазной сети переменного тока.

*33. Синхронизированный асинхронный двигатель.* Асинхронный двигатель, который, будучи возбужден со стороны ротора постоянным током, работает в нормальном режиме в качестве синхронного двигателя.

34. Электромашинный преобразователь рода тока. Электрическая машина, предназначенная для преобразования рода тока (постоянного тока в переменный или обратно).

*35. Одноякорный преобразователь.* Электромашинный преобразователь рода тока с одним якорем, снабженный контактными кольцами и коллектором. Нерекомендуемые термины: умформер; конвертор.

**36. Каскадный преобразователь.** Электромашинный преобразователь рода тока, состоящий из асинхронной машины и одноякорного преобразователя, роторы которых имеют непосредственное электрическое (каскадное) и механическое соединения.

37. Электромашинный преобразователь частоты (преобразователь частоты). Электрическая машина, предназначенная для преобразования частоты переменного тока.

38. Электромашинный преобразователь напряжения (преобразователь напряжения). Электрическая машина, предназначенная для преобразования частоты переменного тока.

39. Электромашинный преобразователь числа фаз (преобразователь числа фаз). Электрическая машина, предназначенная для преобразования числа фаз.

40. Двигатель-генератор (мотор-генератор). Электро-машиинный преобразователь, состоящий из механически соединенных электродвигателя и генератора.

42. Синхронный компенсатор. Синхронная машина с незакрепленным уравновешенным статором, предназначенная для измерения врачающего момента. Некомандуемый термин: пендель-динамо.

предназначенная для регулирования напряжения и коэффициента мощности сети путем генерирования или потребления реактивной мощности (реактивной слагающей тока).

43. *Магнето*. Бесколлекторная магнитоэлектрическая машина, предназначенная для получения импульсов высокого напряжения.

44. Индукционный регулятор (поворотный трансформатор). Асинхронная машина с заторможенным поворотным ротором и электрически соединенными обмотками статора и ротора, предназначенная для плавного регулирования напряжения переменного тока.

45. *Фазовый регулятор*. Асинхронная машина с заторможенным поворотным ротором, предназначенная для плавного изменения фазы напряжения вторичной сети.

**46. Электромашинный тормоз.** Электрическая машина, предназначенная для создания противодействующего (тормозного) момента. Нерекомендуемый термин: электромагнитный тормоз.

**47. Сельсин** (сэлсин). Бесколлекторная электрическая машина переменного тока, связанная электрически с одной или несколькими такими же машинами и предназначенная для синхронной передачи угла вращения и генерирования напряжения, пропорционального углу рассогласования между двумя валами.

**48. Генератор возбуждения** (возбудитель). Генератор, предназначенный для питания обмоток возбуждения других электрических машин.

**49. Компенсатор сдвига фаз** (фазокомпенсатор). Возбудитель переменного тока, питающий обмотку ротора асинхронной машины для регулирования ее коэффициента мощности.

**50. Тахогенератор**. Генератор постоянного или переменного тока, механически связанный с валом какой-либо машины, скорость вращения которой определяется по величине напряжения этого генератора.

**51. Вольтодобавочный генератор**. Генератор постоянного тока, включенный последовательно в электрическую цепь с целью регулирования напряжения в этой цепи. Нерекомендуемый термин: бустер.

**52. Зарядный генератор**. Генератор постоянного тока, работающий в диапазоне 100—150% номинального напряжения и предназначенный для зарядки аккумуляторов.

**53. Электромашинный усилитель**. Генератор постоянного тока с весьма большим ( $10^3$ — $10^5$ ) отношением мощности на выходе к мощности возбуждения (управления), применяемый для автоматического управления электро-механическими процессами.

**54. Генератор вагонного электроснабжения** (генератор вагонного освещения). Генератор, подвешиваемый под кузовом вагона, приводимый во вращение от оси колесной пары, обеспечивающий при изменении скорости, нагрузки и направления вращения постоянство напряжения и неизменную полярность (для генераторов постоянного тока) и предназначенный для электроснабжения одного или нескольких вагонов.

**55. Сварочный генератор**. Генератор постоянного тока, сохраняющий приблизительно неизменный ток при переменном внешнем сопротивлении и предназначенный для дуговой электросварки.

**56. Гальванический генератор**. Генератор постоянного тока (коллекторный или униполярный), рассчитанный на большой ток при малом напряжении и предназначенный для питания электролитических ванн.

**57. Трехщеточный генератор**. Генератор постоянного тока, в котором с целью получения специальных характеристик обмотка возбуждения присоединена к одной из двух основных щеток и вспомогательной третьей, расположенной между ними.

**58. Тяговый электродвигатель**. Электродвигатель постоянного или переменного тока с длительным и часовым режимом работы, предназначенный для установки на подвижном составе для приведения в движение колесных пар.

**59. Стартер**. Электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения с высоким пусковым моментом, предназначенный для пуска двигателя внутреннего сгорания.

**60. Редукторный электродвигатель**. Электродвигатель со встроенным в его корпусе редуктором, обеспечивающим пониженную скорость рабочего вала.

**61. Крановый электродвигатель**. Электродвигатель с повышенным пусковым моментом, предназначенный для применения в качестве привода подъемно-транспортных механизмов с повторно-кратковременным режимом работы.

**62. Электродвигатель с дуговым статором**. Асинхронный двигатель, у которого статор перекрывает лишь часть окружности ротора.

**63. Электрическая машина возвратно-поступательного движения**. Электрическая машина постоянного или переменного тока, в которой подвижная часть имеет возвратно-поступательное движение.



## Дискуссии

### КОМПЛЕКТНЫЕ ПОДСТАНЦИИ МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

(Статья А. А. Ермилова, Электричество, № 6, 1954)

**Инж. В. А. КОЗЛОВ**

*Ленинградская кабельная сеть*

Отечественная электропромышленность находится в большом долгу перед городскими, сельскими, промышленными и другими электрическими сетями в отношении выпуска различных комплектных сетевых аппаратов. В этом отношении статья А. А. Ермилова является своевременной и актуальной. Комплектные подстанции должны получить самое широкое применение в электрических сетях.

Не будем полемизировать с А. А. Ермиловым, а отметим лишь, что в настоящее время на страницах журнала следует обсудить принципиальные положения, которые должны быть положены в основу при разработке комплектных подстанций массового применения. Такие вопросы, как защита, измерения и учет электроэнергии, вопросы конструкции и оборудования должны быть решены специалистами в рабочем порядке. В соответствии с этим сделаем некоторые принципиальные замечания по рассматриваемому вопросу.

Все содержание статьи А. А. Ермилова, а также пример, показанный на рис. 5, показывают, что при рассмотрении требований, предъявляемых к комплектным подстанциям, А. А. Ермилов идет по тому же пути, по которому шли Главэлектромонтаж при разработке камер комплектных распределительных устройств типа КСО и Московский трансформаторный завод при изготовлении

комплектных трансформаторных подстанций для высотных зданий Москвы.

По нашему мнению, камеры типа КСО и комплектные подстанции трансформаторного завода являются не комплексными, а обычными сборными и устройствами. Их отличие от общепринятых конструкций распределительных устройств и трансформаторных подстанций заключается только в несколько своеобразной компоновке и технологии выполнения монтажных работ. Внедрение указанных камер и подстанций не внесло и не могло внести никаких изменений в практику эксплуатации.

В сказанном можно убедиться из рассмотрения конструкции комплектной подстанции, приведенной на рис. 5 статьи А. А. Ермилова. Перед нами обычная трансформаторная подстанция с обычным оборудованием. Поэтому непонятно, по каким причинам ее авторы позволяют себе нарушать требования Правил устройства электротехнических установок в части габаритов, применяемых при размещении оборудования.

Рассмотрение конструкций комплектной подстанции, приведенной на рис. 5 статьи, вызывает ряд вопросов. В частности, почему при установке силового трансформатора в железобетонной камере необходимо выдерживать соответствующие расстояния от стен и дверей, а при установке того же трансформатора в металлической камере этого не требуется? Разве условия эксплуатации трансформатора изменяются оттого, что его устанавливают в

металлической камере, а не в железобетонной? Оснований к изменению объема осмотров, профилактики и других эксплуатационных работ не имеется. Далее, почему в помещениях обычных распределительных устройств перед щитами и камерами управления должен быть предусмотрен коридор управления, а в комплектной подстанции, представленной на рис. 5, операции можно осуществлять с открытой территории?

Приведенная А. А. Ермиловым на рис. 5 комплектная подстанция в лучшем случае может рассматриваться как временная сборная трансформаторная подстанция, которая может быть использована на строительствах и сезонных работах.

По нашему мнению, при разработке комплектных трансформаторных подстанций нужно идти по пути создания не сборного устройства, а единого комплектного аппарата, который должен содержать в себе необходимые элементы преобразования и распределения энергии. Для комплектной подстанции электропромышленность должна создать специальные оборудование и приборы. Разработкой их конструкции и конструкции подстанции в целом должны заниматься не работники сетей, а квалифицированные специалисты-аппаратостроители. При разработке должны быть использованы достижения отечественной электропромышленности. Массовый выпуск комплектных трансформаторных подстанций должен явиться значительным шагом на пути технического прогресса в электрических сетях.

В своей статье А. А. Ермилов делает попытку разработать элементы схем комплектных подстанций, пригодные для сетей всех видов. Представляется, что А. А. Ермилов вступает в противоречие с другими условиями, поставленными в статье, в частности с условием максимальной унификации комплектных подстанций. В самом деле, из элементов схем, приведенных на рис. 1, 2 и 3 статьи, можно составить значительное количество типов комплектных подстанций.

По нашему мнению, при разработке электрических схем комплектных подстанций не следует пытаться дать варианты, пригодные для всего многообразия сетевых условий. Это позволит действительно типизировать комплектные подстанции.

Комплектные подстанции должны быть разработаны для таких видов электрических сетей, в которых они действительно получат массовое применение. Такими видами являются городские, сельские и промышленные сети.

Для каждого вида сетей нет необходимости разрабатывать комплектные подстанции, которые могли бы удовлетворить всем встречающимся условиям. Для каждого вида сетей достаточно разработать два-три типа подстанций, отвечающих наиболее распространенным условиям.

Совпадение элементов комплектных подстанций для различных сетей может быть использовано заводами при разработке технологии изготовления отдельных узлов подстанций.

Основными условиями, которые могли бы быть положены в основу при разработке комплектных подстанций массового применения в городских сетях, являются следующие: установленная мощность трансформаторов 180...560 квт; высокое напряжение 6 и 10 кв, низкое 220 и 380 в; вводы высокого напряжения — магистральные, с разъединителями или съемными планками; щит низкого напряжения — на 4...6 групп простейшего типа в виде сборки предохранителей.

Учитывая жесткие архитектурные требования к современному облику городов, комплектные подстанции городских сетей необходимо выпускать для внутренней установки. Предлагаемые А. А. Ермиловым двухтрансформаторные комплектные подстанции с контакторной автоматикой не могут найти массового применения, так как двухлучевая схема является рациональной для сетей жилых массивов с домами повышенной этажности (более десяти этажей).

Для сельских сетей может быть разработана более простая конструкция комплектной подстанции. В частности, мощность трансформаторов этих подстанций должна лежать в пределах 50...180 квт, вторичное напряжение 380 в, ввод высокого напряжения — одиночный, радиальный. Сельские подстанции необходимо выполнять для наружной установки. Нам представляется, что наиболее приемлемой для сельских сетей явилась бы простейшая стол-

бовая комплектная подстанция. Этот тип подстанции найдет широкое применение не только в сельских сетях.

Схемы комплектных подстанций промышленных сетей требуют более глубокого изучения. Однако в первом приближении они должны удовлетворять следующим условиям: установленная мощность трансформаторов 320...1 000 квт; высокое напряжение 6 и 10 кв, низкое 380 в; вводы высокого напряжения — радиальные или магистральные; щит низкого напряжения — в виде панелей с необходимыми отключающими и защитными аппаратами и приборами. Число панелей определяется мощностью трансформатора.

Комплектные подстанции промышленных сетей необходимо выполнять для внутренней установки, так как имеется определенная тенденция применять в основном внутрицеховые подстанции.

Указанные условия даются нами в первом приближении; в дальнейшем они потребуют уточнения.

Мы затронули лишь принципиальные положения, которые с точки зрения сегодняшнего дня должны быть положены в основу при разработке комплектных подстанций для массового применения в электрических сетях. По мере выпуска подстанций и накопления опыта их эксплуатации, а также общего прогресса в развитии сетей и аппаратостроения будут совершенствоваться и комплектные подстанции. В частности, может быть наложен выпуск комплектных подстанций для специальных сетей, а также всего многообразия сетевых условий. В настоящее же время основную задачу мы видим в разработке комплектных подстанций как единого аппарата в создании небольшого количества видов подстанций для наиболее типичных условий основных категорий электрических сетей. Это создаст необходимые предпосылки для быстрейшего выпуска комплектных подстанций и повсеместного внедрения их в электрические сети всех видов.

### С. А. КУДРЯШОВ

Куйбышев

Значения предельной мощности короткого замыкания на стороне первичного напряжения, приведенные в табл. 1 рассматриваемой статьи, для II и III групп комплектных подстанций явно преувеличены. Для 3, 6 и 10 кв взято 300 мвт, а для 35 кв — 500 мвт. В результате выключатели нагрузки и масляные выключатели ВМБ-10, ВМГ-133 и ВМ-35, рекомендованные автором, не подходят для II группы комплектных подстанций по динамической устойчивости токам короткого замыкания. Масляный выключатель ВМ-35 не подходит и для III группы.

Мы предлагаем принять следующие значения предельных мощностей короткого замыкания (мвт), полученные в результате расчетов:

	II группа			III группа			
	3 кв	6 кв	10 кв	35 кв	3 кв	10 кв	35 кв
На стороне первичного напряжения . . . . .	50	100	100	400	—	—	400
На стороне вторичного напряжения . . . . .	—	—	—	—	60	80	—

Относительно элементов схем для комплектных подстанций I группы в рассматриваемой статье сказано, что в вариантах 3 и 4 вместо выключателя нагрузки может быть применен разъединитель. Возможность такой замены следует распространить на вариант 1. Вариант 2 следует изъять, так как он отличается от варианта 3 лишь удвоенным числом кабельных воронок, а по словам автора на вводе камера должна быть рассчитана на две кабельные воронки.

Ввод 35 кв II группы комплектных подстанций представлен только одним вариантом 3 (см. рис. 2 статьи А. А. Ермилова) при условии замены в этом варианте выключателя нагрузки (на 35 кв их не делают) разъединителем. Следует дополнить группу II еще одним вариантом ввода 35 кв — радиальным.

Устанавливать разрядники по схеме варианта 7 (см. рис. 3 рассматриваемой статьи) нежелательно. Втычный контакт является мало надежным элементом цепи и неисправность его ничем не обнаруживается. Установка трансформатора напряжения по схеме варианта 7 противоречит Правилам устройства электротехнических установок.

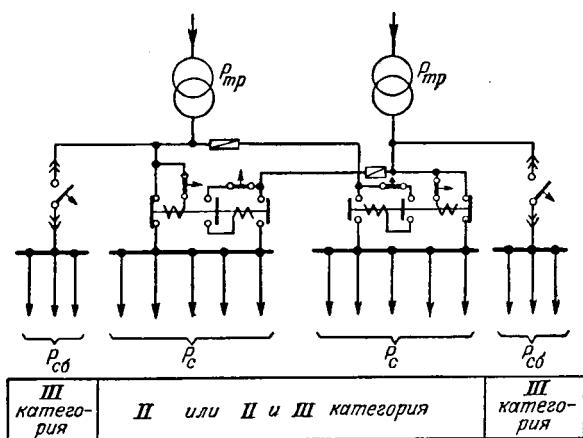


Рис. 1. Схема автоматизации комплектной трансформаторной подстанции.

вок. Втычной контакт на стороне 100 в создает разрыв в цепи счетчиков коммерческого учета.

Рекомендуемая А. А. Ермиловым схема автоматики, предложенная Э. С. Иохвидовым и Г. В. Сербиновским, имеет недостатки, препятствующие ее использованию для комплектных подстанций массового применения. Схема предусматривает резервирование только трансформаторов и питающих линий, контакторы же не резервируются. Поэтому потребитель I категории при этой схеме может питаться только по двум линиям, присоединенным к различным секциям комплектной подстанции, т. е. так же, как и при схеме без контакторов. Если же иметь два параллельно включенных контактора, то можно избежать прокладки двух линий для питания потребителя I категории.

В рекомендуемой А. А. Ермиловым схеме мощность трансформаторов должна быть на одну ступень выше шкалы стандартных мощностей или на 80% выше мощности, требуемой по нагрузкам.

При наличии нагрузок, относящихся к разным категориям бесперебойности, часть нагрузок III категории можно выделить на питающую линию, присоединенную между контактором и трансформатором (рис. 1). В случае аварии с трансформатором или питающей его линией выделенная нагрузка будет сброшена. Преимущество предлагаемой схемы в том, что при ней мощность трансформаторов может быть равна мощности нагрузок или немного выше ее.

Для определения нагрузки III категории, которая должна быть выделена на отдельную линию, присоединенную между контактором и трансформатором, можно составить уравнение:

$$kP_{mp} = 2P_c + P_{cб}, \quad (1)$$

где  $P_{mp}$  — мощность трансформатора, ква;

$k$  — коэффициент перегрузки трансформатора (для 20-процентной перегрузки  $k = 1,2$ );

$P_c$  — нагрузка, которая сохраняется на одной секции шин, ква;

$P_{cб}$  — сбрасываемая нагрузка, приходящаяся на один трансформатор, ква.

Отсюда

$$P_{cб} = kP_{mp} - 2P_c. \quad (2)$$

Графическая зависимость (2) при  $k = 1,2$  представлена на рис. 2 (прямая 1).

Можно написать уравнение

$$P_{mp} = P_c + P_{cб},$$

или

$$P_{cб} = P_{mp} - P_c. \quad (3)$$

Зависимость (3) также представлена графически на рис. 2 (прямая 2).

Рассматривая прямые 1 и 2, приходим к следующим выводам:

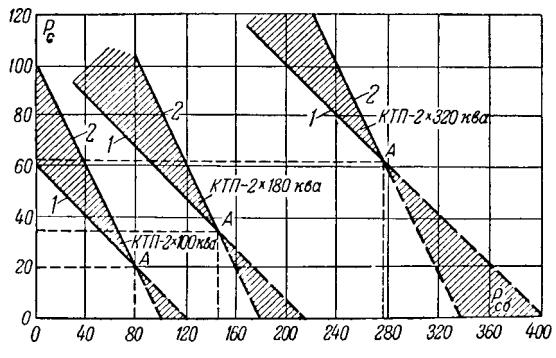


Рис. 2.

1. Нельзя брать  $P_{cб}$  менее тех значений, которые указываются ординатами пересечения прямых (точка А), иначе мощность подстанции будет меньше нагрузки.

2. Мощность  $P_c$  наиболее выгодно брать равной ординате точки А, так как тогда нагрузка будет равна мощности подстанции.

3. Когда  $P_c$  достигает максимального значения,  $P_{cб} = 0$ , а  $2P_c = kP_{mp}$ . В этом случае мы приходим к схеме Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского, применяемой для осветительных нагрузок, относящихся ко II категории.

Вопрос автоматизации комплектных подстанций нуждается в дальнейшем изучении.

Представленная на рис. 5 статьи А. А. Ермилова комплектная подстанция нуждается в доработке.

Вместо пакетного переключателя следует установить аппарат, создающий видимый разрыв, или указать в схеме накладку. Трехпроводный счетчик ИТР следует заменить четырехпроводным СРЧ. Трансформатор удобнее передвигать широкой стороной. Проходные изоляторы со стороны ввода недоступны для замены и быстрого осмотра. Жалюзи снизу до уровня крышки трансформатора следует заменить сеткой, что облегчит камеру и создаст лучшие условия охлаждения. Конструкция комплектной подстанции противоречит рекомендации автора укреплять ящик ввода при простых схемах непосредственно на трансформаторе. Схема присоединения трансформатора противоречит вариантам рис. 1 рассматриваемой статьи. Чтобы комплектная подстанция не могла накрениться при подъеме, расположение ряма должно быть смешено.

Конструкция комплектных подстанций, предназначенных для установки в помещениях, недоступных для неинструментированного персонала, может быть облегчена, если применить сетчатое фасадное ограждение, разрешенное Правилами устройства электротехнических установок. При сетчатом ограждении будет более удобно, осматривать подстанцию.

Нельзя согласиться с А. А. Ермиловым в отношении того, что втулки масляных трансформаторов должны быть в боковой части, а не сверху. Устройство втулок в боковой части ради незначительного удобства соединения трансформатора с камерами распределительного устройства приведет к усложнению конструкции трансформатора и удороожанию его. При наружной установке трансформатора наличие боковых выводов может потребовать дополнительного ограждения, так как высота токоведущих частей может оказаться ниже требуемой Правилами устройства электротехнических установок.

Предложение располагать втулки с узкой стороны трансформатора может касаться только внутрицепочных комплектных подстанций мощностью 560...1 000 ква. Осуществление его даст незначительное уменьшение ширины установки — только на 1...1,2 м, а при трансформаторах меньшей мощности — на 0,65 м.

Применение рубильников со встроенными предохранителями возможно при условии, если их конструкция позволит при отключении приводом иметь разрывы с двух сторон. Но тогда этот аппарат нельзя называть рубильником. Это — предохранитель со втычными контактами. Предохранители должны иметь защитные щитки, но и при этом применять их при напряжении 500 в нежелательно.

**Инж. А. А. ЕРМИЛОВ**  
Тяжпромэлектропроект

Ниже приведены ответы и дополнительные соображения по вопросу об изготовлении комплектных трансформаторных подстанций в связи с замечаниями, высказанными В. А. Козловым и С. А. Кудряшовым по поводу моей статьи «Комплектные трансформаторные подстанции массового применения».

Внимательное рассмотрение конкретных предложений В. А. Козлова показывает, что в них не содержится принципиальных расхождений с выводами моей статьи. Приведенные им параметры комплектных подстанций для городских, сельских и промышленных сетей напряжением до 10 кв совпадают с предложенной мною шкалой (см. таблицу).

Мнение В. А. Козлова о необходимости ограничить предложенную мною шкалу более узкими рамками ошибочно. Иметь такую или подобную ей шкалу очень важно, так как это даст электропромышленности перспективу в отношении развития производства комплектных подстанций. Речь может идти лишь о том, чтобы предложенная мною шкала осваивалась не сразу, а этапами. Для ограничения числа исполнений в табл. 2 моей статьи даны наиболее употребительные сочетания элементов подстанций. Для первой стадии освоения число этих сочетаний можно сократить.

Предложение А. А. Ермилова			Предложение В. А. Козлова		
Мощность, ква	Первичное напряжение, кв	Вторичное напряжение, кв	Мощность, ква	Первичное напряжение, кв	Вторичное напряжение, кв
100	(3); 6; 10	0,23; 0,4	50		
180			100		
320			180	6; 10	0,23; 0,4
560			320		
750			560		
1 000			750		
1 800			1 000		
3 200					
5 600					
	35	(3); 6; 10			

В. А. Козлов напрасно исключает из шкалы третью группу комплектных подстанций с трансформаторами мощностью 1 800...5 600 ква и первичным напряжением 35 кв. Такие подстанции нужны не только для осуществления глубоких вводов высокого напряжения на промышленные предприятия, но и в качестве, например, опорных пунктов сельской электрификации. Центроэлектросетьстрой на базе существующего оборудования разработал, а Министерство электростанций утвердило сельские комплектные подстанции на указанные мощности и первичное напряжение<sup>1</sup>.

На сохранении напряжений 0,525 и 3 кв настаивать не приходится, так как они очень мало применяются. Но следует заметить, что наличие в шкале этих напряжений не потребует дополнительных конструктивных решений.

Безусловно правильным является принципиальное положение о том, что создание рациональных комплектных устройств должно основываться на специальном оборудовании высокого и низкого напряжения, и такое требование содержится в моей статье. Но в ней указаны также те из существующих аппаратов, которые с теми или иными конструктивными изменениями могут быть приспособлены для комплектных подстанций, пока электропромышленность не освоит специального оборудования.

Совершенно очевидно, что в статье, посвященной основным требованиям к комплектным подстанциям, нельзя было обойти молчанием основные вопросы защиты, изменений, конструктивного выполнения и оборудования.

В замечаниях В. А. Козлова чрезмерное внимание удалено рис. 5 моей статьи, на котором показан пример

выполнения передвижных комплектных подстанций в условиях производственных предприятий электромонтажных организаций и которому в статье посвящено всего лишь несколько строк. Эти подстанции предназначены для строительных площадок и других временных сооружений.

Комплектные подстанции, подобные представленной на рис. 5, имеют обычное оборудование, не приспособленное для комплектных устройств. Это снижает их эксплуатационные качества, делает их более громоздкими и дорогими, чем комплектные устройства массового применения, которые должны изготавляться в заводских условиях. Однако нельзя не признать, что даже такие комплектные подстанции являются шагом вперед по сравнению с кирпичными или железобетонными.

Нельзя согласиться с утверждением В. А. Козлова о том, что камеры типа КСО и комплектные подстанции Главэлектромонтажа, а также комплектные подстанции Московского трансформаторного завода являются не комплектными, а обычными сборными устройствами. Они полностью подходят под определение комплектных устройств, приведенное в Правилах устройства электротехнических установок (см. § 3 и 6 раздела «Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1 000 в»), т. е. целиком изготавливаются на заводе или в мастерской и доставляются в готовом виде к месту установки.

Нельзя согласиться с В. А. Козловым в том, что в комплектной подстанции, приведенной на рис. 5 моей статьи, допущены нарушения требований Правил устройства электротехнических установок. Из рассмотрения габаритов и общей компоновки этой подстанции легко убедиться, что все оборудование вполне доступно для безопасного обслуживания при открытых дверях и эксплуатационные требования не снижены. На таком же принципе обслуживания построены и успешно эксплуатируются комплектные подстанции в США (рис. 1). Необходимо заметить, что к проходам и расстояниям комплектных устройств нельзя подходить с той же меркой, с какой подходят к проходам и расстояниям распределительных устройств в бетонных и кирпичных зданиях.

В первых образцах комплектных подстанций, подобных приведенной на рис. 5, для удобства и безопасности обслуживания были предусмотрены откидные подножники с изоляционным покрытием. Однако в целях облегчения и удешевления подстанций от этих подножников отказалась. Если потребуется, к ним можно будет вернуться.

С замечанием С. А. Кудряшова о мощностях короткого замыкания согласиться нельзя.

В моей статье указаны наибольшие мощности короткого замыкания. Разумеется, на практике может встретиться необходимость в комплектных подстанциях, соответствующих другим разрывным мощностям. Однако большого разнообразия подстанций в отношении разрывной мощности допускать не следует, но вместе с этим нельзя подстанции с первичным напряжением, например, 10 кв изготавливать только на разрывную мощность 100 ква, как это предлагает С. А. Кудряшов. Для подстанции напряжением до 10 кв нужно установить разрывные мощности 100, 200 и 300 мгва, а с первичным напряжением 35 кв — 400 и 500 мгва.

Для подстанций на указанные разрывные мощности подойдут существующие типы выключателей ВМБ10, ВМГ133, ВМД35 и МГ35, разрывные мощности которых соответственно равны 100, 350, 400 и 500 мгва. При определенных условиях подойдет и выключатель нагрузки, выдерживающий предельный сквозной ток 25 000 а. Кроме того, при установлении шкалы комплектных устройств мы, ориентируясь на существующие типы выключателей, вовсе не обязаны полностью исходить из их параметров, поскольку выдвигается требование о разработке специальных типов.

В США приняты следующие разрывные мощности комплектных подстанций: при напряжении до 5 кв — 20, 100, 150 и 250 мгва; при напряжении 5...15 кв — 250 и 500 мгва.

Предложенная С. А. Кудряшовым предельная разрывная мощность на вторичном напряжении 80 мгва недостаточна. Предлагая такую мощность, С. А. Кудряшов не учитывает, что в промышленных сетях место короткого замыкания может пытаться также от электродвигателей. Кроме того, он не учитывает возможности параллельной

<sup>1</sup> Образец такой подстанции экспонирован на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке.

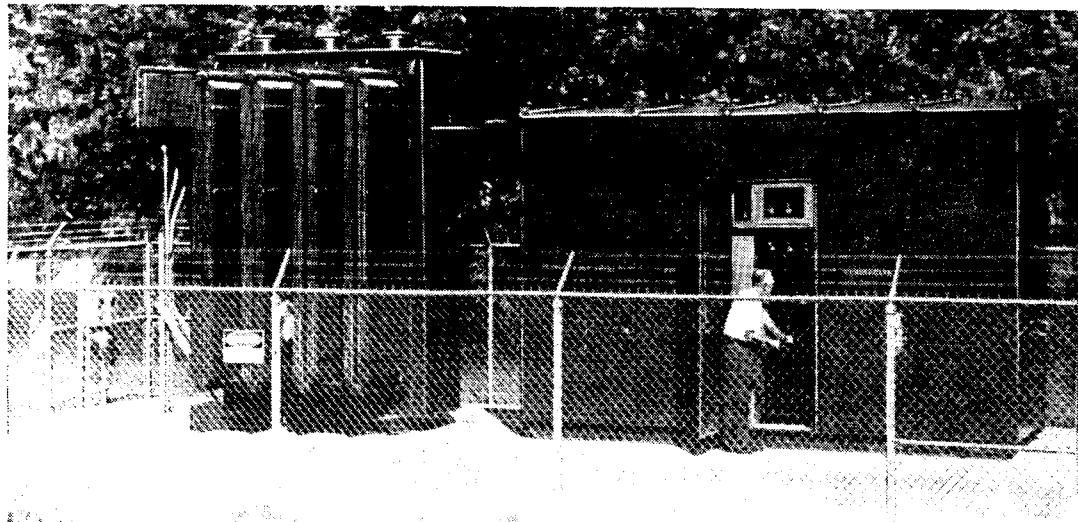


Рис. 1. Комплектная подстанция фирмы Аллис-Чалмерс (США) для наружной установки.  
Мощность 3 000...3 900 ква, напряжение 33 000/4 330 в.

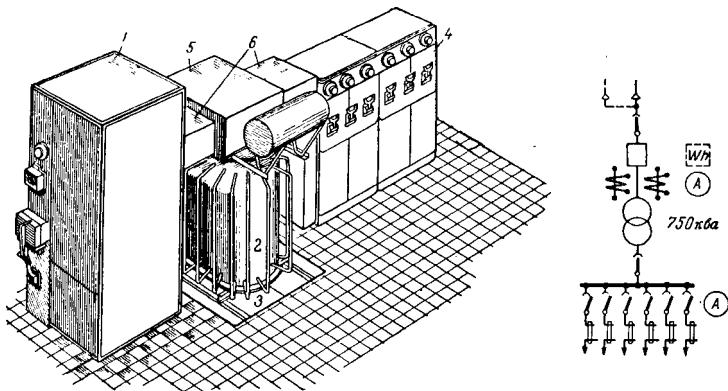


Рис. 2. Однотрансформаторная комплектная подстанция  
Главэлектромонтажа мощностью 750 ква.

1 — шкаф высокого напряжения; 2 — трансформатор; 3 — маслосборная яма; 4 — распределительное устройство низкого напряжения; 5 — защитный кожух; 6 — соединительные короба.

работы трансформаторов, например, при питании от шин 6 или 10 кв комплектной подстанции мощных двигателей, при пуске которых имеют место значительные толчки нагрузки. Поэтому следует сохранить предложенные в моей статье величины предельных разрывных мощностей при вторичном напряжении (100 и 150 мгва), тем более что это соответствует разрывным мощностям существующих типов выключателей.

Согласно каталогу динамическая устойчивость выключателей соответствует их разрывной мощности, поэтому замечание С. А. Кудряшова в этой части отпадает.

В вариантах 1 и 2 для комплектных подстанций I группы выключатели нагрузки могут быть заменены разъединителями. В вариантах 3 и 4 такая замена может быть допущена лишь при трансформаторах, мощность которых не выше 320 ква. Вариант 3 нужно сохранить для четкости и удобства выбора подстанций.

Варианты 1 и 2 II группы комплектных подстанций могут быть применены и на напряжении 35 кв, так как при этом напряжении выключатель нагрузки может быть заменен разъединителем, которым можно отключить холодной ход трансформаторов мощностью до 1 000 ква и зарядный ток воздушных линий электропередачи напряжением 35 кв и ниже длиной до 10 км\*. Всесоюзный элек-

тroteхнический институт им. Ленина обещает увеличить отключающую способность разъединителей на напряжение 35 кв или же разработать выключатели нагрузки на это напряжение.

У всех типов выкатных комплектных распределительных устройств, изготавляемых в Советском Союзе, присоединение разрядников и трансформаторов напряжения осуществляется по варианту 7 (см. рис. 3 моей статьи).

Приведенная в моей статье схема автоматики является одним из примеров простейшей схемы, не требующей постоянного оперативного тока. Она может быть применена лишь для малых комплектных подстанций первой группы мощностью до 320 ква. Более надежной и пригодной для мощных подстанций должна являться схема с применением усовершенствованных автоматов, работающих на переменном оперативном токе с грузовыми или пружинными приводами, которые должны быть созданы нашей электропромышленностью.

При сравнении предлагаемой С. А. Кудряшовым схемы со схемой Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноского необходимо иметь в виду, что в нормальном режиме оба трансформатора работают с недогрузкой, величина которой определяется принятой степенью резервирования и тем, насколько максимум подстанции близок к одной из стандартных мощностей трансформаторов. Следовательно, при аварии одного трансформатора второй может быть длительно перегружен на значительную величину. По данным завода трансформаторы независимо от предшествующей нагрузки могут допускать перегрузки до 40...50% на время 6...24 час при условии, чтобы температура верхних слоев масла не превышала 105° С. Поэтому схема С. А. Кудряшова далеко не всегда будет давать значительный выигрыш мощности трансформатора. Схема же и конструкция подстанции будут всегда сложнее и дороже.

Непонятно замечание С. А. Кудряшова о том, что при схеме Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиноского потребители I категории должны питаться от двух секций. При аварии с одним трансформатором питавшаяся от него секция автоматически переводится на питание от второго трансформатора.

Возражения С. А. Кудряшова против боковых выводов трансформаторов необоснованы. Сопоставление комплектных подстанций, представленных на рис. 1 и 2, наглядно показывает преимущества подстанций с боковыми выводами трансформаторов. Отпадают громоздкие и сложные кожухи на крыше трансформатора, которые очень трудно сделать герметичными при наружной установке подстанции. Улучшается наблюдение за приборами на крыше трансформатора (масломерное стекло, термометр, ды-

\* См. "Правила технической эксплуатации электростанций и сетей".

хательные пробки). Упрощаются вскрытие трансформатора и его сочленение с комплектным распределительным устройством высокого и низкого напряжений. Боковые выводы не могут вызвать усложнения и удорожания трансформатора. Непонятно, почему боковые выводы требуют дополнительного ограждения комплектной подстанции. Известно, что все эти выводы и токоведущие части подстанции имеют сплошные покрытия.

Необоснованы также возражения С. А. Кудряшова против расположения выводов с узкой стороны трансформатора. Достижаемое при этом уменьшение ширины уста-

новки на 1...1,2 м, которое С. А. Кудряшов считает незначительным, является весьма существенным для цеховых подстанций, так как технологами обычно ставится условие размещать их в мертвый зоне крана.

За границей и у нас применяются комбинированные аппараты, состоящие из рубильников и предохранителей. С А. Кудряшов их называет предохранителями с втычными контактами. Эти аппараты дают очень компактное конструктивное решение, что весьма существенно для комплектных подстанций. Непонятно, почему С. А. Кудряшов считает их применение нежелательным.

## О ПРИМЕНЕНИИ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР

(Статья М. Л. Гальперна, Б. А. Удовиченко, К. Н. Воеводина, Электричество, № 12, 1954)

**Инж. Р. А ГОЛУБЦОВ**

Теплоэлектропроект

В рассматриваемой статье авторы пытаются доказать целесообразность использования плоских, или, точнее сказать, гибких металлических конструкций для промежуточных опор линий электропередачи 35 кв с проводами АС-70 и АС-95, проходящих в I и II климатических районах. Подвеска защитных тросов на предлагаемых конструкциях опор авторами не предусматривается.

Применение гибких промежуточных опор, по утверждению авторов, повышает эксплуатационную надежность линий электропередачи 35 кв и снижает расходы на сооружение опор и фундаментов.

Постараемся разобраться, в какой мере справедливо утверждение авторов.

По мнению авторов, повышенная эксплуатационная надежность линий электропередачи 35 кв на гибких промежуточных металлических опорах создается путем снижения расчетного напряжения в материале проводов, являющихся по их утверждению наиболее часто повреждающимся элементом линии. На первый взгляд опыт эксплуатации линий электропередачи как будто бы подтверждает это утверждение, так как из общего числа повреждений негрозового характера, зарегистрированных на линиях, самую многочисленную группу (49...56%) составляют повреждения проводов, причем примерно половина повреждений связана с их обрывом.

Однако если обратиться к анализу причин повреждения проводов, то нетрудно убедиться, что они в основном обуславливаются обстоятельствами, весьма мало зависящими от расчетных напряжений в материале провода. Г. А. Энгель [Л. 1] в числе причин, вызывающих повреждения проводов, упоминает конструктивные недостатки опор, вибрацию проводов, дефекты монтажа, ошибки персонала при работах на линиях, повреждения линейной арматуры, стихийные бедствия и, наконец, посторонние причины. В числе рекомендаций по снижению повреждаемости линий электропередачи, которые Г. А. Энгель перечисляет в заключительной части своей статьи, мы не находим указаний о желательности снижения расчетного напряжения в материале проводов. Это станет понятным, если вспомнить, что коэффициент запаса прочности сталеалюминиевых проводов даже АС-70 и АС-95 определяется цифровой порядка 2,6.

Напомним также статью А. А. Глазунова, А. А. Глазунова и Г. М. Розанова и развернувшуюся вокруг нее дискуссию [Л. 2, 3].

В действительности снижение расчетного напряжения в проводах следует рассматривать как еще одно ограничение сверх других принятых авторами ограничений в отношении номинального напряжения линии, климатических районов, конструкции поддерживающих зажимов и защитных тросов. Без этих ограничений применение гибких промежуточных опор технически трудно осуществимо.

Приведенная в статье величина экономии металла (15...20%) отнесена к промежуточной или анкерной опоре, что не дает возможности правильно судить о целесообразности применения гибких опор на линиях электропередачи. Для получения правильного суждения техникоэкономические

показатели следуют, как правило, относить к одному километру линии.

Как указывалось выше, при гибких опорах обязательно применение пониженного расчетного напряжения в проводах линии, что связано с сокращением расчетного пролета, а следовательно, с увеличением числа опор на линии. Из таблицы видно, что сокращение длины расчетных пролетов для проводов АС-70 и АС-95 лежит в пределах 10...17%.

Марка провода	AC-70	AC-95
Длина расчетного пролета, м:		
при нормальном расчетном напряжении . . . . .	276	287
при пониженном расчетном напряжении . . . . .	235	260
Сокращение пролета, % . . . . .	17	10

Увеличение числа опор на линии связано с дополнительным расходом гирлянд изоляторов и линейной арматуры, а также увеличением числа фундаментов. В итоге полученный от применения гибких промежуточных опор экономический эффект может оказаться настолько незначительным, что не компенсирует недостатков, присущих этим конструкциям.

Предлагаемая авторами система подвески проводов на гибкой опоре в выпускающих зажимах вызывает сомнение в отношении надежности в эксплуатации.

При определении отклонения нижнего конца гирлянды  $a$  под действием разности тяжения авторы исходят из предположения, что разность высот точек подвеса на смежных опорах  $\Delta_n = 0$  (см. приложения I и II к рассматриваемой статье). При таком предположении длины «весовых» и расчетного пролетов совпадают между собой, т. е.  $g_n$  равно весу расчетного пролета с добавочной нагрузкой (см. уравнение (2,1) рассматриваемой статьи). Однако в зависимости от характера профиля трассы линии значения «весовых» пролетов, а вместе с ними и величины  $g_n$  могут изменяться и для отдельных опор получать значения, близкие к нулю (сильно пересеченные трассы). Для этих опор отклонения нижнего конца гирлянды  $a$  будут значительно больше, чем предполагают авторы, поэтому весьма вероятны случаи ложного срабатывания выпускающих зажимов при сильных ветрах вдоль линии и при обрыве одного из крайних проводов.

Ссылка авторов на высокую надежность линии на деревянных опорах, работающих в условиях, схожих с условиями, в которых придется работать металлическим опорам новой конструкции, малоубедительна хотя бы потому, что гибкие деревянные промежуточные опоры выполняются, как правило, в виде двухстоечных конструкций.

Примененная для гибкой опоры стойка прямоугольного сечения весьма чувствительна к кручению, на которое она должна быть проверена по известным формулам:

$$T_a = \frac{M_{kp} b}{a^2 + b^2} \quad \text{и} \quad T_s = \frac{M_{kp} a}{a^2 + b^2}.$$

# По страницам технических журналов

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Высокочастотные каналы по линиям электропередачи во многих случаях более практичны, экономичны и надежны, чем другие виды связи. В технике высокочастотной связи используется передача по силовым линиям частот от 400 гц до 300 кгц. Применяются схемы фаза—земля или фаза—фаза. Передача ведется разными методами: манипуляция несущей, амплитудная модуляция, частотная модуляция, частотный сдвиг, передача одной боковой полосы частот без несущей или с приглушенной несущей.

При высоком уровне помех применяется частотная модуляция или передача одной боковой полосы частот, обеспечивающие улучшение отношения сигнал/шум по сравнению с обычной амплитудной модуляцией. При большом числе каналов применение системы передачи одной боковой полосы частот позволяет более гибко размещать каналы и, следовательно, более полно использовать отведенный участок спектра частот.

Высокочастотные устройства являются, как правило, одноканальными. Они используются для телефонной связи, телеметрии, телерегулирования, телеграфии, телесигнализации, релейной защиты. В некоторых случаях, однако, две или больше функции объединяются в одном канале для экономии частот, как, например, телеметрическое и релейная защита.

Конструктивно высокочастотные телефонные посты и многоканальные посты телеметрий выполнены на стойках типа аппаратуры дальней связи в виде набора панелей, закрытых отдельными чехлами.

Высокочастотные каналы для релейной защиты и регулирования частоты имеют большое значение в работе энергосистем. Благодаря использованию быстродействующей высокочастотной защиты и регулированию нагрузки энергосистемы могут работать ближе к пределу устойчивости. Быстродействующее селективное отключение или блокировка при помощи высокочастотных каналов уменьшают время протекания токов короткого замыкания через оборудование энергосистем.

Автор отмечает, что высокочастотная телефонная связь по линиям электропередачи начала широко применяться примерно с 1923 г. При этом в передатчиках использовались весьма мощные 250-ваттные лампы. В настоящее время благодаря усовершенствованию приемников и вспомогательных устройств мощность на выходе передатчиков бывает часто всего 1...2 вт. Потери энергии в сети уменьшены и надежность связи увеличена также благодаря применению высокочастотных заградителей.

В 1936 г. высокочастотные каналы применялись для телефонии, релейной защиты и телемеханики. После 1940 г. высокочастотная связь развивалась весьма быстро. Широкое применение получили высокочастотные защиты на всех магистральных и соединительных силовых линиях.

Усовершенствования были достигнуты почти во всех областях техники высокочастотной связи. Увеличена дальность действия и помехоустойчивость аппаратуры. Это

повысило надежность, в частности при плохих условиях погоды.

Улучшения были реализованы в аппаратуре с частотной модуляцией и однополюсной, в тональных блоках, электронных переключателях; были повышены надежность и качество ламп, трансформаторов и др.; были улучшены устройства присоединения обмотки и отделки.

Существенное значение имел также прогресс в знании техники применения высокочастотных устройств в энергетике. В настоящее время инженеры связи и защиты энергосистем располагают оборудованием, при помощи которого можно решать сложные задачи релейной защиты, связи и телемеханики.

Необходимо тщательное обсуждение каждой новой высокочастотной установки, чтобы выбранное оборудование полностью удовлетворяло поставленным задачам и новый канал координировался с существующими высокочастотными каналами.

В некоторых случаях может оказаться желательным замена устаревшего оборудования. Высокочастотные каналы развивались так быстро, что общесистемное планирование было затруднено. Это делает необходимым весьма тщательное планирование и направление будущих установок.

Развитие и успехи в этой области можно наглядно представить, если учесть, что общие капиталовложения в США в оборудование высокочастотных каналов и присоединенных к ним устройств составляют 250 млн. долларов. Будущее развитие высокочастотной связи по линиям электропередачи обещает быть быстрым и интересным. Это иллюстрируется современными тенденциями в направлении использования широкополосных устройств присоединения и многоканальной аппаратуры. Вполне возможно, что силовые линии можно будет использовать в качестве волноводов для сверхвысоких частот.

В большинстве случаев высокочастотные каналы экономичны и практичны. Однако этот вид связи столь широко использовался некоторыми энергосистемами, что добавление новых каналов весьма затруднено. Эти условия постепенно улучшаются путем усовершенствования аппаратуры. Некоторые организации используют другие средства связи и уплотняют высокочастотными каналами линии связи, идущие вдоль силовых линий. Другие обращаются к родственным средствам связи, таким, как радиосвязь на микроволнах, т. е. на частотах выше 1000 мгц. Преимуществом радиорелейных линий на микроволнах является их способность обеспечивать большое число каналов для различных целей.

Телеизмерения, защита, телесигнализация, телерегулирование, телеграф и телефон с автоматическим набором могут быть присоединены к радиорелейной линии. Увеличение емкости линии осуществляется легко. Схему радиорелейных линий связи можно составлять почти независимо от схемы силовых линий. Современные достижения радиотехники сделали радиорелейные линии весьма надежным средством связи.

(W. Boardway, E1. Eng., стр. 42, № 1, 1955).

Кандидат техн. наук Я. Л. Быховский

Для надежности значение  $M_{kp}$  следует определять без учета поддерживающего действия необорванных проводов.

Утверждение авторов о возможности уменьшения объема фундамента гибкой промежуточной опоры за счет сокращения в 2 раза числа железобетонных подножников малоубедительно, так как в статье ничем не подтверждено.

Предложение выполнять промежуточные опоры в виде гибких металлических конструкций не является новым. Из зарубежной литературы 30-х годов нам известны попытки использования таких опор на некоторых линиях 35 и 110 кв, однако широкого применения эти конструкции не получили, повидимому, из-за свойственных им недостатков.

Подытоживая изложенное, мы высказываемся вообще против применения гибких промежуточных металлических

опор. Что же касается линий 35 кв, то опоры этих линий, по нашему мнению, следует изготавливать не из металла, а из сборного железобетона или из дерева.

### Литература

- Г. А. Энгель. Сборник «Эксплуатация воздушных линий электропередачи», Госэнергоиздат, 10.
- А. А. Глазунов, А. А. Глазунов и Г. М. Розанов. Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах. Электричество, № 5, 1952.
- Дискуссия по статье А. А. Глазунова, А. А. Глазунова и Г. М. Розанова «Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах». Электричество, № 4, 6 и 7, 1953.



## ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА МОЩНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Коэффициент мощности при работе трансформатора в режиме холостого хода равен примерно 0,05...0,08. Вследствие малости этой величины инструкции иногда рекомендуют не пользоваться для измерений потерь холостого хода измерительными трансформаторами тока и напряжения, так как их угловые погрешности могут значительно искажить результаты. Однако для мощных трансформаторов этого рекомендовать не следует, так как можно пользоваться корректирующими формулами, учитывающими угловые погрешности.

Вывод этих формул произведен в предположении коэффициента трансформации измерительных трансформаторов, равного единице. Как известно, под угловой погрешностью измерительного трансформатора понимают сдвиг между вектором первичного напряжения или тока и повернутым на  $180^\circ$  соответствующим вторичным вектором напряжения или тока. Обычно угловые погрешности дают положительный знак тогда, когда повернутый на  $180^\circ$  вторичный вектор опережает первичный.

В дальнейшем изложении погрешность отнесена к нескорректированной величине измеренной мощности. Этот несколько необычный метод находит себе, однако, оправдание тем, что необходимое корректирование производится просто и точно. Предполагается, что для измерений применен метод двух ваттметров (рис. 1).

Ваттметр, имеющий наибольшее отклонение стрелки, связан с измерительными трансформаторами, угловые погрешности которых  $\delta_1$  и  $\epsilon_1$ ;  $\delta_2$  и  $\epsilon_2$  — угловые погрешности измерительных трансформаторов, к которым подключен ваттметр, имеющий наименьшее отклонение.

Формулы погрешностей выведены для каждого ваттметра отдельно.

Если на векторной диаграмме произвольно принять угловые погрешности измерительного трансформатора положительными, то для ваттметра, имеющего большее отклонение, измеренная мощность будет определяться выражением

$$P_q = e_{13} i_1 \cos(\varphi - 30^\circ - \delta_1 + \epsilon_1),$$

в то время как действительная мощность

$$P_t = e_{13} i_1 \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Несложный вывод приводит к выражению для погрешности (отнесенной к измеренной мощности) в процентах:

$$f = 0,0291 (\delta'_1 - \epsilon'_1) \operatorname{tg}(\varphi - 30^\circ - \delta_1 + \epsilon_1) \%, \quad (1)$$

где значение  $(\delta'_1 - \epsilon'_1)$  определяется из равенства

$$\sin(\delta_1 - \epsilon_1) = \frac{2\pi}{360 \cdot 60} (\delta'_1 - \epsilon'_1).$$

Так как угол  $\varphi$  мало отличается от  $90^\circ$ , то  $\operatorname{tg}(\varphi - 30^\circ - \delta_1 + \epsilon_1)$  обязательно положителен. Если к тому же  $\delta'_1 - \epsilon'_1$  положительно, то погрешность имеет общий положительный знак. Если  $\delta'_1 - \epsilon'_1$  отрицательно, то погрешности имеют отрицательный знак.

Для ваттметра, имеющего отрицательное отклонение стрелки, можно на диаграмме также произвольно принять погрешности положительными. Получаем соответственно:

$$P_q = e_{23} i_2 \cos(\varphi + 30^\circ - \delta_2 + \epsilon_2);$$

$$P_t = e_{23} i_2 \cos(\varphi + 30^\circ);$$

$$f = 0,0291 (\delta'_2 - \epsilon'_2) \operatorname{tg}(\varphi + 30^\circ - \delta_2 + \epsilon_2) \%, \quad (2)$$

где  $(\delta'_2 - \epsilon'_2)$  определяется из равенства:

$$\sin(\delta_2 - \epsilon_2) = \frac{2\pi}{360 \cdot 60} (\delta'_2 - \epsilon'_2).$$

Так как  $\varphi \approx 90^\circ$ , то  $\operatorname{tg}(\varphi + 30^\circ - \delta_2 + \epsilon_2)$  определено отрицательен. Если  $\delta'_2 - \epsilon'_2$  положительно, то погрешность  $f$  будет иметь отрицательный знак, если же  $\delta'_2 - \epsilon'_2$  отрицательно, то  $f$  положительно. Обозначения ясны из векторной диаграммы рис. 2.

**Пример.** Методом двух ваттметров произведено измерение мощности потерь холостого хода трехфазного транс-

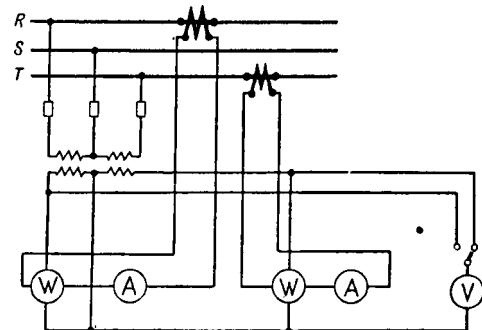


Рис. 1. Схема измерения потерь холостого хода.

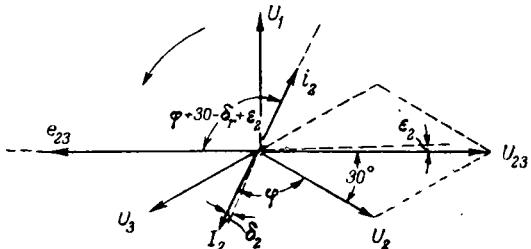


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов (к выводу корректирующих формул для ваттметра с меньшим— отрицательным— отклонением).

форматора, мощностью 62,5 тыс. ква, 36,0/11,5 кв, 50 гц и получены следующие результаты:

$$P_R = -176 \text{ квт}, P_T = +248 \text{ квт}, \\ I_R = I_T = 37,5 \text{ а}, U_{R-S} = U_{T-S} = 11,5 \text{ кв}.$$

Схема измерения приведена на рис. 1.

По паспортным данным угловая погрешность испытательных трансформаторов составляла: для трансформатора тока в фазе  $R$ :  $+7'/\delta'_2$ ; в фазе  $T$ :  $+6'/\delta'_1$ ; для трансформатора напряжения между фазами  $R-S$ :  $+2'/\epsilon'_2$  между фазами  $T-S$ :  $+1'/\epsilon'_1$ .

По результатам измерений определяем  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{248000 - 176000}{1,73 \cdot 11500 \cdot 37,5} = 0,0965; \quad \varphi = 84,5^\circ.$$

Определим погрешность, с которой была измерена мощность в фазе  $R$  (меньшее отрицательное отклонение стрелки ваттметра). Косинус угла  $(\varphi + 30^\circ - \delta_2 + \epsilon_2)$  определяется по измерениям

$$\cos(\varphi + 30^\circ - \delta_2 + \epsilon_2) = \frac{176000}{11500 \cdot 37,5} = 0,408;$$

по таблице тангенс этого угла равен  $-2,2373$ ; он отрицателен, так как  $(\varphi + 30^\circ) > 90^\circ$ . Следовательно, погрешность  $f\%$  составит (по уравнению 2):

$$f = +0,0291 (7 - 2) \cdot (-2,2373) = -0,32\%.$$

Измеренную величину мощности (176 квт) следует скорректировать в сторону увеличения на 0,32%, и получим действительное значение мощности 176,6 квт.

Так же определяем процентное значение погрешности  $f\%$  для мощности фазы  $T$  (наибольшее положительное отклонение стрелки ваттметра). По формуле (1) определяем  $f = 0,21\%$ . Измеренную мощность следует уменьшить на 0,21%, и действительная величина мощности в фазе  $T$  будет 247,5 квт.

Общая мощность получается как разность мощностей  $T$  и  $R$ :  $247,5 - 176,6 = 70,9$  квт вместо ранее измеренного  $248 - 176 = 72$  квт, т. е. действительная мощность на 1,5% меньше. Таким образом, приведенные корректирующие формулы увеличивают точность измерений за счет учета влияния угловых погрешностей измерительных трансформаторов.

(H. Töbler. ETZ-A, стр. 102, № 2, 1955.)

Инж. А. В. Михалков

## РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ФИРМЫ БРОУН-БОВЕРИ

В начале развития этой отрасли аппаратостроения (около 40 лет назад) выпрямители строились на небольшие токи 150...250 а в единице при небольших рабочих напряжениях.

Спустя примерно 20 лет на основании проведенных исследований и изучения процессов выпрямления мощность в одной единице была значительно повышена. Были освоены выпрямители с управляющими сетками, служащими для отключения в момент коротких замыканий или обратных зажиганий, а также регулирования напряжения на стороне выпрямленного тока.

Одновременно с развитием выпрямителей усовершенствовались устройства и оборудование к ним. В первые 20 лет выпрямители охлаждались проточной водой. Позднее этот способ охлаждения был заменен циркуляционной системой, которая, с одной стороны, предотвращает разрушение корпуса от коррозии, а с другой, — дает возможность создать более благоприятные условия охлаждения корпуса.

В настоящее время применяются две системы охлаждения: вода—водой, применяемая при больших токах, и вода—воздухом, используемая при высоких напряжениях, а также тогда, когда вода дефицитна.

В 1935 г. был создан выпрямитель с воздушным охлаждением на 400 а, 600 в; воздухом охлаждался не только корпус выпрямителя, но и ртутный насос. В дальнейшем появились охлаждаемые воздухом выпрямители на более высокие мощности.

Развитие выпрямителестроения шло также по линии повышения выпрямленного напряжения. В 1939 г. была построена линия передачи постоянным током при напряжении 50 кв, а в 1943—1954 гг. — выполнена вторая установка такого типа. В обеих установках были применены ртутные выпрямители и инверторы. В конце 30-х годов фирма выпустила на рынок запаянные ртутные выпрямители с воздушным охлаждением — наиболее экономичную и к тому же малогабаритную конструкцию. Некоторые выпрямители этого типа насчитывают уже 60 000 час бесперебойной работы.

За последние два десятилетия потребление электрической энергии на постоянном токе сильно возросло и выпрямители получили большое распространение; благодаря своему высокому к. п. д. они вытеснили врачающиеся преобразователи.

В последние годы получили большое распространение одноанодные выпрямители, особенно в США. Во время второй мировой войны в США былопущено большое число алюминиевых заводов, и все они были снабжены одноанодными выпрямителями большой мощности с водяным охлаждением типа игнитронов. Основные преимущества одноанодных выпрямителей — малое падение напряжения в дуге. Для исключения опасных последствий, связанных с обратными зажиганиями, в цепях анодов включаются быстродействующие выключатели с автоматическим повторным включением. Преимуществом одноанодных выпрямителей является также то, что в случае аварии в короткий срок можно заменить вышедший из строя вентиль резервным, в то время как у многоанодных весь выпрямитель на длительное время останавливается для ремонта.

В последнее время фирма стала применять для вводов главных и вспомогательных анодов спай стекла с металлом. Такие вводы обладают рядом преимуществ и допускают более высокие рабочие температуры. Сейчас фирма изготавливает одноанодные выпрямители с шестью вентилями на ток 5 000 а при напряжении 750 в на стороне выпрямленного тока.

Одноанодные выпрямители выполняются также с воздушным охлаждением. Шесть таких вентилей могут нести нагрузку 3 500 а при 750 в. Такая группа номинальной мощностью 1 750 квт при напряжении 750 в работает на установке метрополитена на подземной подстанции. Выпрямители выдерживают в течение часа перегрузки: 30 толчков в 4 800 а и 15 толчков в 7 000 а, каждый толчок продолжительностью в 20 сек с интервалами в 60 сек.

Фирма изготавливает также шестианодные выпрямители с воздушным охлаждением мощностью 1 875 квт при напряжении 750 в или 4 000 квт при 3 600 в. Эти выпрямители применяются на тяговых автоматических подстанциях. Изготавляются также многоанодные запаянные

выпрямители с управляющими сетками мощностью 930 квт при 750 в или 2 000 квт при 3 600 в.

Наконец, следует указать на применение выпрямителей для установки на электровозе с целью использования для тяги тока промышленной частоты. Для этого назначения фирма выполнила одноанодные запаянные выпрямители с воздушным охлаждением.

(С. Вупхилден, BBC Mitteilungen, стр. 125—133, апрель — май, 1955.)

Л. М. Клячкин

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ БУМАГИ НА ИОНИЗАЦИЮ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В изолирующем слое кабелей с вязкой пропиткой неизбежно наличие воздушных включений в виде пленок и пузырьков газа. Применительно к такому диэлектрику авторы дают формулы для расчета тангенса угла потерь в зависимости от напряжения.

Расчет ведут, исходя из следующих допущений: 1) ширина пленки газа во много раз больше ее высоты, вследствие чего пленку можно представить в виде плоского конденсатора; 2) торможение движения ионов, обусловленное вязкостью газовой среды, равно как и соответствующее выделение тепла, пренебрежительно мало; 3) время прохождения ионом пленки мало по сравнению с длительностью существования напряжения.

Рассмотрим одну газовую пленку высотой  $h$ , находящуюся в плоском диэлектрике с большим числом слоев  $n$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , к которому приложено переменное напряжение с мгновенным значением  $u$ . Пока в пленке нет ионизации, на ее зажимах существует напряжение  $\frac{u}{n} \epsilon$ . После начала ионизации образовавшиеся заряды быстро доходят до стенок пленки, где они оседают, создавая противодействующее электрическое поле и отдавая кинетическую энергию стенкам пленки в виде тепла. Противодействующее поле иона несколько ослабляет результирующее напряжение на пленке, но на возрастающем участке синусоиды приложенного напряжения оно вновь растет и достигает ионизационного значения. Новый ионизационный заряд вновь ослабляет напряжение и т. д. Процесс повторяется до момента достижения амплитуды напряжения источника  $U_m$ , причем на пленке напряжение сохраняет значение, близкое к напряжению начала ионизации  $U_{\text{нач}}$ . Величина противодействующего заряда  $Q$  определяется противодействующим напряжением  $U_E$ , и максимальный противодействующий заряд  $Q_0$  вычисляется из соотношений

$$Q = CU_E; U_{\text{нач}} = \frac{u\epsilon}{n} - U_E; C = \frac{s}{4\pi h},$$

где  $s$  — площадь пленки, откуда

$$Q_0 = \frac{s}{4\pi h} \left( \frac{U_m \epsilon}{n} - U_{\text{нач}} \right).$$

Потери в одной пленке за один полупериод

$$W = Q_0 U_{\text{нач}} = \frac{s}{4\pi h} \left( \frac{U_m \epsilon}{n} - U_{\text{нач}} \right) U_{\text{нач}} \quad (1)$$

Пользуясь полученным выражением (1), автор выводит формулы для диэлектрических потерь и  $\operatorname{tg} \delta$ .

Для плоского диэлектрика

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\alpha \cdot a - 1}{\pi \cdot a^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент заполнения диэлектрика газом, т. е. отношение суммарного газового объема к объему диэлектрика;

$U_m$   
 $U_{\text{нач}}$  — отношение амплитуды переменного напряжения к напряжению начала ионизации ( $U_{\text{нач}}$  относится ко всему диэлектрику).

При увеличении напряжения  $\operatorname{tg} \delta$  переходит через максимум, равный

$$\operatorname{tg} \delta_{\max} = \frac{\alpha \varepsilon}{2\pi} \text{ при } a = 2, \text{ т. е. } U_m = 2U_{\text{нач}}$$

(амплитуда напряжения в 2 раза превосходит напряжение начала ионизации). Максимальное значение  $\operatorname{tg} \delta$  зависит только от коэффициента заполнения газом и электрической проницаемости материала.

Для цилиндрического конденсатора с отношением радиусов обкладок  $\frac{R}{r} = b$  действительны две формулы:

при  $1 < a < b$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon \alpha}{\pi \ln b} \left( \frac{a-1}{a} \right); \quad (3)$$

при  $a < b$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon \alpha}{\pi \ln b} \frac{(b-1)(2a-b-1)}{a^2}. \quad (4)$$

Формулы (2) ... (4) дают составляющую  $\operatorname{tg} \delta$ , обусловливаемую только потерями на ионизацию в газовых пленках. Для получения полного значения  $\operatorname{tg} \delta$  необходимо к значению  $\operatorname{tg} \delta$ , рассчитанному по уравнениям (2) ... (4), прибавить составляющую, обусловленную потерями в твердом диэлектрике (горизонтальный участок в начальной части кривой  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ ). В цилиндрическом конденсаторе  $\operatorname{tg} \delta$  переходит через максимум при  $a = b + 1$ , т. е.  $\frac{U_m}{U_{\text{нач}}} = \frac{R+r}{r}$ :

$$\operatorname{tg} \delta_{\max} = \frac{\varepsilon \alpha}{\pi \ln b} \frac{b-1}{b+1}. \quad (5)$$

Влияние толщины бумаги выясняется из рассмотрения местного нагрева изоляции в непосредственных очагах ионизации — газовых пленках. Полученные формулы для  $\operatorname{tg} \delta$  характеризуют средние потери, т. е. средний нагрев. В очагах ионизации местный перегрев будет тем больше, чем больше потери из-за ионизации в полости. Эти потери характеризуются потерями на единицу площади пленки, которые можно представить в виде:

$$W' = \frac{f \varepsilon^2 h}{4\pi} G_1 (G_0 - G_1), \quad (6)$$

где  $h$  — высота пленки, т. е. толщина бумаги;

$$G_1 = \frac{U}{h\varepsilon} \text{ — градиент в изоляции, соответствующий началу ионизации в пленке;}$$

$G_0$  — максимальный градиент в изоляции.

В свою очередь, исходя из выражений закона Пашена для напряжения начала ионизации в пленке, который можно представить в виде:  $U = Ap + B(ph)^{1/2}$ , находим:

$$G_1 = \frac{Ap + Bp^{1/2}h^{-1/2}}{\varepsilon}, \quad (7)$$

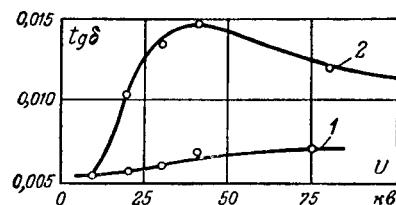
где  $A$  и  $B$  — постоянные;

$p$  — давление газа в пленке.

Из выражений (6) и (7) видно, что с уменьшением толщины листа бумаги местный перегрев и потери в изоляции уменьшаются, а градиент начала ионизации увеличивается. Точно так же видна благоприятная роль повышения давления газа.

Полученные расчетные формулы были проверены автором на двух образцах кабеля. Первый из них был намотан из бумаги, предварительно пропитанной очень вязким составом. Поэтому можно было считать, что масса не выйдет из бумаги в полость между торцами листов бумаги. Таким образом, размер полости и коэффициент заполнения диэлектрика газом были известны, что позволило рассчитать  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ . Измеренная кривая дала хорошее совпадение с расчетом.

Второй образец представлял собой нормальный кабель с вязкой пропиткой, имевший после изготовления



Расчетные кривые зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от напряжения в кабеле с вязкой пропиткой.

1 — в новом кабеле; 2 — после шести циклов нагрева при 35 кВ в течение 2530 час (R = 22 мм; r = 8 мм; ε = 3,6; кружками отмечены опытные точки).

едва заметную ионизацию. После шести циклов длительного нагрева и охлаждения, когда пропиточная масса вытеснялась из пленок при нагреве и вновь не возвращалась в них по охлаждению, кривая  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$  приняла резко выраженный ионизационный характер (см. рисунок) с точкой ионизации при напряжении 10 кВ.

Используя значение  $\operatorname{tg} \delta$  при 40 кВ, т. е.  $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{40 \text{ кВ}} - \operatorname{tg} \delta_{10 \text{ кВ}}$ , автор нашел по формуле (5) коэффициент заполнения диэлектрика газом  $\alpha = 0,017$ .

Считая, что этот коэффициент постоянен в течение всего времени измерения зависимости  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ , автор рассчитывает всю кривую. Как видно из рисунка, опыт дал очень хорошее совпадение с расчетом.

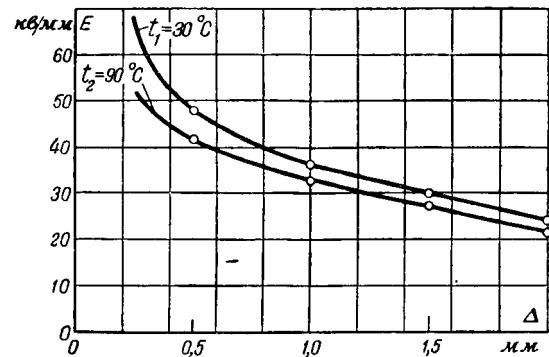
(J. Oudin et H. Thévenep. Revue Générale de l'Électricité, t. 62, стр. 581, № 2, 1953).

Кандидат техн. наук,  
доц. Е. В. Калинин

## СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В последние годы полиэтилен находит все более широкое применение в кабельной технике, в частности в качестве материала для изолирования жил силовых кабелей на напряжение до 30 кВ. Подобное использование полиэтилена обусловлено его отличными электроизоляционными, физико-механическими и химическими свойствами. К их числу относятся малая электрическая проницаемость ( $\epsilon = 2,3$ ) и малый тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta = 3 \dots 5 \cdot 10^{-4}$ ), высокая электрическая прочность ( $E_{np} = 24 \dots 40 \text{ кВ/мм}$  при 50 Гц) и большое удельное объемное сопротивление ( $\rho_v = 10^{17} \text{ ом}\cdot\text{см}$ ).

Высокая влагонепроницаемость и малая влагопоглощаемость ( $< 0,01\%$ ) гарантируют достаточную стабильность электроизоляционных свойств в условиях повышенной влажности окружающей среды, в частности при подводных прокладках кабеля. Благодаря небольшому удельному весу полиэтилена упрощаются транспортировка и прокладка и допускается увеличение строительных длин



Электрическая прочность полиэтилена  $E$  в зависимости от толщины  $\Delta$  и температуры  $t$ .

кабелей. Полиэтилен технологичен — он легко выпрессовывается на червячном прессе.

На рисунке приведена зависимость электрической прочности полиэтилена от толщины и температуры.

Электрическая прочность полиэтиленовой изоляции проводов и кабелей ниже значений, полученных при испытании плоских образцов, и может быть принята в расчетах (при условии длительного приложения напряжения) 15...18 кв/мм.

Благодаря низкой водопоглощаемости полиэтиленовая изоляция применяется в тех кабелях, которые по условиям эксплуатации целесообразно изготавливать не в свинцовой, а в полиэтиленовой оболочке, например в кабелях, прокладываемых в химически агрессивных средах.

Британский стандарт № 1557 предусматривает изготовление кабелей с полиэтиленовой изоляцией, предназначенной для прокладки в силовых и осветительных сетях напряжением до 250 в, а также пригодных для использования в трехфазных сетях с заземленной нейтралью на напряжение 440 в. Стандарт распространяется на одножильные, двухжильные и трехжильные кабели круглой и плоской форм. Изоляция жил одножильных кабелей окрашена в красный или черный цвет, двухжильных — в красный и черный цвета и трехжильных — в красный, белый и синий цвета.

Радиальные толщины полиэтиленовой изоляции в зависимости от номинального сечения и конструкции токопроводящей жилы приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Зависимость толщины полиэтиленовой изоляции кабелей на 250 в от сечения жил

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Число и диаметр проволок, мм	Толщина изоляции, мм
0,97	1×1,12	0,76
1,3	3×0,74	0,76
1,93	3×0,91	0,76
2,9	7×0,74	0,76
4,5	7×0,91	0,89
6,45	7×1,12	0,89
9,35	7×1,32	1,02
14,5	7×1,63	1,02
19,3	9×1,12	1,14
25,8	9×1,32	1,27
38,7	9×1,63	1,40

Согласно указанному стандарту испытание изоляции напряжением частотой 50 гц производится после 12-часового пребывания изолированной жилы в воде. Изоляция должна выдержать испытательное напряжение 1500 в, прикладываемое между токопроводящей жилой и водой; при этом напряжение повышается постепенно и на заданном уровне поддерживается в течение 15 мин. Водное испытание электрической прочности изоляции может быть заменено проверкой на аппарате сухого испытания, через который изолированные жилы пропускаются с такой скоростью, чтобы любая точка изоляции находилась под электродом не менее 0,1 сек. Величины испытательного напряжения переменного тока частотой 50 гц в зависимости от сечения токопроводящей жилы указаны в табл. 2.

Сопротивление изоляции проводника, погруженного в воду, измеренное при температуре 15,6°С после 1 мин приложения напряжения постоянного тока не менее 500 в, должно быть не ниже 4500 мегом·км.

В 1954 г. на основании пятилетнего опыта изготовления указанных низковольтных кабелей стандарт № 1557 был пересмотрен в сторону уменьшения толщины полиэти-

Таблица 2

### Испытательные напряжения низковольтных кабелей с полиэтиленовой изоляцией

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Испытательное напряжение, в
До 14,5 включительно	
14,5 . . . 25,8	6 000 8 000 10 000
25,8 . . . 38,7	

леновой изоляции. Кроме того, в стандарт был включен пункт, характеризующий метод определения качества изоляции.

Использование полиэтилена для изолирования жил силовых кабелей не ограничилось его применением в низковольтных кабелях. В 1953 г. был изготовлен трехжильный кабель на 11 кв с круглыми отдельно экранированными жилами сечением 64,5 мм<sup>2</sup>, полиэтиленовой изоляцией и в полиэтиленовой оболочке. Этим кабелем, состоящим из трех концов общей длиной 330 м, были соединены две подстанции, расположенные на противоположных сторонах шлюза. Два крайних конца кабеля были проложены непосредственно в земле, а третий на протяжении 40 м проходил по подземному туннелю и в местах входа и выхода из туннеля прокладывался в вертикальных шахтах глубиной 21 м. Соединительные и концевые заделки выполнялись при помощи клейкой влагостойкой ленты, благодаря чему изоляционные свойства и влагостойкость кабеля хорошо сохранились по всей его длине.

Табл. 3 дает представление о толщинах полиэтиленовой изоляции в силовых кабелях английской фирмы Telcon.

Таблица 3

### Толщина полиэтиленовой изоляции в силовых кабелях

Номинальное напряжение, кв	Толщина изоляции, мм	
	Неэкранрованные жилы	Экранированные жилы
0,66	1,62	—
3,3	2,65	—
6,6	3,42	2,54
11	4,30	3,55

Отсутствие жидких составляющих в изоляции делает кабели с полиэтиленовой изоляцией особенно пригодными для вертикальных прокладок и прокладок по крутонаклонным трассам.

В настоящее время западно-германские кабельные заводы выпускают силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией на напряжение до 30 кв [Л. 5 и 6].

### Литература

1. El. Journal, т. 153, стр. 1214. № 16, 1954.
2. El. Review, т. 154, стр. 183, № 5, 1954.
3. Engineer, т. 196, стр. 484, № 5107, 1953.
4. British Standard, № 1557, 1949.
5. ETZ-A, стр. 601, № 9, 1954.
6. Rubber a. Plastics Age, т. 35, стр. 445, № 9, 1954.

Инж. Р. М. Лакерник и инж. Д. Л. Шарле



# Хроника

## ДИССЕРТАЦИИ

Ленинградского политехнического института имени Калинина

В Ученом совете Ленинградского политехнического института имени Калинина защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с июня 1946 г. по апрель 1947 г.<sup>1</sup>

**А. Н. Соколов** защитил 10 июня 1946 г. диссертацию на тему «Электрический режим работы дуговых печей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс и проф. А. А. Алексеев.

Изложены математические соотношения для «кривых характеристик» дуговых печей, рассмотрены допущения, сделанные при построении «кривых характеристик» и указаны факторы, определяющие выбор рабочих значений тока. Охарактеризованы отличия фактического режима работы дуговых печей от «теоретического» режима и подробно рассмотрены факторы, обуславливающие эти отличия.

**И. Е. Балыгин** защитил 1 июля 1946 г. диссертацию на тему «Высоковольтные делители напряжения импульсной формы».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский и кандидат техн. наук В. М. Рябов.

Выведена формула для определения искажаемости формы импульса омическими делителями. Изложена идея экранированных омического и емкостного делителей, предложенных автором. Дано описание комбинированного делителя и изложена методика приближенного подсчета его компенсирующих емкостей.

**В. И. Дроздов** защитил 11 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Физические процессы металлического ртутного выпрямителя с управляющими сетками».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. И. Зилитиневич и член-корр. АН СССР П. И. Лукирский.

Применен метод зондов к исследованию процессов в дуге переменного тока в металлическом ртутном выпрямителе. Найдена новая закономерность, характерная для многоанодного выпрямителя: зависимость потенциала зажигания сеток от тока нагрузки. Установлено новое принципиальное положение о так называемом предельном токе короткого замыкания, запираемого сетками. Разработаны на основании опыта основные принципы сеточных схем управления.

**А. М. Дамский** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Погрешности и основы расчета измерительных приборов электродинамической системы».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Каплянский и кандидат техн. наук Н. Н. Рazuмовский.

Выведены уравнения для расчета вращающих моментов электродинамических приборов с различными формами катушек, определены оптимальные соотношения размеров для получения наивыгоднейшего характера шкалы. Даны методы расчета как измерительных механизмов, так и схем амперметров, вольтметров и ваттметров.

**А. С. Либерман** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Подстанции малой мощности в электроснабжении промышленных предприятий». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и доктор техн. наук, проф. В. П. Иванов.

Уточняются и дополняются решения теоретического определения мощности подстанций по минимуму цветных металлов и минимум годовых расходов.

**Л. Л. Крапивенский** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Анализ чувствительности и погрешности электрической схемы метода электрогидродинамической аналогии». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. Л. Ка-

лантаров и кандидат техн. наук, доц. О. В. Горбачевич.

Исследован метод, применяемый для определения потенциалов и напряженности электрического поля в электролитических ваннах при обтекании током решеток профилей из изолирующих материалов. Полученные данные могут быть использованы, например, для решения задач по определению распределения скорости вдоль профиля турбинной лопатки или крыла самолета, распределению напряжения в скручиваемых валах машин, исследованию фильтрации через грунт и ряда других задач.

**Е. Д. Несголовова** защитила 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «О самовозбуждении коллекторных машин». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Завалишин и кандидат техн. наук, доц. Л. П. Гнедий.

Рассмотрены условия возникновения процесса самовозбуждения в целях однофазных и многофазных коллекторных машин при изменении электрических параметров контура. Принципиальное положение и основные соотношения получены на примере самовозбуждения двухфазной последовательной коллекторной машины. В работе приводятся основные соотношения между параметрами, определяющие условия возникновения процесса самовозбуждения и его устранения, а также важнейшие характеристики для однофазных и многофазных машин основных схем возбуждения и некоторых каскадных установок.

**К. С. Стефанов** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Импульсный генератор для питания электронной трубы на 15 000 000 вольт». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский и кандидат техн. наук В. М. Рябов.

Рассмотрены методы получения быстрых частиц при помощи импульсных генераторов высокого напряжения. Рассмотрены возможности конструктивного выполнения импульсного генератора. Произведен расчет параметров импульсного генератора.

**В. С. Равдоник** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Пропускная способность воздушных линий электропередачи, определяемая термической устойчивостью проводов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский.

Определена максимальная температура для твердотянутых медных и алюминиевых проволок, не изменяющая механических свойств проводов. Исследована зависимость температуры от величины пропускаемого тока и скорости воздушных потоков, охлаждающих провод, в условиях, весьма близких к линейным. Определено изменение характеристик контактных соединений проводов воздушных линий передачи при нагревании.

**В. Я. Упатов** защитил 21 февраля 1947 г. диссертацию на тему «Электрические и тепловые характеристики авиационных искровых свечей зажигания». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов и кандидат физ.-матем. наук, доц. А. Р. Шульман.

Экспериментально показано, что имеющие место дефекты изоляции искровых свечей объясняются наличием в слюдяной изоляции углеобразных продуктов распада глифталевого лака, который применяется для герметизации слюдянных авиа свечей. Предложен упрощенный тепловой расчет слюдянной свечи, позволяющий оценить максимальную температуру ее головки, знание которой облегчает выбор свечи для данного типа двигателя.

**А. А. Воронов** защитил 17 марта 1947 г. диссертацию на тему «Об автоколебаниях при автоматическом регулировании напряжения генераторов постоянного тока». Официальные оппоненты: проф. Д. В. Васильев и кандидат техн. наук, доц. В. А. Романов.

Приведены методы получения нелинейных дифференциальных уравнений, использующие стандартные характе-

<sup>1</sup> С диссертациями можно ознакомиться в Государственной библиотеке имени Ленина в Москве или в библиотеке ЛПИ.

ристики машин и позволяющие произвести несложный анализ влияния «нелинейности». Предложен упрощенный метод для приближенного определения амплитуд автоколебаний, если они существуют. В качестве примера рассмотрены типичные схемы регулирования машины с самовозбуждением (регулятором Тома) и независимым возбуждением (электронным регулятором).

**Л. И. Александрова** защитила 28 апреля 1947 г. диссертацию на тему «Основные свойства воськообразных компаундов для целей пропитки и влагозащиты изоляции». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР П. П. Кобеко и кандидат техн. наук В. Т. Рение.

Установлены закономерности получения воськообразных компаундов для целей пропитки и влагозащиты изоляции. На основе этих закономерностей получены компаунды с улучшенными свойствами против чистых воськообразных веществ, поскольку последние в ряде случаев не удовлетворяют полному комплексу свойств, требуемых от компаундов.

**Т. Н. Дьяченко** защитила 19 мая 1947 г. диссертацию на тему «О влагопоглощении малополярных органических диэлектриков и сопутствующем изменении их электрических свойств». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР П. П. Кобеко и кандидат техн. наук, доц. К. И. Черняк.

Изучены изменение удельного сопротивления диэлектрической проницаемости и  $\tan \delta$  в зависимости от длительного действия влаги, а также влияние частоты на изменение  $\tan \delta$  увлажненных материалов. В результате проведенного эксперимента установлены ухудшение электрических характеристик резиновых смесей и полная неизменность их на технической частоте для политетена и гуттаперчи. Данные, полученные в результате длительного эксперимента, дали возможность определить влияние влагопоглощения на электрические характеристики некоторых малополярных органических материалов, охарактеризовать влагостойкость каждого из них и указать степень пригодности их для работы в качестве подводной изоляции.

**М. И. Зильberman** защитил 16 июня 1947 г. диссертацию на тему «Расчет переходных процессов в электроприводе с шунтовым двигателем постоянного тока, регулируемым изменением тока возбуждения, при учете реакций якоря». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс и кандидат техн. наук В. А. Бесекерский.

Предложено аналитическое выражение для кривой намагничивания машины постоянного тока, охватывающее с достаточной точностью всю кривую намагничивания. На основании этого выражения проводится аналитическое определение значений результирующего потока, потоков реакции якоря и коэффициента самоиндукции обмотки возбуждения в функции тока возбуждения и нагрузки. Разработан графоаналитический метод расчета переходных процессов шунтового регулирования электропривода при разных нагрузках и сопротивлениях цепи якоря как с учетом, так и без учета влияния реакции якоря и индуктивности якоря.

**А. К. Несмачная** защитила 16 июня 1947 г. диссертацию на тему «Электрические методы определения короткозамкнутых витков в рамках и катушках электроизмерительных приборов и реле». Официальные оппоненты: проф. Н. А. Маренин и доц. Арутюнов.

Исследованы имеющиеся установки для определения короткозамкнутых витков, основанные на разных принципах, выявлены пути теоретического и экспериментального анализа принципа, который может быть положен в основу для расчета и проектирования достаточно чувствительной и простой в эксплуатации установки.

**О. Б. Певзнер** защитил 1 июля 1947 г. диссертацию на тему «Искажение кривой момента асинхронного короткозамкнутого двигателя дополнительными асинхронными моментами высших гармонических». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс и кандидат техн. наук, доц. М. О. Оранский.

Рассмотрены метод расчета асинхронных паразитных моментов и влияние отдельных параметров электродвигателя на их величину.

**Б. Х. Коник** защитил 1 июля 1947 г. диссертацию на тему «Определение параметров явнополюсной синхронной машины в связи с расчетом пусковых характеристик ее». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. П. Пиотровский и кандидат техн. наук Н. А. Моносзон.

Дан критический анализ практически применяющихся в заводских условиях методов расчета пусковых характеристик явнополюсных синхронных машин и расчета параметров для них. На основе этого анализа предлагается наиболее рациональный метод расчета пусковых характеристик и даны точные кривые для определения коэффициентов поля, необходимых при расчете параметров.

**Х. И. Рабкин** защитил 1 июля 1947 г. диссертацию на тему «Магнитодиэлектрики». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов и кандидат техн. наук, доц. В. Т. Рение.

Рассмотрены основные свойства параметров и технология производства магнитодиэлектриков — группы магнитных материалов, представляющих собой прессованные смеси ферромагнитных порошков с изоляционными материалами.

**Н. Н. Шольц** защитила 1 июля 1947 г. диссертацию на тему «Исследование и расчет катушек индуктивности с магнитодиэлектрическим сердечником». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов и кандидат техн. наук, доц. И. А. Зайцев.

Приведен обобщенный материал по расчету катушек индуктивности с магнитодиэлектрическим сердечником торoidalной формы, применяющихся для аппаратуры производной связи в диапазоне частот до 500 кгц. При рассмотрении расчета индуктивности в обычные формулы вводятся поправки, учитывающие особенности магнитодиэлектрических магнитных цепей. На основе экспериментальных данных построены графики, при помощи которых для типовых торoidalных сердечников могут быть определены диаметр провода и сопротивление обмотки постоянному току при заданной индуктивности.

**С. М. Куляшов** защитил 10 ноября 1947 г. диссертацию на тему «Исследование процесса теплообмена в электрической печи сопротивления». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов и доктор техн. наук, проф. И. И. Палеев.

Рассмотрен вопрос о теплообмене между нагревательным элементом и материалом в электрической печи сопротивления с учетом потерь через стенку. Дан вывод энергетических параметров, которые характеризуют теплообмен между ленточным нагревательным элементом и материалом в зависимости от конструктивных размеров нагревательного элемента и фактора потерь через стенку.

**В. В. Мотовилов** защитил 3 января 1948 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование дифференциальной защиты трансформаторов с отстройкой от ударных токов намагничивания». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и кандидат техн. наук, доц. И. А. Зайцев.

Рассмотрен вопрос определения величины ударного тока намагничивания силовых трансформаторов и намагничающих токов трансформаторов тока. Произведено теоретическое и экспериментальное исследование одной из наиболее совершенных схем блокировки дифференциальной защиты, а именно схемы блокировки на выпрямленном токе. Разработана методика расчета элементов схемы блокировки на выпрямленном токе и дано конструктивное решение.

**Н. Н. Крачковский** защитил 24 мая 1948 г. диссертацию на тему «Анализ схем коммутации гидроэлектрических станций». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и кандидат техн. наук, доц. В. И. Розенберг.

Рассмотрены вопросы коммутации гидроэлектрических станций различных мощностей, за исключением мелких гидростанций мощностью до 5 мгвт. Отмечены особенности гидростанций по сравнению с тепловыми станциями и устанавливаются общие положения в отношении энергетических условий их работы и способов распределения энергии. Рассмотрены вопросы связи гидростанций с си-

системой, влияние на схему коммутации условий устойчивости параллельной работы гидростанции с системой.

**С. В. Авакян** защитил 14 июня 1948 г. диссертацию на тему «Исследование дугогасящих устройств с масляным автопоперечным дутьем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Б. Романовский и инж. П. И. Бачурин.

Рассмотрена возможность количественной оценки энергетических процессов, происходящих в дугогасящих устройствах с масляным автопоперечным дутьем, дается метод расчета коэффициента гидравлического сопротивления дутьевого канала и предлагается эмпирическая формула.

**Г. Р. Лулов** защитил 6 июня 1949 г. диссертацию на тему «Экспериментальное исследование вентиляции мощных гидрогенераторов зонтичного исполнения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. А. Дементьев и доктор техн. наук, проф. И. М. Постников.

Автор детально изучил и обобщил результаты большого количества испытаний крупных гидрогенераторов. Результаты испытаний как тепловых, так и вентиляционных были подвергнуты пересчету по единой методике. Проведен анализ нагрева отдельных частей машин в связи с анализом вентиляции.

**Ш. И. Лапидус** защитил 27 июня 1949 г. диссертацию на тему «Тепловые расчеты силовых сухих трансформаторов при естественном охлаждении». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. М. Постников и доктор техн. наук, проф. Н. П. Ермолин.

Дан анализ источников тепла в трансформаторах и коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи соответствующих поверхностей при естественной циркуляции воздуха. На базе существующей теории теплоотдачи со свободной поверхностью при естественном охлаждении составлен обзор коэффициентов теплоотдачи лучеиспусканием и посредством конвекции и коэффициентов теплопроводности. Рассмотрен тепловой расчет сухих трансформаторов на основе экспериментальных данных.

**Л. А. Цейтлин** защитил 27 июня 1949 г. диссертацию на тему «Расчет индуктивности плоских контуров». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. А. Лившиц и кандидат техн. наук, доц. И. А. Зайцев.

Даны общие выражения для собственной и взаимной индуктивностей контуров и расчетные соотношения для собственной и взаимной индуктивности прямолинейных проводников, лежащих в одной плоскости. Разработан общий метод расчета индуктивностей прямоугольных и многоугольных контуров со взаимно перпендикулярными сторонами. Рассмотрены приближенные методы расчета индуктивностей плоских контуров любого вида.

**И. И. Шипулин** защитил 27 июня 1949 г. диссертацию на тему «Переходные процессы в приводе по системе генератор-двигатель с возбуждением от электромашинного усилителя». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и кандидат техн. наук, доц. Т. Н. Соколов.

Сделан вывод оправдывающий переходные процессы в электроприводе, произведена оценка принимаемых при этом допущений, проведен на основании полученных уравнений и экспериментального материала анализ работы обратных связей и их взаимодействия в переходных процессах, в результате чего обосновывается возможный метод определения оптимальных параметров системы.

**Н. И. Головачевский** защитил 27 июня 1949 г. диссертацию на тему «Выбор типов и установление нормалей агрегатов гидроэлектрических станций малой мощности». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Морозов и кандидат техн. наук, доц. В. П. Гурьев.

Рассмотрены роль и значение малых гидростанций в энергоснабжении СССР, развитие строительства таких гидростанций в нашей стране и дана характеристика потребителей современных малых ГЭС. Рассматривается вопрос о типизации малых гидростанций и их оборудования. Приводятся некоторые примеры конструктивных решений агрегатов малой мощности. Рассмотрен вопрос о наиболее рациональном и оптимальном типе агрегата для малой гэс. Данна универсальная номограмма для выбора агрегата.

**С. М. Рожков** защитил 27 июня 1949 г. диссертацию на тему «Потери мощности и энергии в электрических сетях энергосистем (влияющие факторы, пути снижения, методы анализа)». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и кандидат техн. наук, доц. А. К. Дарманчев.

Дан анализ факторов, влияющих на величину потерь мощности и энергии. Рассмотрены пути снижения потерь энергии и даются рекомендации.

**Н. И. Лавров** защитил 12 декабря 1949 г. диссертацию на тему «Исследование круговой схемы испытания мощных высоковольтных вентиляй». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Завалишин и кандидат техн. наук В. И. Емельянов.

Дано исследование установившихся режимов круговой схемы, предназначенной для испытания ионных вентиляй. Приведен математический анализ электромагнитных процессов, имеющих место в мостовых схемах испытания мощных вентиляй. Изложены результаты специально проведенных автором экспериментов с целью подтверждения сделанных им теоретических выводов.

**С. Б. Васютинский** защитил 12 декабря 1949 г. диссертацию на тему «Электромагнитные процессы в выпрямительной и инверторной схеме ионных преобразователей при наличии фильтров в цепи выпрямленного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, доц. Б. М. Шляпников и кандидат техн. наук В. Н. Левин.

Рассмотрены процессы выпрямления и инвертирования тока в преобразователе, включенном по трехфазной мостовой схеме с со средоточенными параметрами в цепи пульсирующего тока и снажженном на стороне пульсирующего тока параллельно включенными двухэлементными резонансными цепями.

**А. Н. Цикин** защитил 12 декабря 1949 г. диссертацию на тему «Бумажные конденсаторы с полупроводящей пропиткой». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР, доктор физ.-матем. наук, проф. П. П. Кобеко и кандидат техн. наук Л. Н. Закгейм.

Проведено большое количество исследований бумаги, пропитанной различными веществами. Построены опытные конденсаторы; исследованы их характеристики. Разработана технология производства новых конденсаторов.

**М. С. Ворошилов** защитил 6 февраля 1950 г. диссертацию на тему «Анализ различных систем электротехнического копирования по чертежу». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и кандидат техн. наук, доц. Ю. А. Сабинин.

Наряду с разработкой общих вопросов, связанных с копированием изделий по чертежу, в работе произведено исследование наиболее важных узлов схемы фотоэлектрического управления. Для комплексного исследования фотоэлектрических систем копирования был спроектирован и построен опытный фотоэлектрический фрезерный станок для обработки моделей гребных винтов. Разработаны основные положения для метода расчета систем импульсного управления приводов и построены их характеристики.

**М. М. Писаревский** защитил 27 февраля 1950 г. диссертацию на тему «Некоторые особенности электрорезонансного процесса и его влияние на свойства обрабатываемых материалов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук Ю. В. Баймаков и кандидат физ.-матем. наук В. А. Степанов.

В первой части работы изучено влияние различных факторов на ход процесса. Практические результаты изучения дали: 1) резкое увеличение срока службы электродов; 2) уменьшение конусности прожигаемых отверстий; 3) возможность изготовления сложных мелких штампов при помощи одного электрода. Вторая часть работы посвящена изучению структуры и свойств поверхностного слоя металла, подвергнутого электрорезонансной обработке.

**А. И. Вольдек** защитил 20 марта 1950 г. диссертацию на тему «Исследование рассеяния в электрических машинах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. М. Пиотровский и кандидат техн. наук О. Б. Певзнер.

Дан анализ дифференциального рассеяния асинхронных машин при равномерном и неравномерном воздушном зазорах. Рассмотрены схемы замещения и параметры син-

хронных машин в связи с дифференциальным рассеянием машины явнополюсного типа.

**Н. К. Гальперин** защитил 20 марта 1950 г. диссертацию на тему «Методы расчета времени срабатывания электромагнитных выключателей с выдержкой времени». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман, доктор техн. наук, проф. О. Б. Брон и кандидат техн. наук, доц. Г. А. Кукеков.

Исследованы переходные процессы в электромагнитных выключателях с выдержкой времени, для расчета переходных процессов с учетом рассеяния магнитного потока, насыщения стали магнитопровода и вихревых токов в сплошных участках магнитной цепи.

**В. П. Демянцевич** защитил 20 марта 1950 г. диссертацию на тему «Исследование влияния методов регулирования сварочных автоматов на формирование швов при сварке в условиях колебания сетевого напряжения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Алексеев и кандидат техн. наук Л. Н. Кушнарев.

На основании теоретического и экспериментального исследований установлены качественные и количественные зависимости между электрическими параметрами процесса сварки закрытой дугой и геометрическими размерами сварных швов в условиях колебания сетевого напряжения при различных методах регулирования автоматов.

**А. И. Пирязева** защитила 10 апреля 1950 г. диссертацию на тему «Импульсная пропускная способность рабочих сопротивлений вилитовых разрядников». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский и доктор техн. наук, проф. Н. Г. Богородицкий.

Рассмотрена рабочая гипотеза о механизме проводимости вилитовых дисков, установлен вероятный механизм их разрушения, предложен критерий пропускной способности вилитовых дисков.

**В. В. Хрущев** защитил 10 апреля 1950 г. диссертацию на тему «Применение метода преобразования координат к теории систем синхронной связи на явнополюсных сельсинах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. Н. Грузов и кандидат техн. наук А. И. Важнов.

Приведены основные уравнения однофазных явнополюсных сельсинов и уравнения простейшей схемы синхронной связи, состоящей из двух одинаковых сельсинов. Исследованы уравнения для различных режимов работы двух сельсинов. Рассмотрены работы системы при отсутствии возбуждения на приемнике, режим малых колебаний и некоторые асинхронные режимы системы с двумя сельсинами.

**Н. М. Горбатов** защитил 20 октября 1950 г. диссертацию на тему «Аналитические методы определения токов и напряжений при коротких замыканиях с одновременным обрывом фаз». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и кандидат техн. наук, доц. Б. И. Розенберг.

Рассмотрен вопрос о приведении схемы сети в данных режимах к простейшим эквивалентным схемам с минимальным числом параметров; рассматриваются различные методы определения параметров эквивалентных схем или расчетных коэффициентов аналитических уравнений; даются новые расчетные уравнения

**И. И. Идельсон** защитил 11 июня 1951 г. диссертацию на тему «Исследование следящей системы переменного тока малой мощности». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Риневич и кандидат техн. наук, доц. Ю. А. Сабинин.

Рассмотрена весьма распространенная в современной автоматике следящая система переменного тока с электронным усилителем и двухфазным конденсаторным электродвигателем с полым ротором (неподвижной магнитной системой). Установлена возможность применения современного метода анализа следящей системы — метода логарифмических частотных характеристик, разработанного в Советском Союзе, к системам на переменном токе.

**А. А. Батоврин** защитил 2 июля 1951 г. диссертацию на тему «Электромагнитные процессы в импульсной машине для сварки». Официальные

оппоненты: проф. А. А. Алексеев и кандидат техн. наук С. Г. Сарапанов.

Разработаны вопросы о наивыгоднейшем воздушном зазоре в импульсном трансформаторе для контактной сварки и безискровой работе выключающего устройства. Дано теоретическое и экспериментальное исследование электромагнитных процессов, протекающих в импульсном трансформаторе.

**С. Р. Глинтерник** защитил 2 июля 1951 г. диссертацию на тему «Электромагнитные процессы в ионных преобразователях частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, доц. Б. М. Шляпников и кандидат техн. наук Н. И. Лавров.

Исследованы электромагнитные процессы в различных схемах мощных преобразователей частоты с одноанодными параллельно и встречно включенными вентилями. Автор свои выводы и расчеты доводят до определения всех энергетических показателей работы преобразователей частоты.

**О. В. Щербачев** защитил 2 июля 1951 г. диссертацию на тему «Моделирование некоторых элементов высоковольтных систем с нелинейными характеристиками». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Миролюбов и кандидат техн. наук, доц. И. А. Зайцев.

Установлены общие условия подобия модели произвольной электрической системы, содержащей элементы как с линейными, так и с нелинейными характеристиками. Рассмотрены вопросы о моделировании: внезапных изменений параметров и схем электрических цепей, обусловленных появлением электрической дуги, сопротивления, зависящего от напряжения, параметров коронирующей линии.

**В. В. Фетисов** защитил 11 февраля 1952 г. диссертацию на тему «Внезапное короткое замыкание генераторов постоянного тока». Официальные оппоненты: проф. А. П. Сахаров и кандидат техн. наук, доц. В. П. Андреев.

Получен ряд существенных результатов в отношении теоретического и экспериментального исследований отдельных явлений (лоперечной и коммутационной реакций якоря, переходного падения напряжения, вихревых токов, индуктивностей обмоток машины, потенциальной кривой на коллекторе) и самого процесса короткого замыкания. Эти результаты могут быть пригодны при исследовании других случаев короткого замыкания в машинах иных типов, а также при исследовании других видов переходных процессов в машинах постоянного тока.

**В. М. Алешин** защитил 7 апреля 1952 г. диссертацию на тему «Расчет электромагнитного поля в проводе прямоугольного сечения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Б. Романовский и кандидат техн. наук, доц. И. А. Зайцев.

Рассмотрен вопрос о методах расчета электромагнитного поля в проводящей среде. Разработан практический расчетный метод нахождения электромагнитных величин в любой точке сечения длинного провода из неферромагнитного материала, по которому протекает переменный электрический ток.

**А. Н. Грибов** защитил 12 мая 1952 г. диссертацию на тему «Исследование электропроводности контакта между кристаллическими зернами карборунда, являющегося материалом для изготовления вентильных грозозащитных разрядников. Экспериментальное исследование импульсных и вольтамперных характеристик дает представление о работе карборундовых сопротивлений.

**Г. А. Смирнов** защитил 12 мая 1952 г. диссертацию на тему «Применение электрических отметчиков для исследования машин». Официальные оппоненты: проф. А. П. Иванов и кандидат техн. наук М. П. Павлов.

На основании теоретического и экспериментального исследований предложены формулы и данные, которые могут иметь практическое приложение с целью усовершенствования существующих электромагнитных хронографов

в связи с задачами опытного исследования быстроходных машин-автоматов и полуавтоматов.

**Н. А. Марков** защитил 9 июня 1952 г. диссертацию на тему «Применение междуфазного напряжения в качестве параметра регулирования мощности трехфазной дуговой электрической печи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. В. Берендеев, кандидат техн. наук, доц. А. В. Донской.

Исследования показали полную возможность применения междуфазного напряжения в качестве параметра регулирования печи, что приводит к повышению качества регулирования и улучшению работы трехфазных дуговых печей.

**Е. И. Сурикова** защитила 30 июня 1952 г. диссертацию на тему «Метод автоматической записи кривых намагничения на постоянном токе». Официальные оппоненты: доктор физ.-матем. наук, проф. Б. М. Яновский и кандидат техн. наук, доц. Е. Т. Чернышев.

Даны теоретическое обоснование, анализ погрешностей и определение возможностей практического применения метода автоматической записи кривых намагничения на постоянном токе; использовался гальванометр, работающий в схеме большого усилителя.

**Я. Б. Данциг** защитил 30 июня 1952 г. диссертацию на тему «Влияние сопровождающего тока на пропускную способность рабочих сопротивлений современных вентильных разрядников». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и кандидат техн. наук Д. В. Шишман.

Исследовано влияние сопровождающего тока на пропускную способность дисков и процесса их разрушения. Произведено сравнительное исследование пропускной способности дисков при импульсном и сопровождающем токе (в отдельности) и при их совместном воздействии.

**В. Р. Варданян** защитил 30 июня 1952 г. диссертацию на тему «Исследование потерь на корону при коммутационных перенапряжениях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и кандидат физ.-матем. наук В. В. Гей.

Исследованы потери на корону при переходных режимах, подобных возможным коммутационным перенапряжениям, с установлением закономерностей зависимости потерь от напряжения, частоты колебаний, полярности полупериода волн колебаний, геометрических размеров линий и влияния имеющихся троек. Определена емкость коронирующей линии в зависимости от напряжения.

**К. Г. Абрамян** защитил 30 июня 1952 г. диссертацию на тему «Защита контактной сети от токов короткого замыкания». Официальные оппоненты: проф. В. П. Хащинский и кандидат техн. наук Н. Н. Сидоров.

Предложена схема для защиты контактной сети от токов короткого замыкания, реагирующая на приращение тока. На основании теоретического и экспериментального исследований дана методика расчета и выбора отдельных элементов защиты.

**Л. В. Полонская** защитила 8 декабря 1952 г. диссертацию на тему «Применение метода электрических аналогий к исследованию и расчету электромеханических следящих систем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и кандидат техн. наук, доц. Ю. А. Сабинин.

Дана разработка лабораторных моделей, которые могут быть использованы при анализе и синтезе следящих систем определенного типа. Расчетная и экспериментальная работы показали возможность моделирования следящих систем. Дано заключенное решение по конструкции схем моделей.

**И. И. Иванова** защитила 13 апреля 1953 г. диссертацию на тему «Исследование магнитоупругого датчика как преобразователя механической величины в электрическую». Официальные оппоненты: доктор физ.-матем. наук, проф. Б. М. Яновский и кандидат техн. наук, доц. Е. Т. Чернышев.

Дано исследование датчиков с сердечниками из ферромагнитных материалов, магнитные характеристики которых изменяются под влиянием механических напряжений. Установлены: возможные погрешности измерений при применении магнитоупругих датчиков для измерения механических усилий и условия, обеспечивающие оптимальное значение чувствительности, а также условия для уменьшения влияния ряда внешних факторов.

**Н. А. Козырев** защитил 13 апреля 1953 г. диссертацию на тему «Исследование главной изоляции высоковольтных электрических машин». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Т. Ренин и инж. В. Н. Звездкин.

Исследованы электрическая прочность и старение изоляции машин; установлены величины испытательных напряжений. Разработана методика профилактических испытаний изоляции электрических машин по выявлению различных ее дефектов.

**Э. С. Мкртычян** защитил 11 мая 1953 г. диссертацию на тему «Компенсация активных сопротивлений синхронных генераторов вращающимися коллекторными машинами». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Завалишин и кандидат техн. наук, доц. Е. Д. Несговорова.

Рассмотрено теоретически и экспериментально поведение специальных коллекторных машин, применяемых в динамических моделях электрических систем. Исследована работа трехфазных последовательных коллекторных генераторов. Рассмотрены совместно уравнения коллекторного генератора и синхронного генератора.

**В. М. Файницкий** защитил 11 мая 1953 г. диссертацию на тему «Влияние кратковременных перенапряжений на износ изоляции бумажно-масляных конденсаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский и доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов.

Разработаны схема и аппаратура для измерения ионизирующего напряжения, рассмотрен механизм старения конденсаторов в эксплуатации, исследовано влияние различных факторов на старение изоляции конденсаторов.

**Г. С. Кучинский** защитил 25 мая 1953 г. диссертацию на тему «Исследование электрического старения конденсаторной изоляции». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и доктор техн. наук, проф. В. Т. Ренне.

Исследованы электрические характеристики бумажно-масляной изоляции путем осциллографирования тока потерь с целью установления критерия для дальнейшего изучения старения изоляции, установлена зависимость формы тока потерь от напряжения и температуры для секций новых конденсаторов и бывших в длительной эксплуатации. Рассмотрен случай наложения постоянного напряжения на переменное для бумажно-масляной изоляции.

**А. И. Глушко** защитил 28 мая 1953 г. диссертацию на тему «Включение в сеть гидрогенераторов по методу самосинхронизации». Официальные оппоненты: проф. С. В. Усов, кандидат техн. наук, доц. А. И. Важнов и кандидат техн. наук, ст. научный сотрудник И. Д. Урусов.

Проведено теоретическое исследование процесса самосинхронизации гидрогенераторов двух типов: не имеющих и имеющих успокоительную обмотку. Расчетные данные сравнивались с результатами испытаний генераторов на электростанциях Московской и Ленинградской электростанций.

**В. И. Прядилов** защитил 22 июня 1953 г. диссертацию на тему «Разработка, расчет и исследование электрогидравлического двухимпульсного регулятора скорости». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Кантор и доктор техн. наук, доц. Т. Н. Соколов.

Представлена новая схема электрического двухимпульсного регулятора скорости. Работоспособность регулятора доказана теоретическим расчетом и экспериментально на соответствующем макете.

**В. И. Максимова** защитила 22 июня 1953 г. диссертацию на тему «Выбор изоляции для газонаполненных кабелей на напряжение до 35 кв». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Б. М. Тареев и инж. С. С. Калугин.

Работа посвящена выбору изоляции для газонаполненных кабелей на напряжение до 35 кв, надежно работающих на наклонных участках трасс, и исследованию старения выбранной изоляции. Рассмотрены вопросы осушки изоляции и влагопоглощения осущеной изоляции.

**А. В. Корсунцев** защитил 22 июня 1953 г. диссертацию на тему «Токоограничивающие плавкие предохранители для защиты конденсаторных батарей высокого напряжения от повреждений при пробое конденсаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский и кандидат техн. наук, доц. Е. В. Калинин.

Разработана и проверена экспериментально методика расчета защитного действия (амплитуды пропускаемого тока) для токоограничивающего предохранителя любого типа при работе его в схеме конденсаторной батареи. Обоснована методика типовых испытаний.

**Б. Н. Михалев** защитил 2 июля 1953 г. диссертацию на тему «Рациональные решения электрической части водосливных гидроэлектростанций». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский, инж. С. В. Меньшиков и кандидат техн. наук А. Л. Можевитинов.

Определены новые положения, которые вносятся конструкцией совмещенных гидроэлектростанций и современным развитием науки и техники как исходные данные для выполнения электрической части таких сооружений. Даны анализ возможных решений электрической части для каждого типа совмещенных гэс и рациональные решения в отношении выбора схем электрических соединений, компоновки расположения оборудования и конструкции электрической части водосливных гэс. Обобщены полученные результаты для использования их при сооружении многочисленных водосливных гидростанций перспективного плана развития энергетической базы народного хозяйства страны.

**П. В. Новицкий** защитил 2 июля 1953 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование целей электромеханических приборов с индуктивными приемными и преобразователями». Официальные оппоненты: проф. Б. И. Доманский и кандидат техн. наук Д. И. Зорин.

Изучены погрешности при использовании индукционных преобразователей для измерения электрическими методами различных механических величин и установлены пути уменьшения этих погрешностей. Рекомендованы методы расчета и проектирования приборов с индуктивными приемниками, позволяющие снизить погрешность этих приборов до 0,5%.

**А. Н. Сагонян** защитил 2 июля 1953 г. диссертацию на тему «Влияние параметров системы возбуждения на статическую устойчивость синхронного генератора». Официальные оппоненты: проф. С. В. Усов и инж. С. Н. Анисимов.

Дан ряд уточнений в оценке различных новых методов регулирования возбуждения синхронных генераторов, работающих на дальние электропередачи. Указаны некоторые выводы и рекомендации, могущие быть полезными при создании системы возбуждения для генераторов Куйбышевской и других мощных электропередач.

**Я. И. Сенченко** защитил 2 июля 1953 г. диссертацию на тему «Первые электрические станции в Петербурге (станции постоянного тока)». Официальные оппоненты: проф. С. В. Усов и кандидат техн. наук, доц. Н. Н. Аверьянов.

Показано постепенное совершенствование технических характеристик электрических станций, приведены сравнительные данные по русским и зарубежным станциям.

**В. М. Нашатырь** защитил 21 декабря 1953 г. диссертацию на тему «Исследование двухчастотного колебательного контура со сдвигом тока повышенной частоты для испытания высоковольтных выключателей на отключающую способность». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Б. Романовский и кандидат техн. наук Н. М. Чернышев.

Дан анализ схемы, которая развивает идею Горева о колебательном контуре и Каплана о совмещении в схеме Горева основной и повышенной частот,— схем двухча-

стотного колебательного контура со сдвигом тока повышенной частоты.

**К. Апетрей** защитил 21 декабря 1953 г. диссертацию на тему «Автоматическое регулирование напряжения и скорости вращения гидроагрегатов малых и средних мощностей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и кандидат техн. наук И. Д. Урусов.

Даны критерий оценки качества работы системы регулирования генераторов при включении асинхронных двигателей равной мощности генераторов, практические рекомендации по выбору наиболее совершенных схем регулирования скорости и напряжения маломощных гидрогенераторов.

**С. Кэлин** защитил 21 декабря 1953 г. диссертацию на тему: «Увеличение регулировочного диапазона для автоматического регулирования частоты в энергосистемах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский и кандидат техн. наук, доц. В. А. Романов.

Дан анализ существующих методов регулирования частоты и разработаны некоторые оригинальные предложения, касающиеся связи между регулятором частоты и регулятором скорости. Рассмотрена устойчивость регулирования частоты в специфических условиях — при связи поршня масляного двигателя регулятора скорости и электрической схемы регулятора частоты. Предложена схема регулирования частоты в сложной энергосистеме.

**М. Санд** защитил 21 декабря 1953 г. диссертацию на тему «Тепловые параметры тяговых электродвигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Г. Алексеев, кандидат техн. наук, доц. О. Н. Штерцер.

Изложены общие теоретические основы процессов нагревания и охлаждения электрических машин. Предлагаемая методика расчета кривых нагревания для разных токов нагрузки и распределения температур при установившемся режиме проверялась на опыте с трамвайным тяговым электродвигателем.

**Б. Ф. Розенберг** защитил 15 февраля 1954 г. диссертацию на тему «Исследование трехфазного индукционного двигателя двойного питания при изменении напряжения на его зажимах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Завалишин и кандидат техн. наук, доц. А. И. Важнов.

Проведены рассмотрение и анализ работы двигателя двойного питания (ддп) при учете насыщения его магнитной системы. Исследовано влияние изменения индуктивностей на электромагнитную и синхронизирующую мощности ддп, степени насыщения и изменения параметров обмоток на величины коэффициентов демпферного и синхронизирующего моментов при качаниях двигателя с целью определения путей уменьшения «отрицательности» демпферной характеристики и получения устойчивой работы ддп.

**А. Н. Семиков** защитил 15 февраля 1954 г. диссертацию на тему «Применение поперечного насыщенного реактора для увеличения пропускной способности дальних электропередач». Официальные оппоненты: проф. С. В. Усов и кандидат техн. наук, доц. О. В. Щербачев.

Рассмотрена поперечная компенсация емкости линии при помощи реактора с насыщенным сердечником, определены оптимальные условия применения такого реактора и исследуется его влияние на увеличение допустимых углов и статического предела. Выяснены практические возможности изготовления насыщенного реактора и выполнена экспериментальная проверка полученных результатов.

**В. М. Юринов** защитил 15 февраля 1954 г. диссертацию на тему «Электродвижущие силы и токи небаланса трансформатора тока нулевой последовательности». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и кандидат техн. наук, доц. Г. А. Куеков.

Даны анализ причин появления э. д. с. и токов небаланса, методика инженерных расчетов э. д. с. и тока небаланса и найдены практические пути их уменьшения.

**В. А. Хоберг** защитила 8 марта 1954 г. диссертацию на тему «Исследование импульсной прочности комбинированной изоляции линий передачи на деревянных опорах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Бургдорф и кандидат техн. наук Д. В. Шишман.

Проведено исследование импульсной прочности дерева, комбинированной изоляции «гирлянда — траверза — гирлянда» и «воздушный промежуток — дерево», произведена оценка распределения напряжения по элементам комбинированной изоляции.

**И. А. Груздев** защитил 8 марта 1954 г. диссертацию на тему «Резонансные перенапряжения на линиях электропередачи при несимметричных коротких замыканиях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Миролюбов и кандидат техн. наук, доц. А. И. Важнов.

Рассмотрены резонансы высших гармонических в здравых и аварийных фазах при различных видах несимметричных к. з. Данна методика определения условий резонанса высших гармонических и расчета резонансных перенапряжений. На электродинамической модели электропередачи проведено экспериментальное исследование резонансных перенапряжений. Выявлены резонансы, приводящие к наиболее опасным перенапряжениям в электропередаче.

**В. В. Сидельников** защитил 12 апреля 1954 г. диссертацию на тему «Использование высоковольт-

ных кабелей с отдельно освинцованными жилами для передачи сигналов токами высокой частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и доктор техн. наук, доц. М. В. Костенко.

Рассмотрены общие условия и возможности высокочастотных передач по кабелям высокого напряжения с отдельно освинцованными жилами и произведен анализ влияния на высокочастотную передачу особенностей этих кабелей — многопроволочной витой жилы, наличия изоляции с большими диэлектрическими потерями, наличия металлических или полупроводящих экранов и наличия свинцовой оболочки.

**П. Д. Пресняков** защитил 12 апреля 1954 г. диссертацию на тему «Георетическое и экспериментальное исследование основных элементов и погрешности новой телеметрической системы». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Каплянский и кандидат техн. наук, доц. В. В. Ковалевская.

Исследованы вопросы, связанные с применением нулевого метода в частотных телеметрических системах переменного тока и свойства основных элементов и погрешности новой телеметрической системы. Разработаны основные узлы дальней частотной телеметрической системы.

*Доцент А. С. Сергеев*

### С. О. МАЙЗЕЛЬ



Сергей Осипович Майзель родился 25 декабря 1882 г. в Петербурге. В 1900 г., после окончания с золотой медалью 2-й Петербургской гимназии, С. О. Майзель поступил на Физико-математический факультет Петербургского университета.

Будучи студентом третьего курса, С. О. Майзель опубликовал свою первую научную работу «Определение скорости света при помощи поющей вольтовой дуги и связанные с этим вопросы». Вскоре С. О. Майзель опубликовал вторую работу, выполненную им по теории поющей электрической дуги. Обе эти работы были отмечены премией в память 1-го съезда естествоиспытателей и врачей. Результаты этих работ были впоследствии развиты автором применительно к решению задач беспроводной связи.

К рассматриваемому периоду (1904—1905 гг.) относится привлечение С. О. Майзеля к работе в редакции журнала «Электричество» в качестве секретаря редакции. Тогда же началась и педагогическая деятельность С. О. Майзеля в Кронштадтском офицерском артиллерийском классе. Наиболее полно педагогическая деятельность С. О. Майзеля развернулась позже в Горном институте. С кафедр Горного института, Высших женских курсов, Ленинградского политехнического института, Московского энергетического института, Московского государственного университета студенты слушали прекрасные по технике лекционного мастерства, глубокие по содержанию и неизменно оригинальные по трактовке излагаемого вопроса лекции проф. С. О. Майзеля.

Научная и педагогическая деятельность С. О. Майзеля получила полный расцвет после Великой Октябрьской социалистической революции. Много сил и энергии отдал С. О. Майзель работе в Государственном оптическом институте им. Вавилова, в котором им был создан фотометрический отдел и была воспитана ленинградская светотехническая школа, завоевавшая по праву заслуженный авторитет среди советских светотехников.

С 1930 г. С. О. Майзелю было поручено научное руководство светотехническим отделом Всесоюзного электротехнического института имени Ленина (ныне этот отдел преобразован в Научно-исследовательский светотехнический институт Министерства электротехнической промышленности). Лично С. О. Майзелем и под непосредственным его руководством были выполнены большие исследовательские работы в различных областях светотехники, к числу которых в первую очередь следует отнести: физические основы построения системы световых величин, основы современной колориметрии, вопросы световой маскировки, методы световых измерений в переходной области и др. Последние годы С. О. Майзель успешно работал над созданием физической теории зрительного процесса. Умер С. О. Майзель 5 июля 1955 г.

Отличительной чертой всей научной деятельности С. О. Майзеля являлась неразрывная связь с практикой. Много творческой энергии вложено С. О. Майзелем в решение вопросов освещения Ленинградского Эрмитажа, станций Московского метрополитена, Московского стадиона «Динамо» и других архитектурных сооружений. Являясь талантливым популяризатором научных знаний, С. О. Майзель принимал активное участие в работе Общества по распространению политических и научных знаний.

Советское правительство высоко оценило заслуги С. О. Майзеля, присвоив ему почетные звания заслуженного деятеля науки и техники и лауреата Сталинской премии и наградив его двумя орденами Ленина.

Светлый образ проф. С. О. Майзеля, передового советского ученого, коммуниста, навсегда сохранится в памяти советской электротехнической общественности.

*М. А. Шателен, В. В. Мешков,  
Г. Н. Петров, А. С. Киселев,  
Л. Д. Белькинд и др.*

## В. Н. АКИМОВ

24 марта 1955 г. скончался В. Н. Акимов — талантливый инженер и педагог.

Валентин Николаевич Акимов родился в 1903 г. Инженерную деятельность он начал в 1931 г. по окончании Московского энергетического института им. Молотова, где затем он был доцентом на кафедре «Электрооборудование самолетов и автомашин» до самого последнего времени. Благодаря своему творческому отношению к научно-исследовательской инженерной и педагогической работе В. Н. Акимов стал одним из крупных специалистов Советского Союза по электрооборудованию самолетов, танков, автомобилей, автобусов, тракторов и мотоциклов.

При участии В. Н. Акимова и под его руководством созданы новые, оригинальные конструкции электрооборудования, внедренные в массовое производство и хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации. Под непосредственным руководством В. Н. Акимова было разработано и внедрено в массовое производство новое электрооборудование автомобиля «Москвич» и малогабаритные реле-регуляторы, обладающие большой износостойчивостью и высокими эксплуатационными качествами.

Работы В. Н. Акимова оказали влияние на создание нового направления в развитии электрооборудования; они открыли широкие перспективы применения переменного тока в автобусном, тракторном и мотоциклетном электрооборудовании. Под руководством В. Н. Акимова были освоены в производстве широко теперь применяющиеся тракторные, мотоциклетные и автобусные генераторы переменного тока.



Разработанный В. Н. Акимовым метод расчета стартеров, а также методика определения потерь в обмотках одноступенчатого вибрационного регулятора напряжения приняты в заводской практике.

В. Н. Акимов был активным общественником и дважды избирался депутатом Московского совета. В 1952 г. он вступил в ряды Коммунистической партии Советского Союза.

В. Н. Акимов вложил много энтузиазма, труда и энергии в дело подготовки многих сотен молодых советских специалистов в Московском энергетическом институте. Содержательные лекции и консультации В. Н. Акимова, будучи блестящими по форме изложения, отличались большой доходчивостью. В. Н. Акимов создал новую дисциплину: «Технология производства ЭСА» и разделы расчетного курса — в части проектирования электрических систем запуска и реле-регуляторов.

В. Н. Акимову как автору принадлежат ценные печатные работы.

За изобретения в области бронетанкового электрооборудования В. Н. Акимов был премирован. За выдающиеся достижения в области электрооборудования дизелей и танков Правительство наградило В. Н. Акимова орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и медалями.

*А. Н. Ларионов, М. А. Бабиков, А. И. Ванеев,  
А. А. Житков, В. П. Копылов, М. Ф. Третьяков,  
Ф. Ф. Галтеев*



## Библиография

**М. П. КУТИЛОВСКИЙ и В. Д. СУРГУЧЕВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА  
НА ГОРОДСКОМ ТРАНСПОРТЕ. 356 стр., ц. 9 руб. 35 коп. Изд. МКХ  
РСФСР; Б. Т. КУЗНЕЦОВ. ТЯГОВЫЕ СЕТИ ТРАМВАЯ и ТРОЛЛЕИБУСА.  
312 стр., ц. 8 руб. 60 коп. Изд. МКХ РСФСР.**

Техническая литература, относящаяся к городскому электрическому транспорту, еще не удовлетворяет имеющимся потребности. Поэтому выход в свет новых книг по городскому электрическому транспорту можно только приветствовать. Первая из рассматриваемых книг освещает комплекс вопросов по теории и расчетам городского наземного электрического транспорта; особое внимание в ней уделено обоснованию выбора типов, характеристик и мощностей тяговых электродвигателей, анализу процессов пуска и торможения подвижного состава и построению кривых движения. Вторая книга посвящена тяговым сетям и логически дополняет первую; в ней рассматриваются специальные вопросы расчетов, оборудования и эксплуатации контактных и кабельных сетей городского электрического транспорта.

Обе книги допущены Главным управлением учебными заведениями Министерства коммунального хозяйства РСФСР в качестве учебников для учащихся электромеханических техникумов.

Учебник по электрической тяге состоит из восьми глав и иллюстрирован схемами и графиками (187 рисунков и

13 таблиц). В приложении даны выдержки из ГОСТ 2582-50 по предельно допускаемому нагреву тягового электродвигателя.

Учебник по тяговым сетям состоит из четырех разделов, подразделенных на 14 глав; книга иллюстрирована 190 рисунками и 43 таблицами.

Расчеты и указания в обеих книгах доведены до конкретных численных примеров.

В книге М. П. Кутыловского и В. Д. Сургучева достаточно подробно разобраны теория вопроса, особенности тяговых расчетов и даны практические примеры характеристик тяговых электродвигателей различных систем возбуждения. Весьма подробно разработан важный вопрос по аналитическому определению расхода электроэнергии. С методической точки зрения материал в рецензируемой книге в целом изложен правильно; спорным является, однако, рассмотрение характеристик тяговых электродвигателей до вопросов пуска и регулирования скорости поезда. Определение мощности тягового электродвигателя (гл. VIII) должно было следовать за гл. III, рассматривающей характеристики тяговых электродвигателей. Вызывает недо-

умение отсутствие в книге вопросов электроснабжения. Объем приведенных в книге расчетов явно завышен для техникумов. Без ущерба для усвоения почти все расчеты могли бы быть значительно сокращены. В гл. VIII авторы пытаются дать универсальное выражение для определения потребной мощности тягового электродвигателя; в результате получились весьма громоздкие формулы, превращающие процесс расчетов в механическое подставление в формулы исходных параметров. Ограничение при выборе мощности тягового электродвигателя проверкой нагрева без оценки коммутационной стойкости, часто определяющей эксплуатационные предельные нагрузки, нецелесообразно. В книге ничего не говорится о перспективах высокочастотного транспорта. Упоминание же об электродвигателе О. В. Бенедикта, никогда не предназначавшемся для городского электротранспорта и с 1932 г. не вышедшем из стадии лабораторных исследований, конечно, излишне. При рассмотрении вопроса выбора вида транспорта (§ 4, гл. I) авторы распределяют пассажиропотоки на большие, средние и малые, не приводя необходимых в этом случае укрупненных цифровых показателей.

В разделе, посвященном электрической тяге в системе городского электротранспорта, авторы указывают (стр. 17) как на недостаток электромобильного транспорта на малую скорость движения (15...18 км/час) и незначительный радиус действия экипажа. Однако известен опыт эксплуатации отечественных электромобилей ЛАЗ-НАМИ на Ленинградском почтамте; скорость движения электромобилей там составляла примерно 30...40 км/час, а пробег на одну зарядку достигал 100 км. Электромобилю могут быть отведены вполне определенные области эксплуатации в системе коммунального хозяйства, что не указывается авторами.

В книге отсутствуют указания по контролю удельного расхода электроэнергии, в частности не анализируется опыт московской системы электроснабжения городского электротранспорта. Ничего не говорится о применении индивидуального учета электроэнергии на подвижном составе городского электротранспорта.

Существенным недостатком книги является то, что авторы не отразили в ней основных достижений новаторов-водителей, например новый метод ведения подвижного состава по маршрутным графикам, предложенный водителем Свердловского трамвая Б. П. Крутовым.

В рецензируемой книге имеются также мелкие недостатки. Например, указанные на стр. 16 скорости движения трамвая 14...18 км/час и автобуса 18...22 км/час являются эксплуатационными скоростями, а не скоростями движения. По мнению авторов, наличие двухполюсного токосъема обуславливает снижение скорости движения троллейбуса на спецчастях контактной сети. Это недостаточно точно, так как современные токоприемники троллейбусов (например, конструкции инж. А. М. Земского) могут надежно работать на спецчастях контактной сети и без снижения скорости.

В книге имеются неудачные термины, выражения и выводы, например на стр. 23: «обмоторенные колеса». Нечетко дано определение ходовой скорости на стр. 52. К числу неудачных выражений следует отнести: «общее

сопротивление двигателя» (стр. 105), где речь идет об омическом сопротивлении обмоток тягового электродвигателя; «пуск и разгон поезда под сопротивлениями» (стр. 115); «электромагнитный башмак» (стр. 223). Удачные сравнительные характеристики тяговых двигателей различных систем возбуждения (рис. 23, стр. 60) теряют свою познавательную ценность из-за отсутствия фактических или относительных параметров на осях координат. Этим же страдают и другие рисунки, например 21, 22, 26...30, 33...35, 64, 80, 83 и 85. Неверно указано в подписи к рис. 122 на стр. 220 «рекуперативное торможение с аккумуляторной батареей в качестве возбудителя». Во-первых, здесь идет речь о подпитке обмоток возбуждения при рекуперации, а, во-вторых, аккумуляторную батарею не следует именовать возбудителем. Представленный на рис. 87 (стр. 174) клещевой тормоз устарел; он применялся в 1936 г. на незащищенных в настоящее время троллейбусах типа ЯТБ-1.

Переходя к оценке книги Б. Т. Кузнецова, следует прежде всего отметить, что автор сумел охватить основные вопросы тяговых сетей городского электротранспорта. Книга отличается конкретностью материала, базирующегося на последних достижениях отечественной техники. Книга использует богатый опыт столичного электротранспорта и в известной мере обобщает личный опыт работы автора в данной области. Важным является введение в книгу сведений о трехпроводной системе электроснабжения городского электротранспорта. Методическое построение материала в книге в основном правильное.

При рассмотрении в гл. II оборудования контактной сети автор ничего не говорит о возможностях применения биметаллических, алюминиевых и стальных контактных проводов. Недостаточно конкретно изложен раздел «Радиопомехи в контактной сети и защита от них» (§ 42, стр. 93). Характеристика интенсивности помех: «эти помехи сильнее и систематичнее помех, вызываемых атмосферными разрядами» — неверна и неопределенна. При оценке эффективности применения угольно-графитовых контактных вставок следовало дать конкретные показатели, например базирующиеся на результатах исследований Академии коммунального хозяйства и ЦЛИР.

В гл. XII автор приводит кривые зависимости эксплуатационных расходов от сечения проводов; эти кривые теряют свою практическую ценность ввиду отсутствия конкретных параметров и малого масштаба изображения.

В качестве общего недостатка рассмотренных книг можно указать на то, что в них ничего не сообщается о современном состоянии и достижениях в области городского электрического транспорта за рубежом.

Обе рассмотренные книги благодаря содержащимся в них практическим и справочным данным могут быть использованы, помимо их основного назначения, в качестве пособий для студентов вузов, специализирующихся в области городского электрического транспорта, а также для инженеров-проектировщиков, производственников и эксплуатационников, работающих на городском электротранспорте.

Кандидат техн. наук Ю. М. Галонен  
Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

**ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ. ТРУДЫ. ДОКУМЕНТЫ. МАТЕРИАЛЫ.**  
Составитель проф. Л. Д. Белькинд. Отв. редактор член-корр. АН СССР М. А. Шателен.  
463 стр., ц. 29 руб. 50 коп. Издательство Академии наук СССР.

На Академию наук СССР одним из пунктов постановления Совета Министров Союза ССР об увековечении памяти П. Н. Яблочкива возлагалось издание трудов, важнейших патентов, документов и других материалов, характеризующих творчество П. Н. Яблочкива.

Это задание выполнено. Советские электротехники получили любовно и с большим знанием дела собранный, хорошо проанализированный и прекрасно изданный том трудов, документов и материалов, раскрывающих подлинный вклад, внесенный П. Н. Яблочкивым в науку об электричестве и его применении в последней четверти XIX в.

О трудах и жизни П. Н. Яблочкива имеется обширная литература. В библиографическом указателе, изданном

в 1949 г. библиотекой им. Салтыкова-Щедрина в Ленинграде, описано 828 названий. Однако ряд патентов, писем и документов П. Н. Яблочкива не был учтен и опубликован. Большой заслугой составителя тома, известного исследователя творчества П. Н. Яблочкива, проф. Л. Д. Белькинда является то, что ему в результате многолетней кропотливой работы в архивах, частных библиотеках и по изданиям патентных ведомств различных стран удалось выявить и подготовить к изданию все наиболее важные патентные заявки, письма и другие материалы замечательного изобретателя иченого.

Рецензируемая книга дает в руки исследователей и всех интересующихся историей науки и техники разнообразные документальные материалы, раскрывающие бога-

тейшее научное наследие П. Н. Яблочкива и ярко свидетельствующие о громадном влиянии творчества ученого и изобретателя на развитие электротехники.

Книга состоит из шести разделов. В первый раздел (стр. 5..58) включены 18 статей, докладов и писем П. Н. Яблочкива. Сюда наряду с известными работами ученого: «Новая электрическая лампа», «Деление электрического света», «Об электрическом освещении», «О новом типе гальванической батареи», «О новом элементе под названием «автоаккумулятор» и др. включены его письма Русскому физическому обществу, проф. Н. Г. Егорову, два письма в редакцию «Correspondance Scientifique», письмо, написанное совместно с В. Н. Чиколевым в редакцию газеты «Новое время» и др.

В этом же разделе впервые печатается автобиографическое письмо П. Н. Яблочкива с приложенным к нему протоколом, в котором изобретатель высказывает ранее неизвестные соображения о способах передачи электрической энергии на расстояние переменным током высокого напряжения. В данном вопросе П. Н. Яблочкив «более глубоко и правильно разобрался... чем многочисленные его современники» (стр. 52).

Во второй раздел (стр. 59..184) включены патенты и привилегии на изобретения П. Н. Яблочкива, взятые из официальных изданий, опубликованных патентными ведомствами в России, Франции, Германии и Англии. Здесь публикуются полные тексты 66 патентных документов. Этим количеством не исчерпываются все патенты, полученные П. Н. Яблочкивым.

Дальнейшие поиски в этом направлении должны быть продолжены. Из публикуемых патентов большой интерес представляют патенты: «на электрическую лампу» (1876 г.) с шестью дополнениями (1876—1879 гг.), «на распределение токов, предназначенных для освещения электрическим светом» (1876 г.) с двумя дополнениями (1877 г.), «на магнито-электрическую машину переменных токов» (1876 г.), «на усовершенствование электрического света» (1877 г.), «на усовершенствованный аппарат для генерирования электричества и двигательной силы» (1877 г.), «на усовершенствования в электрических лампах и в относящихся к ним устройствах для деления и распределения электрического света» (1877 г.), «на новый способ производства и деления электрического света и на аппаратуру для него» (1877 г.), «на электрохимический элемент без жидкости» (1882 г.), «на автоаккумулятор» (1884 г.) и «на автоаккумуляторную гальваническую батарею» (1892 г.) и др.

Большая часть опубликованных в рассматриваемом издании патентов не была известна исследователям творчества П. Н. Яблочкива. Патенты, полученные за границей, впервые публикуются на русском языке.

В третьем разделе (стр. 185..286) опубликованы 45 технических заметок и статей, характеризующих работы П. Н. Яблочкива на различных этапах его деятельности. Сюда же включены ценные высказывания современников изобретателя об электрическом освещении по системе П. Н. Яблочкива в России и других странах. Актуальность творчества П. Н. Яблочкива вызвала большое число статей<sup>1</sup>, посвященных внедрению в технику его

<sup>1</sup> Д. А. Лачинова, В. Н. Чиколева, Е. П. Тверетинова, С. Стрига, Ж. Дюмона, Л. Бобенрита и др.

выдающихся изобретений в области электротехники (электрическая свеча, трансформатор, генератор переменного тока и др.).

В четвертом разделе (стр. 287..300) впервые публикуются девять ценных биографических документов: послужной список, свидетельство о рождении, уведомление об избрании П. Н. Яблочкива членом различных научных и технических обществ и др. Часть этих документов печатается по подлинникам, хранящимся в личном архиве нашего старейшего электротехника М. А. Шателена.

Пятый раздел (стр. 301..338) включает переписку разных лиц, некрологи и мемуарные материалы о П. Н. Яблочкиве, существенно дополняющие ценными данными творческий облик великого изобретателя. Большой интерес представляют воспоминания В. Н. Чиколева, Н. П. Петрова, К. Д. Перского и К. А. Чернышева.

Особого внимания заслуживают впервые публикуемые воспоминания жены изобретателя М. Н. Яблочкивой и его племянника Н. М. Эшлимана.

В заключительном, шестом, разделе (стр. 337..426) помещены: подробный биографический очерк о П. Н. Яблочкиве, написанный Л. Д. Белькиндом, и статьи: М. А. Шателена «Работы П. Н. Яблочкива в области электрического освещения и распределения электрической энергии», Ю. С. Чечета «Электрические машины П. Н. Яблочкива» и А. Н. Фрумкина «Работы П. Н. Яблочкива по химическим источникам тока». Содержание этих статей свидетельствует о том, что некоторые идеи, выдвинутые П. Н. Яблочкивым имеют не только исторический интерес, но и сохранили практическое значение для современной науки и техники. К ним относятся идеи П. Н. Яблочкива об использовании газов под давлением для повышения эффективности газовых электродов, о введении в угольный электрод соединений переменной валентности, могущих служить переносчиками кислорода в элементах.

В качестве приложения даны хронологический указатель и библиография (106 названий) основных работ отечественных и зарубежных ученых, анализирующих творчество П. Н. Яблочкива.

Рецензируемая книга с большой убедительностью свидетельствует о значении вклада П. Н. Яблочкива в развитие техники.

Всю деятельность П. Н. Яблочкива характеризует смелое творческое дерзание и целеустремленность. Он никогда не останавливался на достигнутом. До последних дней своей жизни он творил и создавал новое.

«Могучие способности и творческое горение Яблочкива, — пишет составитель тома Л. Д. Белькинд, — не могли полностью развернуться в обстановке капитализма. Но ознакомление с трудами Яблочкива показывает, что даже в этих тяжелых условиях изобретатель сделал неоцененный вклад в сокровищницу мировой науки и техники» (стр. 392).

Рецензируемая книга, являясь итогом многолетней плодотворной работы ее составителя, может служить образцом для подобного рода изданий.

**Кандидаты физ.-матем. наук В. Н. Голоушкин и А. А. Елисеев**

Ленинград

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**К. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,  
Н. Г. Дроздов (главный редактор), Е. Г. Комар, М. П. Костенко,  
И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), А. М. Федосеев,  
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен**

## МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ К. П. Д. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Исходя из общих уравнений четырехполюсника:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (A_1 + jA_2) \dot{U}_2 + (B_1 + jB_2) I_2; \\ I_1 &= (C_1 + jC_2) \dot{U}_2 + (D_1 + jD_2) I_2, \end{aligned}$$

автор показывает, что к. п. д. четырехполюсника выражается такой формулой, которая в комплексной плоскости сопротивления нагрузки соответствует уравнению окружности, содержащему  $\eta$  в качестве параметра.

Центры семейства окружностей  $\eta$  лежат на прямой, параллельной оси активных сопротивлений и имеющей ординату

$$X_0 = \frac{(AD^* - BC^*)_u}{2(AC^*)_d},$$

## РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ МАГНИТОУПРУГИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

При магнитоупругих измерениях в массивных ферромагнитных телах применяется сосредоточенный подвод переменного тока. В статье решается задача поверхности распределения электромагнитного поля при втекании переменного тока в массивное проводящее тело через один или несколько проводников, направленных перпендикулярно к его поверхности. Магнитная проницаемость и удельная электропроводность приняты постоянными.

Для случая единственного контакта рассматривается способ расчета падения напряжения на поверхности с учетом нелинейности зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. Этот способ основан на замене кривой зависимости сопротивления стального проводника от переменного тока при

## ВЗАИМНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В ЗЕМЛЕ

В работе путем некоторого видоизменения формул Карсона получены приближенные аналитические выражения для сопротивления, вносимого землей вследствие ее конечной проводимости. Эти выражения справедливы при частотах от 50 Гц до 250 кГц и удельном сопротивлении земли до 1 000 ом·м. Погрешности при использовании этими выражениями по сравнению с рядами и кривыми Карсона не превосходят 6% для вещественной или минимум части и 4% — для модуля вносимого землей сопротивления. На основе этих выражений получены приближенные расчетные формулы для взаимного сопротивления  $Z_{12} = r + jx$  между однопроводными и наиболее характерными многопроводными линиями при параллельном и косом сближении и пересечении.

## УЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕТЛИ ФАЗА — НУЛЬ

Рассматривается вопрос о влиянии активных и реактивных сопротивлений трансформаторов мощностью до 1 000 кВА со вторичным напряжением 380/220 и 220/127 в, со схемой соединений звезда—звезда с заземленной нейтралью на сопротивление петли фаза—нуль и тем самым на ток однофазного замыкания. Вопрос имеет существенное значение при испытаниях систем зануления для проверки выполнения занулениями своей основной задачи — отключения аварийного участка.

В статье приводится методика расчетов тока однофазного замыкания с учетом сопротивлений трансформаторов и данные об этих сопротивлениях. Показывается на примерах, что расчеты токов однофазного замыкания без учета сопротивлений трансформаторов при мощности их до 560 кВА дают существенно завышенные результаты.

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СЕТИ АНГЛИИ

В условиях Англии перевозки угля обходятся во всех случаях дороже электропередачи больших мощностей. В связи с этим принято решение развивать строительство крупных тепловых электростанций в угольных районах Мидленда и Иоркшира и передавать их энергию по линиям 275/300 кВ в потребляющие районы. Средняя мощность вновь взводимых агрегатов достигнет к 1959 г. 85 МВт против 38 МВт за 1946—1951 гг.

К 1960 г. предполагается соорудить 4 000 км цепей 275/300 кВ, из которых 50% уже строятся. Большинство линий — двухцепные с расщепленными сталеалюминиевыми проводами сечением (по алюминию)  $2 \times 420 \text{ мм}^2$ . По габаритам и сечению проводов эти линии допускают перевод в будущем на 380 кВ после разработки изоляторов, пригодных для работы при этом напряжении в условиях особо сильного загрязнения.

## СООРУЖЕНИЕ ЛИНИЙ 287 И 345 кВ В БОННЕВИЛЬСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

В настоящее время  $2/3$  энергии гидростанций в Бонневильской энергосистеме передается на тихоокеанское побережье США по девяти цепям 230 кВ, пересекающим Каскадные горы. С вводом ряда новых гидростанций пропускная способность этих линий станет недостаточной. На основании экономического сравнения четырех напряжений — 230, 287, 345 и 400 кВ — принято решение соорудить для выпуска мощности новых станций Мак Нери, Чиф Джозеф и Дэллес Дэм четыре цепи 345 кВ длиной 175...280 км. Часть линий будет первоначально работать при 230 кВ. Кроме того, будут переведены на 287 кВ две цепи 230 кВ, допускающие такой перевод по габаритам и диаметру провода.

Линии 287 и 345 кВ не образуют замкнутой сети сверхвысокого напряжения; они накладываются на сущ-

## МЕТОД ЛОКАЦИИ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ПЕРЕКРЫТИЙ В КАБЕЛЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В муфтах высоковольтных кабелей в результате коротких замыканий или замыканий на землю иногда возникают перемежающиеся перекрытия, местоположение которых нельзя определить ни «классическими», ни более современными методами: импульсным или высокочастотным (резонансным).

Для локации таких перекрытий разработаны два способа: метод наложения импульсов и метод саморазряда. Первый основан на принципе посылки в кабель импульсной (блуждающей) волны высокого напряжения, вызывающей перекрытие в месте повреждения. Расстояние до места повреждения определяется временем пробега прямой и отраженной волн путем измерения заряда конденсатора. Второй метод основан

## РАЗРАБОТКА РЕСУРСОВ ВОДНОЙ ЭНЕРГИИ В ЮГОСЛАВИИ

План использования ресурсов водной энергии Югославии предусматривает сооружение пяти мощных гидроэлектростанций и сетей 220 и 380 кВ, предназначенных для связи гидростанций и передачи вырабатываемой электрической энергии в Италию, Австрию и Западную Германию. Выполнение этого плана потребует затраты 309 млн. долларов на сооружение гидростанций и 110 млн. долларов на строительство линий электропередачи. Предполагается, что передача электрической энергии из Югославии составит в 1956 г. 400 млн. кВт·ч, а в 1970 г. увеличится до 4 300 млн. кВт·ч. Большая часть энергии должна передаваться в зимнее время. Первой из проектируемых станций будет введена в эксплуатацию сооружаемая в настоящее время гидростанция Перуница на р. Зета. Мощность этой станции в 1957 г. составит 94 тыс. кВт и в 1958 г. — 171 тыс. кВт. В 1961 г. должна войти в строй подземная

нения. На окраинных участках сети (Шотландия, Уэльс) проектируются линии с проводами  $2 \times 185 \text{ мм}^2$  и уменьшенными габаритами, не допускающие перевода на более высокое напряжение.

После сооружения сети 275/300 кв сеть 132 кв будет разбита на семь участков, связанных между собой только через линии 275 кв и автотрансформаторы 275/132 кв.

В сети 132 кв все шире применяются упрощенные подстанции. Подстанции с двумя трансформаторами и двумя линиями 132 кв оборудуются одним выключателем 132 кв, включенным в рассечку между обоими трансформаторами, или же тремя выключателями по схеме неполного квадрата; четвертую сторону квадрата образует разъединитель. Подстанции с четырьмя линиями 132 кв коммутируются по схеме шестиугольника.

Tr. AIEE, т. 73, ч. III-B, стр. 1223, 1954. (Э-во, 10, 1955)

ществующую сеть 230 кв и соединяются с ней через автотрансформаторы  $3 \times 80$  и  $3 \times 120 \text{ мвт}$  на обоих концах. Применена схема блока автотрансформаторов — линия без выключателей на стороне 287...345 кв с общим разъединителем параллельно автотрансформатору.

Для линий 345 кв принятые нерасщепленные сталеалюминиевые провода диаметром 41 мм. Расщепление проводов отложено в связи с трудностью плавления гололеда, а также во избежание чрезмерного утяжеления двухцепных опор. Линии защищаются тросом только на подходах к подстанциям. Устойчивость системы при грозовых отключениях обеспечивается быстродействующим АПВ.

Tr. AIEE, т. 73, ч. III-B, стр. 1230, 1954. (Э-во, 10, 1955)

на принципе, что ближайшая волна, возникающая при перекрытии, непосредственно используется для измерений. В этом случае расстояние до места повреждения определяется по разности времен прохождения ближайшей волны, возникающей в месте перекрытия, в двух направлениях: левом (прямом) и правом (через петлю). Преимущество этого метода состоит в том, что емкость конденсаторов связи может быть выбрана значительно меньшей, чем при первом методе. Уточнение местоположения перекрытия может быть дополнительно произведено вдоль трассы кабеля с поверхности земли акустическимискателем, состоящим из усилителя низкой частоты большой чувствительности, микрофона и головного телефона. Точность измерений на практике оказалась удовлетворительной.

ETZ-A, стр. 225, № 6, 1955. (Э-во, 10, 1955)

гидростанция на р. Цетина, оборудуемая четырьмя агрегатами общей мощностью 530 тыс. квт. Гидростанция Сень, использующая энергию рр. Лика и Гацка, оборудуемая четырьмя агрегатами по 68 тыс. квт, также будет сооружена под землей. Строительство этой станции должно быть завершено в 1963 г. В дальнейшем будет сооружена еще одна подземная гидростанция на р. Идрица, севернее Гориции. В завершение плана в южной части Динарских Альп в районе г. Дубровник на р. Требишница будет сооружена гидростанция, на которой будет установлено шесть агрегатов по 113,5 тыс. квт.

Engineering, т. 179, стр. 491, № 4656, 1955. (Э-во, 10, 1955)

а квадраты радиусов окружностей определяются из выражения

$$\rho^2 = \left( \frac{1}{\eta} - \frac{1}{\eta_{\max}} \right) \left( \frac{1}{\eta} - \eta_{\max} \right) : 4 (AC^*)_0^2.$$

Окружности нулевого радиуса соответствует максимальное значение к. п. д., вычисляемое по формуле

$$\eta_{\max} = (\sqrt{A_1 D_1 + B_2 C_2} - \sqrt{A_2 D_2 + B_1 C_1})^2.$$

Электричество, № 10, 1955.

равномерном поле на его поверхности отрезками прямых, парабол или гипербол.

Приведен численный пример, в котором некоторый участок кривой сопротивления, полученной опытным путем для конкретного стального проводника, заменен двумя прямыми линиями. Сравнение расчетных данных с результатами непосредственных измерений показывает хорошее совпадение.

Приводятся соображения о выборе значения тока, протекающего через сосредоточенные электроды, при котором проявление магнитоупругого эффекта максимально. Рассматривается соответствующий численный пример.

Электричество, № 10, 1955.

Для расчетов влияния на линии связи и других расчетов, основанных на грубо приближенных исходных данных и не требующих большой точности, в работе получены также упрощенные формулы для модулей взаимных сопротивлений  $|Z_{12}|$ . В этих формулах влияние конечной прозодимости земли учитывается путем введения понятия «уровня нулевого потенциала», который принимается условно на некоторой глубине  $h_0$  под фактической поверхностью земли.

Величина  $h_0$  зависит от геометрических размеров линий, удельного сопротивления земли  $\rho_3$  и частоты  $f$ . Однако в результате ряда сравнительных расчетов удалось выбрать среднее значение  $h_0$ , не зависящее от геометрических размеров линий:  $h_0 = 400 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}}$ .

При этом в большинстве случаев получаются несколько (до 20%), преувеличенные значения модулей  $|Z_{12}|$  по сравнению с формулами и кривыми Карсона.

Электричество, № 10, 1955.

шенные результаты по сравнению со значениями токов, которые можно ожидать в действительности.

В статье дан также приближенный метод определения тока однофазного замыкания, пользуясь которым возможно арифметическое сложение значений сопротивлений петли фаза — нуль ( $Z_n$ ) и сопротивлений трансформатора ( $Z_m$ ) по формуле

$$I_3 = \frac{1,05 U_\phi}{Z_n + Z_m}.$$

Электричество, № 10, 1955.

## СЕТЬ 250 кв в Японии

Недостаточная пропускная способность и большие потери в сети 154 кв в районе г. Осака (Япония) вызвали необходимость введения более высокого напряжения.

Для снижения опасного влияния на линии связи заземление нейтрали электрических сетей в Японии производилось ранее через высокое активное сопротивление или дугогасящие катушки. Поэтому для новой сети первоначально предполагалось принять компенсированную нейтраль и напряжение 230 кв. Однако более целесообразными по условиям гашения дуги при замыканиях на землю и экономически более выгодными оказались глухое заземление нейтрали и напряжение 250 кв.

Первая линия 250 кв длиной 230 км была построена в Японии в 1952 г. На этой линии, состоящей из двух цепей, подвешены стальалюминиевые провода се-

*M. I. Земляной, A. A. Минаев и P. B. Чебышев* 3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Ранее при проведении вентиляционных испытаний гидрогенератора измерение скоростей охлаждающего воздуха в труднодоступных местах внутри машины, как, например, в радиальных каналах статора, в воздушном зазоре, а также во вращающихся частях гидрогенератора — в радиальных каналах ротора, между полюсами и т. д., не производилось. Излагается методика экспериментального исследования вентиляции гидрогенераторов при помощи электротермоанемометра, которая позволяет осуществлять измерения скоростей и температур воздуха в различных сечениях внутри машины, а также измерения скоростей и температур потока в роторе гидрогенераторов. В связи с разработкой электротермоанемометра измерения в труднодоступных каналах с малой площадью проходного сечения выпол-

*V. B. Кулаковский* 3

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Статья посвящена критическому разбору статьи А. К. Ашрятова «О включении трансформаторов без сушки», помещенной в журнале «Электричество», № 9, 1955.

Указывается, что возражения А. К. Ашрятова против новых методов контроля влажности изоляции трансформаторов (емкостных методов и метода абсорбции) необоснованы. В значительной части эти возражения базируются на данных измерений объектов, не идентичных по своим характеристикам трансформатору с увлажняющейся изоляцией. Данные по другим объектам неполные.

Приводятся краткие сведения о применении методов «емкость — частота» и метода абсорбции.

*M. V. Хомяков* 3

## ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ ПО ОЦЕНКЕ ВЛАЖНОСТИ

Рассматриваются методы оценки состояния увлажненности изоляции трансформаторов и возможности ускорения включения в сеть новых трансформаторов.

В энергосистемах о состоянии изоляции трансформаторов судят по комплексу проводимых следующих испытаний и измерений: а) измерению сопротивления изоляции со снятием абсорбционной зависимости при помощи мегомметров и измерению токов утечки на выпрямленном напряжении; б) измерению угла диэлектрических потерь изоляции; в) измерению емкости на двух частотах; г) испытанию масла.

Показана применимость этих методов для выявления увлажненности изоляции трансформаторов.

Объясняются закономерности температурной зависимости диэлектрических потерь изоляции трансформа-

## АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОНИЧЕСКИМ РОТОРОМ

За последние 20 лет получили значительное распространение асинхронные двигатели с коническим ротором и такой же конической расточкой статора. В них ротор жестко связан с диском фрикционного тормоза. При выключении статора ротор под действием находящейся на валу пружины выдвигается из статора и плотно зажимает диски тормоза. При включении статора ротор под действием магнитного поля автоматически втягивается в него и растормаживает двигатель. Основное преимущество такого двигателя — его большая компактность по сравнению с сочетанием асинхронного двигателя с фрикционным тормозом обычной конструкции. Благодаря этому двигатель с коническим ротором успешно применяется во многих видах электропривода, но главным образом в небольших подъем-

*B. A. Gogbill* 3

## ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОЩНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Фирма Джелерал Электрик изготовила два трансформатора для испытания выключателей на разрывную мощность. Приводим их основные данные: мощность короткого замыкания 1 100 мвт (15 замыканий длительностью по 10 периодов), напряжение — до 220 кв. Возможно последовательное включение вторичных обмоток обоих трансформаторов на напряжение до 440 кв (при заземлении средней точки). Напряжение короткого замыкания 7,7% при 220 кв и 3% при 38 кв.

Изоляция линейного конца 220 кв рассчитана на импульсное испытательное напряжение 1 550 кв при волне 2/10 мксек. Соответствующее 1-минутное испытательное напряжение 621 кв. Таким образом, по своей изоляции трансформаторы приближаются к классу 400 кв.

*M. N. Голоднов* 3

## О ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКЕ ПРИ ПУСКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ГЛУХО ПОДКЛЮЧЕННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

Прямой пуск с глухо подключенным возбудителем находит все более широкое применение. Однако до сих пор отсутствуют простые и наглядные методы расчета возможности применения такого пуска.

Действующие циркуляры МЭС № 7/Э 1952 г. и № Э—5/54 1954 г. допускают пуск с глухо подключенным возбудителем при моменте сопротивления не выше 0,4 номинального без проведения предварительных испытаний.

В статье приводится простой инженерный метод приближенного расчета для определения возможности применения пуска синхронных явнополюсных двигателей с глухо подключенным возбудителем. Приводятся

*S. Paganski* 4

## СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С МАЛОЙ ЕМКОСТЬЮ

Обычные селеновые вентили сохраняют свое выпрямляющее действие при частотах до 0,5 мгц. Предельная частота определяется постоянной времени вентиля, равной произведению его сопротивления в прямом направлении на его собственную емкость.

В нормальных условиях постоянная времени вентиля не зависит от площади запирающего слоя. Однако если площадь слоя уменьшается ниже 0,1 м<sup>2</sup>, увеличение сопротивления вентиля происходит медленнее, чем снижение емкости, и постоянная времени падает.

На этом эффекте основана конструкция малогабаритного селенового выпрямителя, в котором один из электродов состоит из множества мельчайших элементарных электродов. Сопротивление выпрямителя в прямом направлении 85 ом, в обратном — до 30 мегаом, емкость 750 пф. Постоянная времени вентиля в 5 раз

ных механизмах, в частности в передвижных электротягах. В статье рассматриваются конструктивная и технологическая стороны таких двигателей. Даются формулы, при помощи которых определяется уменьшение размеров пазов при сборке листов статора и ротора. Описываются также методы производства двигателей с коническим ротором. Выводятся формулы, необходимые для проектирования штампов, применяемых при штамповке листов переменного размера для рассматриваемых двигателей.

Electrotehnika (Бухарест), т. 2, стр. 172, № 5—6, 1954.  
(Э-во, 10, 1955)

чением 520...410 м<sup>2</sup>. Сечение 520 м<sup>2</sup> выбрано для головного участка линии из-за опасения появления заметных радиопомех и потерь на корону при напряжении 275 кв, так как трасса линии проходит на этом участке по горной местности.

На передающем конце линии установлены два трехобмоточных трансформатора мощностью по 70 тыс. ква. Третья обмотка каждого из трансформаторов предназначается для связи с сетью 154 кв.

На приемном конце установлены три трехобмоточных трансформатора мощностью по 90 тыс. ква. Вторичные обмотки трансформаторов присоединены к сети 77 кв.

CIGRE, доклад № 403, 1954. (Э-во, 10, 1955)

Обмотка низшего напряжения (внутренняя) — спиральная без каналов, намотана на незамкнутом стальном цилиндре; обмотка высшего напряжения — слоевая. Слои изолированы друг от друга отбортованными цилиндрами без масляных каналов, что придает обмотке монолитность. На концах каждого слоя установлены опорные стальные кольца. Кроме того, имеются пресущие стальные кольца как для первичной, так и для вторичной обмоток в целом. Подпрессовка обмоток возможна в баке после заливки маслом.

Габарит собранного трансформатора в плане 7,3 × 5,2 м, высота 11 м. Вес выемной части 106 т, общий вес 223 т. Бак транспортируется по частям.

Tr. AIEE, т. 72, ч. III, стр. 81, 1953. (Э-во, 10, 1955)

няются без существенного искажения потока благодаря малому габариту измерительного элемента (насадки).

Даются указания по определению полного расхода воздуха в гидрогенераторе, расхода на вентиляторах, расхода через лобовые части, а также методика измерения поля скоростей внутри радиальных каналов в зоне расположения стержней обмотки и скоростей в воздушном зазоре.

Электричество, № 10, 1955.

результаты расчета характеристик синхронных двигателей: СМ-300-750 217 квт, 6 кв и СМ-160-500 113 квт, 380 в.

Указывается на целесообразность проведения проверки возможности пуска синхронных двигателей с моментом сопротивления, превышающим 0,4 номинального, не только опытным, но и расчетным путем по предлагаемой методике.

Выводы автора, изложенные в конце статьи, подтверждаются рядом опытов, произведенных как автором, так и рядом организаций (ЦНИИЭЛ МЭИ и др.).

Электричество, № 10, 1955.

Затрагивается вопрос о допустимой степени влажности изоляции трансформаторов. А. К. Ашрятов неправильно предлагает практически считать увлажненной такую изоляцию, которая в действительности может длительно работать при данной степени влажности в любых нормальных для нее режимах.

Вопрос о утверждению А. К. Ашрятова, пользование нормами по характеристикам изоляции, предложенными эксплуатирующими организациями МЭС, не могло привести к включению трансформаторов с недопустимо высокой степенью увлажнения изоляции, так как этим нормам удовлетворяют большое число вполне надежно работающих в эксплуатации трансформаторов.

Указывается, что некоторые иностранные фирмы предъявляют весьма несложные требования к включению трансформаторов без сушки, ограничиваясь, главным образом, требованием сохранения герметичности бака.

Электричество, № 10, 1955.

выше обычной. Выпрямляющее действие сохраняется для частот до 2,5 мгц. Селеновые выпрямители с малой емкостью используются в качестве модуляторов в установках высокочастотной связи и высокочастотных измерительных устройствах. Допустимый ток — единицы миллиампер при напряжениях в единицы вольт.

Описаны способы обеспечения стабильных электрических характеристик в малогабаритных селеновых выпрямителях. Максимальная рабочая температура выпрямителя в обычных условиях +70° С, при особо высоких требованиях к стабильности электрических характеристик — не выше 55° С.

AEGM, стр. 257, № 3/4, 1955. (Э-во, 10, 1955)

торов для различных состояний изоляции: сухой, средней увлажненности и сильно увлажненной.

Выводится коэффициент нарастания диэлектрических потерь, как отношение диэлектрических потерь, измеренных при 70° С, к диэлектрическим потерям, измеренным при 20° С.

Опытные данные, полученные в энергосистеме, со-поставляются с нормами, изложенными в различных инструкциях.

Показывается нестабильность некоторых требований завода изготовителя трансформаторов, неточность и недостаточность косвенных методов оценки увлажненности изоляции трансформаторов, рекомендуемых заводом, а также необоснованность требований о необходимости прогрева трансформаторов для оценки возможности включения вновь прибывших на монтажную площадку трансформаторов без сушки.

Электричество, № 10, 1955.

## АВТОМАТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА 440 в НА ТОКИ ДО 15 000 а

Разработана серия однополюсных автоматов на 440 в постоянного тока для токов до 15 ка с электромагнитным или пневматическим приводом. Автоматы на 15 ка предназначены для установок с kontaktными выпрямителями, автоматы на меньшие токи — преимущественно для городских тяговых сетей. В автомате параллельно включен ряд контактных элементов на 1 ка. Дуга, образующаяся при выключении, втягивается под действием магнитного дутья в гасительную камеру с рядом изоляционных перегородок. В камеру встроены перпендикулярно оси дуги, гасящие металлические пластины. В результате дуга сначала удлиняется, затем разделяется на несколько частичных дуг и гасится.

На длинных трамвайных и троллейбусных линиях ток короткого замыкания в конце линии иногда меньше рабочего тока при одновременном запуске нескольки-

## СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для сглаживания выпрямленного тока в шестифазных выпрямителях обычно используются резонансные фильтры, состоящие из катодного реактора и четырех резонансных контуров, настроенных на 300, 600, 900 и 1200 гц. Индуктивность реактора  $L_s$  связана с требуемым коэффициентом сглаживания  $k_n$   $n$ -ной гармоники выражением

$$k_n = \frac{2\pi f n L_s}{r_n},$$

где  $r_n$  — активное сопротивление дросселя в контуре для  $n$ -ной гармоники при частоте  $f n$ .

При частоте 600 гц  $r_n$  превышает сопротивление дросселя постоянному току в 1,6... 1,8 раза, при частоте 1200 гц — в 3,5... 4 раза.

## ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СО СВЕБОДНОЙ СТРУЕЙ И МНОГОКРАТНЫМ РАЗРЫБОМ

Разработана серия воздушных выключателей 15 ати: на 110 кв,  $4 \cdot 10^6$  ква; 220 кв,  $8 \cdot 10^6$  ква и 380 кв,  $12 \cdot 10^6$  ква разрывной мощности. Число видимых разрывов на фазу составляет соответственно 4, 8 и 12.

Каждый полюс выключателя состоит из 2..6 своясных гасительных камер, установленных на полых опорных изоляторах.

Гасительные камеры однотипны для всей серии выключателей. Своясная камера имеет два металлических сопла, два подвижных электрода с вольфрамовыми наконечниками и два неподвижных противовоздушных электрода. Последние отделены от сопел изоляторами, в которые встроены делительные конденсаторы. Изоляторы и камеры неподвижны. При подаче импульса на отключение через полый изолятор подается со сверхзвуковой

## ЗАЩИТА ОТ ПРИКОСНОВЕНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Ограждения, применяемые обычно в высоковольтных лабораториях и испытательных установках для защиты от прикосновения к оборудованию, находящемуся под напряжением, громоздки, неудобны и не обеспечивают надежной защиты.

В лаборатории высокого напряжения фирмы Хенлей (Англия) при испытаниях высоковольтных кабелей устанавливается ограждение из окрашенных яркокрасной краской труб с подвешенными предупредительными табличками. На расстоянии 1 м от ограждения с внутренней стороны устанавливаются по углам смонтированные на специальных подставках проекционные лампы и фотоэлектрические приемники. Каждый приемник состоит из линзы диаметром 7,6 мм, зеркала, фотоэлемента, лампового усилителя и реле.

## НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕРМАНИЕВЫХ ДИОДОВ

Согласно теории вольтамперная характеристика германиевого диода вблизи начала координат должна иметь логарифмический характер. Практически наблюдаемые отклонения можно компенсировать дополнительными сопротивлениями. Логарифмическую вольтамперную характеристику диода можно использовать для получения различных математических зависимостей между напряжением  $x$  на входе и  $y$  на выходе четырехполюсника. Применяя различные сочетания диодов с сопротивлениями и емкостями, можно осуществить зависимости:  $y = \lg x$ ;  $y = x^2$ ;  $y = x^3$ ;  $y = \sqrt{x}$ ;  $y = \sqrt[3]{x}$ ;  $y = \frac{1}{x}$ ;  $y = \operatorname{tg} x$ ;  $y = \operatorname{arc tg} x$ ;  $y = e^x$ ;  $y = \frac{1}{1+x^2}$ .

Особый интерес представляет контур с одним диодом, в котором напряжение на выходе в любой момент

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДУГОВОГО ПРОМЕЖУТКА ПОСЛЕ БЫСТРОГО РАЗРЫВА ТОКА

Для исследования использованы прямоугольный импульс тока и импульсное испытательное напряжение, накладываемое в различные моменты времени после разрыва постоянного тока.

Между полированными электродами из Си или В в воздухе при токе до 20 а дуга требует для повторного зажигания 355 в через 3 мксек после разрыва тока независимо от перемены полярности электродов. Скорость восстановления электрической прочности 1,1 в/мксек при длине промежутка 1 см. При больших токах напряжение повторного зажигания падает под влиянием паров металла и зависит от перемены полярности. Для электродов из графита, Al или мягкой стали в воздухе начальное напряжение повторного

## ГЕРМАНИЕВЫЙ ЗАРЯДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Изготовлен образец регулируемого германиевого выпрямителя 10 квт для зарядки аккумуляторных батарей. При токах ниже номинального напряжение автоматически поддерживается постоянным с точностью  $\pm 0,5\%$ ; при полной нагрузке обеспечивается постоянство тока.

Блок-схема регулирования изображена на рисунке. Напряжение батареи  $B$  отбирается через делитель напряжения  $DH$  и сравнивается с источником стандартного напряжения  $CH$  (диодом из кремниевого сплава). Сравнение производится устройством  $CY$  с двумя транзисторами в шунтирующем соединении. При отклонении напряжения от заданного возникает сигнал, воздействующий через транзисторный усилитель тока  $UT$  на

## ЭЛЕКТРОННАЯ УПРАВЛЯЮЩАЯ УСТАНОВКА

На практике часто встречается необходимость синхронной передачи углового сдвига машин или аппаратов через датчик на удаленный от него приемник или несколько приемников, расположенных в разных местах. При этом иногда требуется, чтобы была возможность регулирования скорости в определенном диапазоне. Такие установки находят применение, например, для привода регистрирующих приборов (специальных шлейфовых осциллографов) и т. п. Для этой цели была разработана электронная установка, позволяющая регулировать число оборотов в отношении 1 : 10. Механическая управляющая мощность составляет лишь несколько процентов мощности, подводимой к приемнику. Мощность датчика и приемника можно изменять в широких пределах. Установка состоит из датчика — двухфазного генератора с независимым возбуждением, двух усилителей и приемника — двухфазного синхронного двигателя.

Оптимальное соотношение  $\frac{L_s}{r_n}$  определяется экономическим расчетом. После выбора  $L_s$  и  $C$  нужно проверить, не возникает ли в одном из контуров, состоящем из катодного реактора, дросселя и конденсатора, резонанс для любой из гармонических выпрямленного напряжения. Рекомендуется исключить возможность резонанса при отклонениях частоты на  $\pm 25\%$  от номинала.

С индуктивностью  $L_s$  катодного реактора складывается внутренняя индуктивность выпрямительной установки, равная приближенно

$$L_r = \frac{u_{g0}}{10\pi f_g} X_a [\text{мн}],$$

где  $X_a$  — сумма относительных реактивностей анодной цепи и питающей сети.

El. Times, стр. 779, № 3314, 1955. (Э-во, 10, 1955)

При пересечении каким-либо предметом лучка луций со всего оборудования автоматически снимается напряжение. При импульсных испытаниях установка, кроме того, автоматически заземляется для удаления остаточных зарядов.

Оборудование применяется для расстояний до 60 м. Подобное же устройство применено для предупреждения прикосновения крюков и строп подъемных кранов к находящимся под напряжением частям аппаратов.

El. Ind. Export, т. 54, стр. 43, № 1, 1954. (Э-во, 10, 1955)

ких двигателей. При этом не удается отстроить максимальную защиту обычного типа от пусковых токов. В подобных случаях автомат оборудуется дополнительным защитным устройством, реагирующим не на величину тока в линии, а на скорость нарастания тока и разницу между его начальным и конечным значениями за небольшой промежуток времени. Устройство состоит из импульсного трансформатора тока, включенного в цепь постоянного тока, поляризованного реле и расцепителя; при резком изменении тока в линии, возникающем при коротком замыкании, во вторичной обмотке трансформатора тока возникает импульс напряжения, реле срабатывает и автомат отключается.

AEGM, стр. 235, № 3/4, 1955.

(Э-во, 10, 1955)

ксовой скоростью сжатый воздух; подвижные электроды быстро отделяются от противоэлектродов и освобождают отверстия сопел; при этом дуга гасится воздушным потоком. Оба подвижных контакта каждой камеры перемещаются навстречу друг другу, так что результирующий момент остается равным нулю. В конечном положении подвижный контакт плавно затормаживается совместным действием пружин и воздушного катаракта.

Каждый полюс установлен на сваренном баке сжатого воздуха, в который встроен дифференциальный управляющий вентиль.

Выключатель пригоден для пофазного отключения, одно-, двух- и трехфазного АПВ со временем обесточивания от 0,2 сек.

AEGM, стр. 229, № 3/4, 1955.

(Э-во, 10, 1955)

зажигания уменьшается вследствие электронной эмиссии, продолжающейся после разрыва тока, и заметно зависит от перемены полярности. Скорость восстановления электрической прочности у газов зависит в основном от рода газа, длины промежутка и выдержки времени. При давлении 0,14 кг/см<sup>2</sup> быстрее всего прочность восстанавливается у SF<sub>6</sub>, затем у CO<sub>2</sub> и C, у воздуха, N и Ar. Для полированных медных электродов при токе 20 а в воздушном промежутке 1 см установлены два типа повторного зажигания: до 5 мсек после разрыва тока пробой сопровождается диффузным разрядом; выше 5 мсек происходит искровой пробой и быстрый переход к низковольтному разряду.

Proc. IEE, т. 101, ч. II, стр. 321, № 81, 1954. (Э-во, 10, 1955)

пропорционально отношению двух напряжений переменной величины. Контур используется для определения зависимостей: магнитной проницаемости — от индукции, сопротивления нелинейного элемента — от тока или напряжения, отношения между сигналом и шумом — от ряда изменяющихся параметров. Искомые зависимости изображаются в виде кривых на экране осциллографа.

На том же принципе основан оптический пирометр для контроля быстро меняющихся температур. Наконец, этот принцип можно использовать для стабилизации напряжения без искажения его формы, частоты и фазы, в частности для устранения «замирания» при радиоприеме.

Bull. ASE, стр. 361, № 8, 1955.

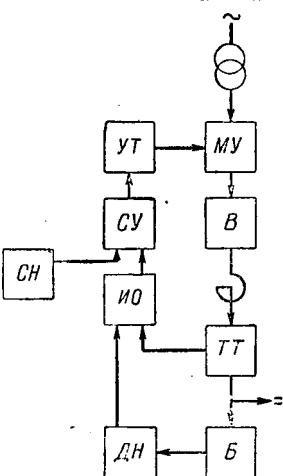
(Э-во, 10, 1955)

теля с независимым возбуждением. Два переменных напряжения генератора, сдвинутые по фазе на 90°, управляют усилителями, выходная мощность которых подводится к синхронному двигателю. Оба противотактных усилителя рассчитаны таким образом, что фазовращение между входными переменными напряжениями и выходными переменными токами составляет только доли электрического градуса. Для достижения высокой точности угловой синхронизации каждая из машин снабжена семью парами полюсов. В выполненной установке была измерена пространственная угловая погрешность между датчиком и приемником менее 0,5° в диапазоне 350...3 500 об/мин (при частоте 50...500 гц). Приведены принципиальная схема установки, а также общие виды усилителей и всей установки с панелью управления.

Regelungstechnik, стр. 70, № 3, 1955. (Э-во, 10, 1955)

магнитный усилитель МУ в анодной цепи выпрямителя В, и анодное напряжение изменяется в нужном направлении. При достижении номинального тока со стандартным напряжением сравнивается напряжение на выходе измерительного трансформатора постоянного тока ТТ. Переход от регулирования напряжения к регулированию тока осуществляется избирательным органом ИО, состоящим из двух германовых диодов.

El. Eng., т. 74, стр. 149, № 2, 1955. (Э-во, 10, 1955)



## ИСПЫТАНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ 100 тыс. квт

В США экспериментально исследовались переходные процессы в выпрямительной установке 100 тыс. квт, 800 в, состоящей из 24 параллельно включенных групп из шести игнитронов. Испытания должны были определить лучший способ оперативного отключения нагрузки, а также проверить действие защиты от обратных зажиганий. Опыты показали, что отключение крупной игнитронной установки целесообразно производить путем размыкания питающей цепи переменного тока, не прекращая подачи зажигающих импульсов. В этом случае затухающий ток распределяется между отдельными выпрямителями сравнительно равномерно; все же ток в переходном режиме может достигнуть в отдельных вентилях 220% исходного значения. При ранее применявшемся методе отключения установки при помощи

W. Hartel

4

## НАГРУЗКА ТИРАТРОНОВ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Максимальная допустимая нагрузка тиаратрона характеризуется тремя величинами: напряжением запирания, средним значением анодного тока  $I_a$  и его амплитудным значением  $I_{a\max}$ . Превышение этих значений, как правило, влечет за собой повреждение, которое может либо вывести тиаратрон из строя, либо сократить срок его службы.

В электронной технике управления и регулирования тиаратрон чаще всего применяется в мощных оконечных каскадах усилителей. В случае применения тиаратрона для регулирования возбуждения электрической машины часто применяется двухфазное выпрямление по схеме съема напряжения со средних точек. В этом случае ветвь постоянного тока состоит в основ-

W. J. Rudge, W. A. Mc Morris, S. B. Howard,  
T. J. Carpenter

4

## ВЕНТИЛЬНЫЙ РАЗРЯДНИК С МАГНИТНЫМ ДУТЬЕМ

В США выпущена серия тиристорных разрядников стационарного типа с улучшенными характеристиками. Последовательно с главным искровым промежутком соединены два вспомогательных промежутка, параллельно которым включена катушка магнитного дутья. При перенапряжении разрядный ток проходит сначала через промежутки; сопровождающий ток промышленной частоты быстро переходит со вспомогательных промежутков на катушки магнитного дутья. Под действием последнего дуги в главном промежутке втягиваются в диодную камеру, встроенную в разрядник, и гасится при первом прохождении тока через нуль.

Такой разрядник может гасить значительно большие токи промышленной частоты, чем разрядники без магнитного дутья. Благодаря этому сопротивление тири-

Л. Ш. Казарновский

6

## НОВЫЙ СТАНДАРТ НА ЛИСТОВУЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКУЮ СТАЛЬ

Дается сравнение ГОСТ 802-41 и нового стандарта ГОСТ 802-54. Новый стандарт включает обычную горячекатанную сталь и холоднокатанную магнитно-анизотропную сталь. Обозначение марок сталей в ГОСТ 802-54 отличается тем, что каждой гарантированной характеристике соответствует не буквенный, а цифровой индекс. Сортамент листов значительно расширен за счет введения форматов  $670 \times 1340$ ,  $860 \times 1720$  и  $1000 \times 2000$  мм, а также листов толщиной 0,20; 0,15 и 0,10 мм. Некоторые малоупотребительные форматы исключены. Исключены также листы толщиной 0,42 и 0,3 мм. Количество марок увеличено вдвое за счет включения сталей, ранее изготавливавшихся по Временным техническим условиям, и некоторых новых марок. Ряд марок, близких по электромагнитным характеристикам, исключен из стандарта.

Б. М. Плющ и В. О. Саркисян

5

## ЭЛЕКТРОПРИВОД СТАНКОВ-КАЧАЛОК ГЛУБИННОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статье рассматривается электропривод с пульсирующей нагрузкой станков-качалок нефтяной промышленности.

На основе точных кинематических зависимостей для четырехзвенных преобразующих механизмов дается аналитическое выражение для статического момента и момента потерь станка-качалки.

Решается уравнение движения электропривода при переменном моменте инерции системы, зависящем от угла поворота кривошипа, с учетом потерь.

Для практических расчетов в промысловых усло-

Н. В. Горохов и С. Е. Радин

5

## О ФОРМЕ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

В статье рассматривается вопрос о плавном регулировании возбуждения тягового двигателя тепловоза.

Регулирование скорости двигателя путем ослабления его потока возбуждения дает возможность уменьшить диапазон изменения напряжения генератора и, следовательно, габариты генератора.

Закон, по которому производится регулирование, существенным образом влияет на тепловой режим генератора и двигателя.

Получение оптимальной скоростной характеристики возможно при применении систем плавного регулирования. Одним из решений в этом направлении является применение двигателя смешанного возбуждения при условии питания обмотки независимого возбуждения от специального возбудителя.

Г. С. Кучинский

5

## РАБОТА БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Для исследования процессов, происходящих в изоляции в режиме наложения постоянной напряжения на переменное, в публикуемой работе применена методика осциллографирования тока потерь. Показывается, что по форме ионного пика тока потерь можно рассчитать проводимость масла непосредственно в толще изоляции.

Если к диэлектрику, находящемуся под переменным напряжением, приложить постоянное напряжение такого значения, чтобы напряженность поля в масляной прослойке не меняла своего знака, то ионы масла будут прижаты к соответствующим границам раздела между клетчаткой и маслом и их движение будет ограничено. Опыты с конденсаторной изоляцией показали, что вследствие этих процессов наложение постоянного на-

В. И. Калитвицкий и А. В. Ковальская

6

## ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СЛУЖБЫ НОВЫХ ВИДОВ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В статье приведены результаты исследования по установлению продолжительности службы кремнийорганической и пленочной (триацетатцеллюлозной) изоляции электрических машин.

Изоляция испытываемых электродвигателей подвергалась комплексному воздействию повышенных нагревов, высокой влажности, электрического поля и механических усилий. Основным критерием, определяющим продолжительность службы изоляции, был принят выход электродвигателя из строя по вине изоляции в рабочем режиме.

Правильность принятой методики была подтверждена испытаниями электродвигателей с изоляцией класса А.

Установлено, что продолжительность службы крем-

виях предлагаются простая и достаточно точная формула для определения мощности электродвигателя:

$$P_{\text{эф}} = \frac{1}{\eta_n} (K_1 + K_2 G_{\text{жс}} S_0) n [\text{kвт}],$$

где  $G_{\text{жс}}$  — вес столба жидкости, кг;

$S_0$  — длина хода, м;

$n$  — число качаний в 1 мин;

$D$  — диаметр насоса, см.

Для станков-качалок нормального ряда

$$\eta_n = 0,96 \dots 0,98; \quad K_1 = 0,02 \dots 0,22.$$

Для практических расчетов дается также упрощенная формула для определения максимального статического момента.

Электричество, № 10, 1955.

В статье решаются следующие задачи:

а) разработана методика построения зависимости напряжения на обмотке независимого возбуждения тягового двигателя в функции тока якоря для заданной скоростной характеристики;

б) дан метод определения рационального соотношения н. с. обмоток последовательного и независимого возбуждения;

в) предложена принципиальная схема возбудителя.

В качестве возбудителя, обеспечивающего требуемый закон изменения напряжения на обмотке независимого возбуждения двигателя, предлагается генератор с обмоткой независимого возбуждения и дополнительной обмоткой, являющейся отрицательной связью по току якоря двигателя.

Электричество, № 10, 1955.

напряжения в области напряженностей менее 35 кв/мм в ряде случаев приводит к значительному уменьшению потерь и увеличению срока службы изоляции.

Исследование ионизационных характеристик изоляции показало, что наложение постоянного напряжения весьма слабо изменяет напряжение ионизации, которое определяется переменной составляющей напряжения.

Рабочие напряженности в конденсаторах на переменное напряжение при наличии постоянной составляющей могут быть выбраны только исходя из величины переменной составляющей напряжения при условии, что амплитудное значение приложенной напряженности не превзойдет значения, обычно принятого для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении (35...40 кв/мм).

Электричество, № 10, 1955.

нитиорганической и пленочной изоляции связана с температурой уравнением

$$\ln t = \frac{B}{T} + G.$$

Экстраполяция полученных экспериментальных данных для области более низких температур дала возможность рекомендовать следующие длительно допустимые предельные температуры: для стеклослюдяной кремнийорганической изоляции 180°С; для стеклолакотканевой кремнийорганической изоляции 135°С; для пленочной (триацетатцеллюлозной) изоляции 110°С.

Электричество № 10, 1955.

быстро действующих катодных автоматов амплитуда тока доходила в переходном режиме в отдельных вентилях до 400%.

Перед отключением рекомендуется ограничить выпрямленный ток путем увеличения угла зажигания, с тем чтобы уменьшить внезапный сброс нагрузки в энергосистеме. Этот прием не оказывает существенного влияния на токи в переходном режиме. Защиту крупных выпрямительных установок от обратных зажиганий авторы рекомендуют обеспечивать быстро действующими автоматами в анодных и катодных цепях в сочетании с токоограничивающими реакторами в первичной цепи. Распределение токов при обратном зажигании совпадало с точностью  $\pm 10\%$  со значениями, полученными путем электромоделирования.

El. Eng., т. 74, стр. 122, № 2, 1955.

(Э-во, 10, 1955)

ном из последовательно соединенных индуктивности  $L$  и омического сопротивления  $r$ . При индуктивно-омической нагрузке  $I_a$  и  $I_{a \text{ макс}}$  пропорциональны действующему значению анодного напряжения и зависят, кроме того, от угла зажигания  $\alpha$  и  $r$  и  $L$  цепи постоянного тока. Расчет  $I_a$  и  $I_{a \text{ макс}}$  приводит к трансцендентным уравнениям, которые могут быть решены либо графически, либо для определенных числовых значений. Автор задался целью изобразить графически зависимость  $I_a$  и  $I_{a \text{ макс}}$  от  $r$ ,  $L$  и  $\alpha$ . Для упрощения изображения построены однопараметрические семейства кривых зависимостей  $I_a$  и  $I_{a \text{ макс}}$  от параметра нагрузки ветви постоянного тока  $\frac{x}{r}$  (где  $x = \omega L$ ) и  $\alpha$ . Из этих кривых можно для любых нагрузок  $r$  и  $L$  и любого значения  $\alpha$  получить  $I_a$  и  $I_{a \text{ макс}}$  и определить нагрузку тиатрона.

Regelungstechnik, стр. 66, № 3, 1955.

(Э-во, 10, 1955)

товых дисков можно выбрать более низким, чем в прежних конструкциях, что позволило снизить остаточное напряжение на 20%.

Корпус вентиля герметически закупорен и заполнен тщательно осущестившим воздухом с точкой росы не выше  $-40^{\circ}\text{C}$ . Благодаря незначительному содержанию влаги и предварительной ионизации воздуха искровой промежуток обладает устойчивой и пологой вольтамперной характеристикой. В днище разрядника встроена предохранительная диафрагма.

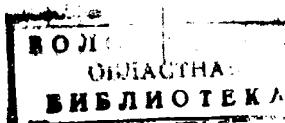
Применение разрядника с магнитным дутьем представляет особый интерес для грозозащиты вращающихся машин и оборудования с ослабленной изоляцией.

Tr. AIEE, т. 73, ч. III-B, стр. 912, 1954.

(Э-во, 10, 1955)

Электромагнитные характеристики сталей общего применения несколько улучшены сравнительно с ГОСТ 802-41 и ВТУ. Исключены низшие марки Э1, Э3 и Э4. Введена новая высшая марка Э43 с удельными потерями  $P_{10/50} = 1,05 \text{ вт/кг}$  при толщине 0,35 мм. У других марок также снижены удельные потери.

Электричество, № 10, 1955.



### К СВЕДЕНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Учитывая, что большинство подписчиков оформляет свою подписку на периодические издания на очередной год заблаговременно, Главное управление по распространению печати „Союзпечать“ Министерства связи ССРС извещает о следующем:

1. Подписка на газеты и журналы на 1956 г. будет открыта в начале октября с. г. в отделах Союзпечати, конторах, отделениях, агентствах связи, пунктах подписки на заводах, фабриках, шахтах, стройках, в колхозах, совхозах, МТС, учебных заведениях и учреждениях.

2. Прием подписки на центральные газеты и журналы будет продолжаться в пределах сроков, установленных местными отделами Союзпечати, конторами связи с учетом ее завершения не позднее третьей декады ноября.

По истечении установленных сроков подписка будет приниматься лишь со следующих месяцев при наличии свободного тиража.

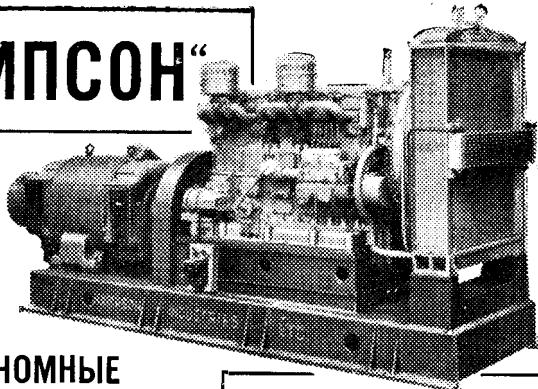
Указанный выше срок оформления подписки на 1956 г. позволит обеспечить своевременный выпуск изданий и их быструю рассылку подписчикам.

Годовая подписка обеспечивает подписчику полным комплектом изданий.

Главное управление по распространению печати „Союзпечать“ Министерства связи ССРС просит всех подписчиков не откладывать оформление подписки на последние дни.

**Главное управление по распространению печати „Союзпечать“ Министерства связи ССРС**

# „ХАМПСОН“



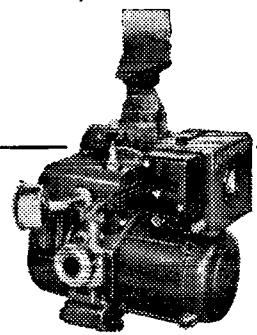
### АВТОНОМНЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Генераторные установки „ХАМПСОН“ зарекомендовали себя наиболее надежными, эффективными и экономичными автономными агрегатами для снабжения независимой электрической энергией для освещения и индустриальных, сельскохозяйственных и домашних надобностей. Дизельные или с бензиновым двигателем, они приобрели широкую известность своей бесперебойной службой и долгосрочностью. Агрегаты эти доставляются окончательно смонтированные, готовые к немедленному пуску в эксплуатацию. Иллюстрированная литература высыпается по запросу.

Агрегаты могут быть оборудованы пускателями любого из нижеследующих типов:  
1. автоматическим дистанционным управлением.  
2. полным автоматическим контролем.  
3. электрическим пускателем.  
4. ручным пускателем или 5. как автоматический аварийный агрегат с пуском от магистрали.

От  $\frac{1}{2}$  до 500 квт.

На фотографии внизу агрегат портативного типа

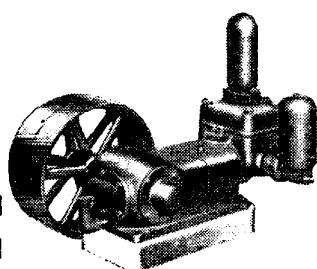


## HAMPSON INDUSTRIES LIMITED

WEST BROMWICH, АНГЛИЯ. Тел. адрес: HAMPGEAR WEST BROMWICH

Фирма производит насосные агрегаты с дизельными или бензиновыми двигателями, электросварочные агрегаты и воздушные компрессоры.

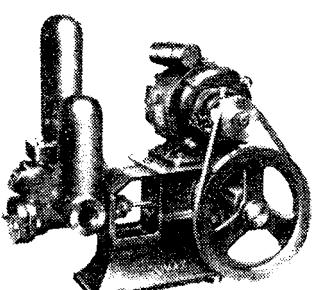
# Climax



Самосмазывающиеся  
поршневые насосы  
для  
неглубоких колодцев

Имеются в большом выборе для водоснабжения заводов, поселков, индивидуальных хозяйств и т.п.

- Производительность 1136-19093 литр. в час.
- Привод от электродвигателя с ручным или автоматическим управлением, в последнем случае посредством поплавкового ртутного выключателя „КЛАЙМАНС“. Имеются также с приводом от двигателя внутреннего горения.
- Требуют минимального ухода.



**THOMAS & SON (WORCESTER) LTD.**

ФАБРИКАНТЫ НАСОСОВ И ВЕТРЯКОВ

WORCESTER

АНГЛИЯ

Фирма основана в 1822 году

m and i

### THE MICANITE & INSULATORS CO. LTD.

EMPIRE WORKS, BLACKHORSE LANE,  
WALTHAMSTOW, LONDON, E.17  
АНГЛИЯ

Самая большая и старейшая Британская фирма специалистов по электрической изоляции.

Основные производства:

„МИКАНИТ“ в виде листов, трубок, коммутаторных колец и т. п.

„ПАКСАЛИН“ пропитанные смолой сплошные, с бумажной и тканевой основой, листы, трубки, прутки и т. п.

„ЭМПИР“ лакированные изолирующие ткани, шелка и ленты.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ для трансформаторов и масляных выключателей.

ВУЛКАНИЗИРОВАННАЯ ФИБРА И ЛЕТРОИД Обмотка для проводов: выпрессованного хлористого поливинила, лакированная хлопчатобумажная и стеклянная.

Хлористый поливинил, профилированный под давлением.

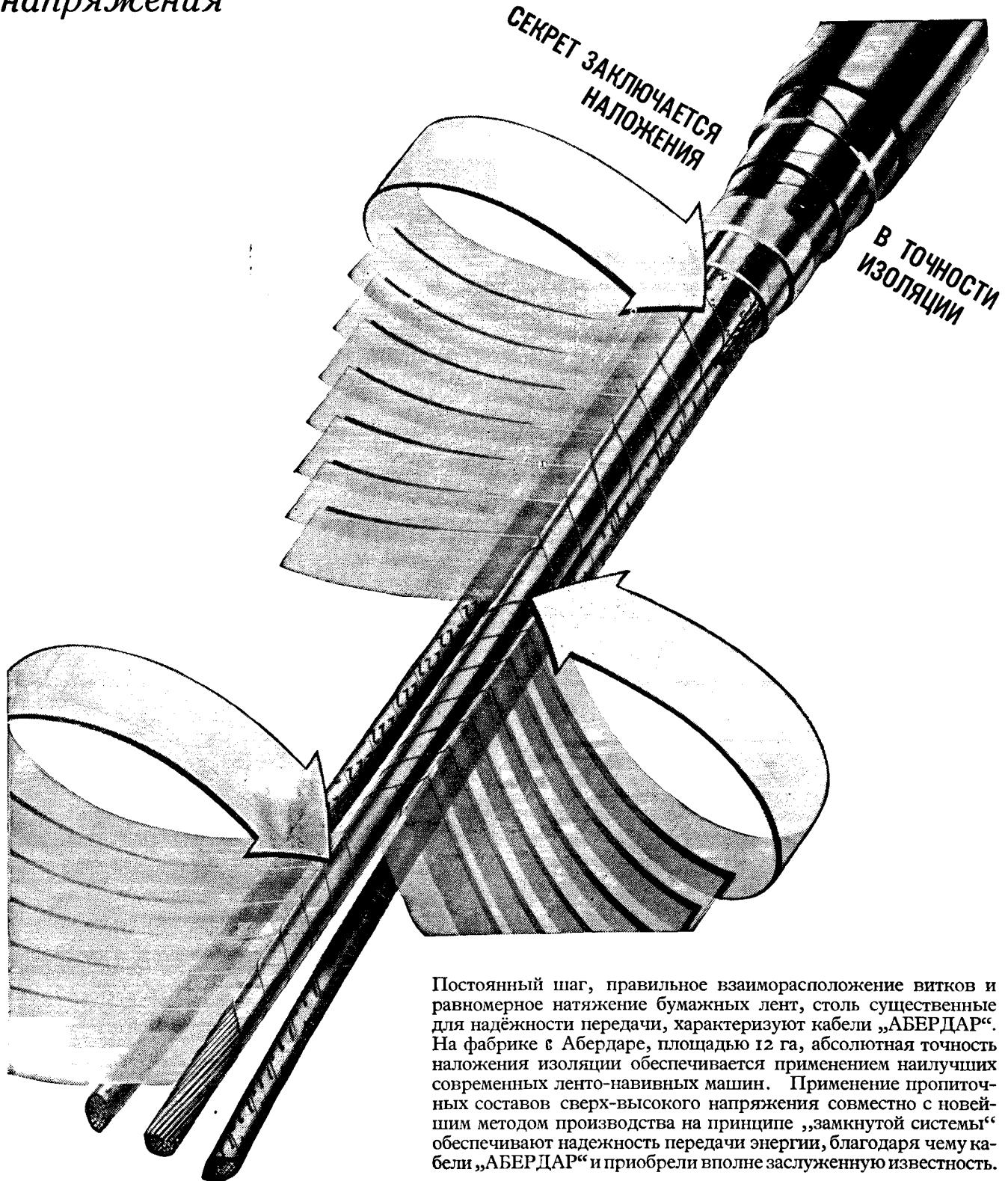
Как поставлялись в ССРС  
в 1931-1935 годах

Телеграммы: MYTILITE, LONDON

Телефон: LARKWOOD 5500

Цена 8 руб.

## Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения



Постоянный шаг, правильное взаиморасположение витков и равномерное натяжение бумажных лент, столь существенные для надёжности передачи, характеризуют кабели „АБЕРДАР“. На фабрике в Абердаре, площадью 12 га, абсолютная точность наложения изоляции обеспечивается применением наилучших современных ленто-навивных машин. Применение пропиточных составов сверх-высокого напряжения совместно с новейшим методом производства на принципе „замкнутой системы“ обеспечивают надежность передачи энергии, благодаря чему кабели „АБЕРДАР“ приобрели вполне заслуженную известность.

# Aberdare Cables

ABERDARE CABLES LIMITED · NINETEEN WOBURN PLACE · LONDON · АНГЛИЯ

Фабрика: Aberdare, Glam., South Wales.