

1934

„Коммунизм есть советская власть
плюс электрификация всей страны“
ЛЕНИН

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 7

М А Й
ВЫПУСК II



МОСКВА
ЛЕНИНГРАД

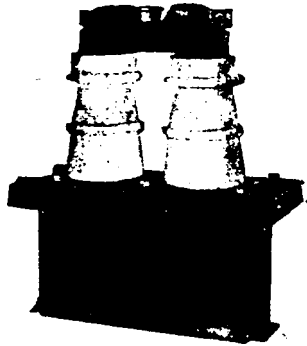
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Вологодская областная универсальная научная библиотека

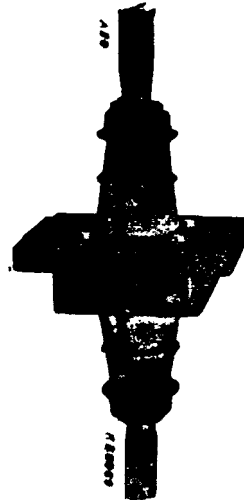
www.booksite.ru

AEG Трансформаторы тока и напряжения с фарфоровой изоляцией без масла, массы и волокнистых веществ

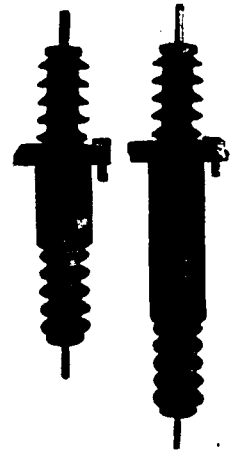
для измерительных инструментов, реле и счетчиков



U-образный трубчатый трансф. тока ARP
Ряд 10, 20 и 30
Номинальный ток 5—600 А

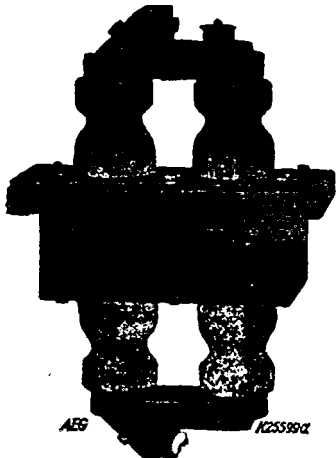


ARP
для открытых установок



ARPF
для открытых установок

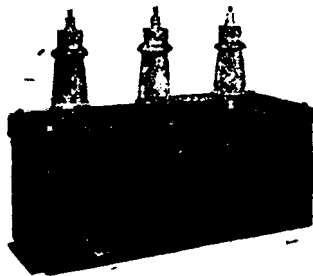
Стержневые трансф. тока
Ряд 10, 20 и 30. Номинальный ток 30—6000 А



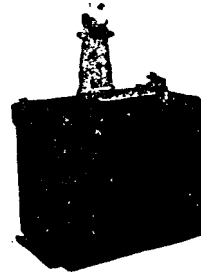
Двойной проходной трансф. тока ADP
Ряд 10, 20, 30, 45 и 60
Номинальный ток 5—400 А



Шинный трансф. тока ASP
Ряд 3
Номинальный ток 100—3000 А



Трёхфазный трансф. напряжения EVDP 10
Ряд 10
Номинальное напряжение 3—10 кВ



Однофазные трансф. напряжения EVWP
Ряд 10, 20 и 30
Номинальное напряжение 3—30 кВ



Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft
Abt. Rußland / Berlin NW 40

6094

МАГНИТНАЯ СТАЛЬ „САНДВИК“

Мы уделили много времени обстоятельному изучению производства магнитной стали, и в состоянии теперь предложить потребителю серию разных типов этой стали, особенно высокого качества в отношении однородности, точности, прочности закалки (никаких трещин при закалке), возможности переработки, коэрцитивной силы и т. д.

Поставляется в слитках или обручах всех общепотребительных размеров.

Запросы просим сопровождать наивозможно обстоятельными сведениями относительно применения стали, чтобы мы были в состоянии выбрать наиболее подходящее качество.



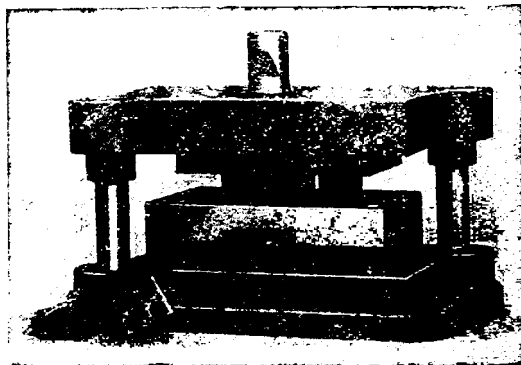
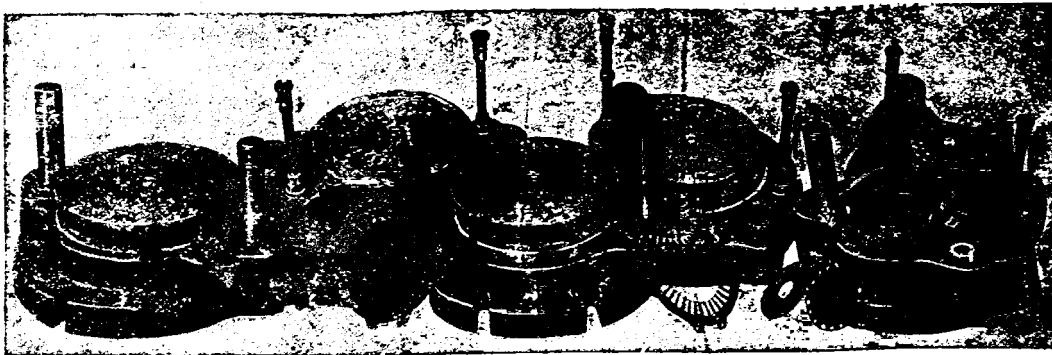
SANDVIKENS JERNVERKS AKTIEBOLAG
SANDVIKEN (ШВЕЦИЯ)

6694

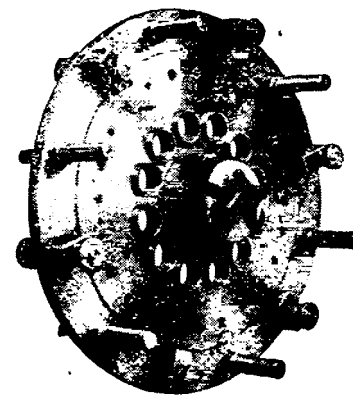
Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли. При всех запросах к иностранным фирмам о присылке каталога образцов и проспектов просим ссылаться на номер нашего журнала.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru



**Инструменты для
штамповки
Приспособления
Многошпindleльные
сверловочн. головки
Формы для прессовки
изоляц. материалов
Специальные машины**



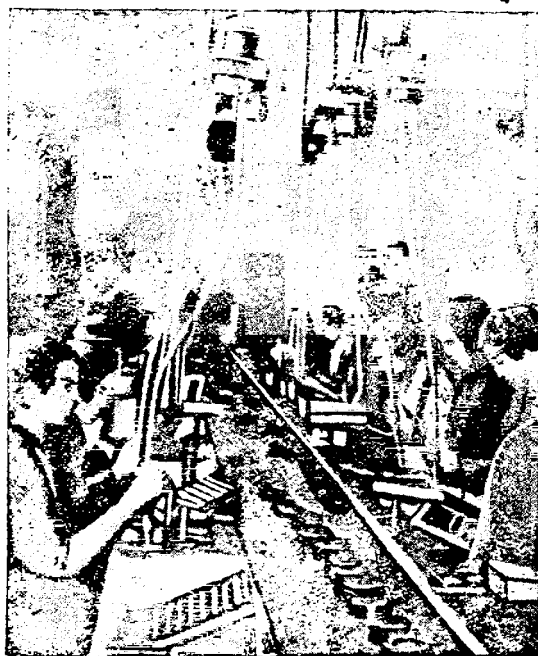
первоклассной конструкции
и наилучшего выполнения
поставляются фирмой

VORRICHTUNGSBAU HÜLLER/LUDWIGSBURG (Wttbg.) (Германия)

34261

Всюду, где приходится ввертывать шурупы одних и тех же размеров при серийной и поточной работе, с успехом применяются механические

ОТВЕРТКИ ФЛЕКС



**Ф
Л
Е
К
С**

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОТВЕРТКА ФЛЕКС
на конвейере электротехнического завода
ACKERMANN & SCHMITT
SPEZIALMASCHINENFABRIK
Stuttgart 13. Postfach 28/35 (Германия)



Фабрика электрических аппаратов
ФР. САУТЕР, Акц. Общ. в **Базеле**
(Fabrik elektr. Apparate FR. SAUTER, A.-G., Basel)

Мы строим:

- 1. Астрономические** электрические часовые выключатели для автоматического зажигания и тушения уличного освещения
- 2. Автоматические** выключатели, действующие на расстоянии (реле: ртутные, магнитные и моторные)
- 3. Электрические** автоматические водонагреватели (бойлеры) „КУМУЛУС“ и всевозможные электрические нагревательные приборы.

Выставляем на постоянной выставке
„Технопроимпорта“

Поставщики Электроимпорта.

Запросы могут быть составлены также и на русском языке.

6678

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.		Стр.
Инж. В. А. ТРАПЕЗНИКОВ — Полюсное деление и окружная скорость электрических машин	3	Инж. Н. М. КОВАЛЕВ — Электрооборудование на нефтеналивных судах	36
Инж. И. И. СЛАВЦЕВ — Определение основных размеров электрических машин	12	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	
К РАСЧЕТУ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ			
Инж. Г. Б. РОЗЕНБЕРГ — Влияние нагрузки на величину установившегося тока короткого замыкания при несимметричных коротких	14	Инж. Р. А. ВОРОНОВ — К вопросу об изменениях по ваттметрам, включенным по схеме Арона	37
Инж. Л. Е. МАШКИЛЛЕЙСОН — К вопросу о расчете нагрева токоведущих частей при коротких замыканиях	18	Инж. И. С. БРУК — Простая формула для определения коэффициента мощности асинхронных двигателей	39
Инж. Д. А. ФУКС — Определение температурных усилий и напряжений в мощных шинных конструкциях	22	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	
ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК			
Инж. Л. Н. ГРУЗОВ и Инж. В. А. РОМАНОВ — Повысительная подстанция на 380 kV.	31	Акад. В. Ф. МИТКЕВИЧ — К вопросу об условной математической трактовки физических явлений*	40
Инж. М. Н. КАРНЕЕВ и инж. В. И. ДЕМИДОВ — Производственная сигнализация на центральных электростанциях	33	Проф. А. И. ДРОЖЖИН и инж. Г. М. АЙНГОРН — Операционное исчисление Хевисайда	42
		Инж. А. Г. ЗАХАРИН — К вопросу о построении диаграммы нагрузки привода с маховой массой	52
		ХРОНИКА	55
		БИБЛИОГРАФИЯ	59
		ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ	63

Полюсное деление и окружная скорость электрических машин

Инж. В. А. Трапезников
Москва, ОРГЭНЕРГО

При оценке свойств электрической машины можно базироваться на различных ее параметрах: мощности и скорости вращения мощности, на пару полюсов¹⁾, удельных нагрузках и т. п.; однако для ясного представления о характеристиках машины желательно выявить какой-либо из параметров, наиболее полно определяющий все ее свойства.

Законы рядов Видмара показывают, что для трансформатора таким параметром являются его геометрические размеры. Для вращающихся электрических машин вопрос несколько осложняется благодаря выполнению машин на различные скорости вращения и благодаря влиянию величины воздушного зазора.

Однако и для вращающейся машины легко найти параметр, характеризующий ее свойства. Этим параметром является величина полюсного деления и окружная скорость машины²⁾.

Будем рассматривать электрическую машину, состоящую из ряда отдельных элементов, имеющих своим основанием полюсное деление. На рис. 1 схематически

показаны две машины различного диаметра, но имеющие одинаковое полюсное деление. Легко видеть, что характеристики этих машин почти одинаковы, поскольку взаимное различие элементов, из которых составлены эти машины, невелико и оно вызвано в основном двумя причинами:

1) разницей в форме зубца (разница углов α и α_1), обусловленной разницей диаметров;

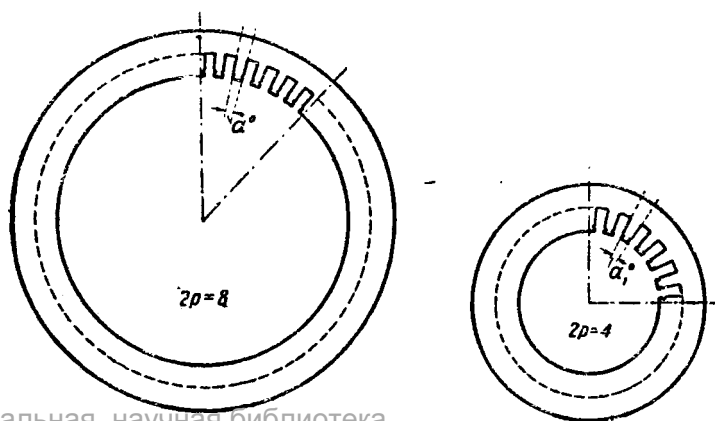


Рис. 1

¹⁾ См., например, статью проф. Перевозского, „Электричество“, 1930, стр. 1009.

²⁾ Значение окружной скорости для турбогенераторов было отмечено Б. П. Апаровым, „Электричество“ № 8, 1933.

2) разницей воздушных зазоров, обусловленной производством и монтажом машины (в машинах синхронных и машинах постоянного тока влияние диаметра на величину воздушного зазора невелико).

Однако эти факторы искажают общую картину незначительно, и величина полюсного деления по-прежнему остается основным параметром, характеризующим машину.

В дальнейшем мы докажем это положение на ряде простых соотношений, которые не только выяснят значение окружной скорости и полюсного деления, но также позволят найти характеристики машины (потери, расход материала, $\cos \varphi$), не производя расчета, а лишь задавшись основными ее нагрузками.

Выведенные формулы проверены на нескольких десятках машин наших и иностранных заводов и показали хорошее совпадение с опытом.

1. Мощность на полюс

Напишем ряд известных соотношений:

$$\begin{aligned} v &= \frac{2\tau f}{100}, & (1) \\ D &= \frac{2p\tau}{\pi}, \\ n &= \frac{60f}{p}, \\ \frac{D^2Ln}{P_{[kVA]}} &= \frac{6 \cdot 10^{11}}{kB_{cp}AS}. \end{aligned}$$

Здесь v — окружная скорость (m/sec); τ — полюсное деление (cm); f — частота (Hz); p — число пар полюсов; D — внутренний диаметр статора машины переменного тока и внешний диаметр якоря машины постоянного тока (cm); L — длина железа без каналов (cm)³; $P_{[kVA]}$ — мощность машины на клеммах (kVA);

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau L}$$

— средняя индукция в воздухе при холостом ходе; AS — линейная нагрузка (A/cm);

$$k = f_B f_w f_k;$$

f_B — коэффициент формы поля; f_w — обмоточный коэффициент; f_k — фактор укорочения обмотки.

Из этих уравнений легко прийти к выражению мощности на полюс:

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} = \frac{5 \cdot 10^{-8} kB_{cp}ASLv^2}{f}. \quad (2)$$

Посмотрим, каковы будут пределы мощности. Для машин переменного тока с шагом обмотки около 0,8 τ будем иметь приблизительно

$$k = f_B f_w f_k \approx 1,09 \cdot 0,96 \cdot 0,95 \approx 1;$$

для частоты

$$f = 50 \text{ Hz} \\ v \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right] = \tau_{[cm]}, \quad (3)$$

и мы получаем мощность на полюс

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} = 10^{-9} B_{cp} ASL\tau^2. \quad (4)$$

³) Машины синхронные и машины постоянного тока обычно рассчитываются по полной длине железа, включая каналы, но в целях обобщения мы ввели длину железа без каналов. Разница будет учтена соответствующим изменением B_{cp} .

⁴) Выражение, близкое по форме, было получено проф. Нитгаммером.

Отсюда легко найти предельные значения мощности.

Для нормальных синхронных и асинхронных машин наибольший предел примерно следующий: $\tau = 45$ cm; $L = 65$ cm; $B_{cp} = 6500$; $AS = 550$ A/cm. Подставляя эти значения в формулу (4), получим приблизительно для нормальных машин переменного тока при $f = 50$ Hz

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} \leq 475;$$

отдельные крупные единицы с явно выраженными полюсами (синхронные компенсаторы, крупные гидрогенераторы) могут иметь $v = 65$ m/sec; $L = 200$ cm; $AS = 700$ A/cm; $B_{cp} = 7000$; тогда

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} \leq 4000.$$

В машинах с неявно выраженными полюсами, допускающими окружные скорости до $v = 150$ m/sec, мощность на полюс получается много большей.

Мощность машин постоянного тока также может быть определена уравнением (2), где f означает частоту перемангничивания железа и $k = 1$, однако предельная мощность машин постоянного тока ограничивается условиями коммутации и поэтому необходимо учесть добавочные факторы.

Обозначим: e_s — максимальное напряжение между коллекторными пластинами при холостом ходе; I — ток машины, U — напряжение машины; N — число полюсов машины, K — число коллекторных пластин;

$$a_i = \frac{B_{cp}}{B_{max}}$$

Рассматривая машину с петлевой обмоткой и числом витков секции $w = 1$, можем написать⁵)

$$e_s = \frac{U \cdot 2p}{K a_i}; \quad K = \frac{N}{2}; \quad AS = \frac{IN}{2p\tau D}.$$

Сопоставляя эти уравнения с выражением машинной постоянной, найдем мощность машины постоянного тока на полюс:

$$\frac{P_{[kW]}}{2p} = \frac{AS e_s a_i v}{40f}. \quad (5)$$

В машинах постоянного тока частота перемангничивания железа не связана жестко со скоростью вращения; поэтому интересно выяснить предел полной мощности машины.

Подставив в уравнение (5) выражение

$$f = \frac{pn}{60},$$

получим

$$\frac{P_{[kW]}}{2p} = \frac{3AS e_s a_i v}{n}. \quad (6)$$

Подставляя значения, близкие к предельным $AS = 500$, $e_s = 25$ V; $a_i = 0,75$; $v = 40$ m/sec, найдем выражение предельной мощности машин постоянного тока

$$P_{[kW]} \leq \frac{1,1 \cdot 10^6}{n},$$

т. е. около

$$\begin{aligned} &1100 \text{ kW при } n = 1000 \text{ об/мин;} \\ &1450 \text{ kW при } n = 750 \text{ об/мин;} \\ &1850 \text{ kW при } n = 600 \text{ об/мин.} \end{aligned}$$

Крупные генераторы постоянного тока обычно соединяются непосредственно с машиной переменного тока, поэтому интересно выяснить соотношение предельных мощностей машин постоянного и переменного токов.

Из предыдущих выражений легко получить значение предельной мощности нормальной машины переменного тока

$$P_{[kVA]} \leq \frac{2,85 \cdot 10^6}{n}.$$

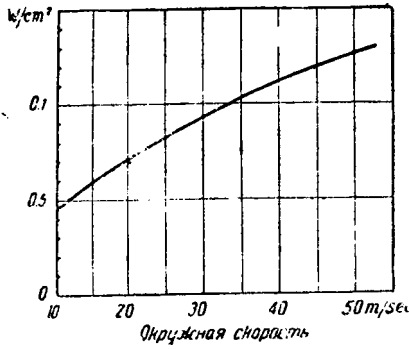


Рис. 2. Допускаемая плотность теплового потока на лобовых частях обмотки статора открытых машин переменного тока. Изоляция — миканит 2 мм

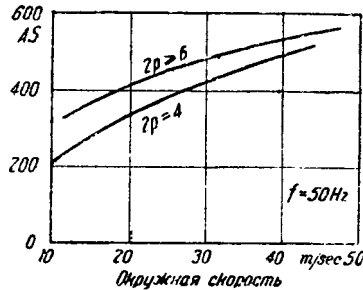


Рис. 3. Линейная нагрузка машин переменного тока

Мы видим, что для машины переменного тока предельная мощность лежит в два с лишним раза выше по сравнению с машиной постоянного тока той же скорости вращения.

В этом заключается причина того, что в крупных моторгенераторах с машиной переменного тока всегда сцепляют две машины постоянного тока.

2. Нагрузки и длина железа машины

В рассмотренных выше соотношениях мы имели связь между мощностью на полюс и нагрузками машины AS и V_{cp} . Однако самые нагрузки машины являются по существу функциями окружной скорости и определяются в основном нагревом и рассеянием. Как известно, величина $AS\Delta \frac{\rho}{100}$, где ρ — удельное сопротивление и Δ — плотность тока в A/mm^2 , представляет собой величину потерь в обмотке в W , приходящихся на 1 cm^2 внутренней поверхности статора.

Таким образом величина $AS\Delta$ до известной степени характеризует нагрев машины, и, очевидно, величина AS может быть увеличена с улучшением теплоотдачи машины, которая в свою очередь связана с окружной скоростью.

На рис. 2 показана допустимая плотность теплового потока на лобовых частях обмотки статора открытых машин переменного тока. Кривая построена по данным одной из иностранных фирм для обмоток с изоляцией миканитом толщиной 2 мм и машин с числом полюсов $2p \geq 6$. На рис. 3 показана зависимость AS от v для открытых хорошо использованных машин переменного тока при $f = 50 Hz$.

Небольшое увеличение AS с ростом числа полюсов при той же окружной скорости обусловлено изменением формы зубца при различных диаметрах. Зависимость AS от v при $f = 50 Hz$ может быть выражена следующими уравнениями:

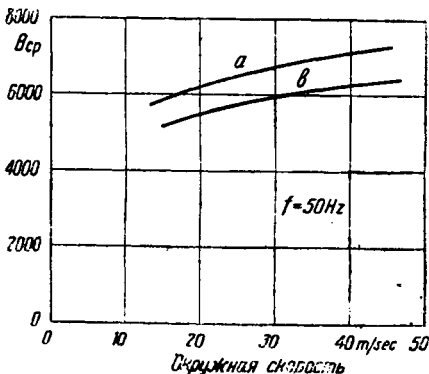


Рис. 4. Средняя индукция в воздухе, отнесенная к длине железа без вентиляционных каналов. а — синхронные, б — асинхронные

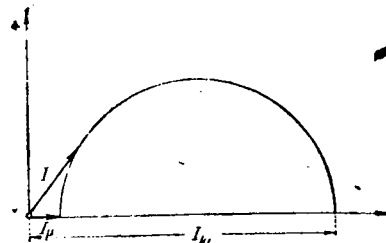


Рис. 5

для $2p = 4$

$$AS = 55 v^{0.6}, \tag{7}$$

для $2p \geq 6$

$$AS = 125 v^{0.4}. \tag{8}$$

Величина магнитной индукции (рис. 4) может быть выражена уравнениями ⁶⁾:

для асинхронных машин

$$V_{cp} \approx 3000 v^{0.2}, \tag{9}$$

для синхронных машин с явновыраженными полюсами и

$$V_{cp} \approx 3400 v^{0.2}. \tag{10}$$

Соотношение длины железа и полюсного деления также оказывается некоторой функцией τ .

Для получения машин с малым рассеянием было бы желательно увеличивать $\frac{L}{\tau}$ при возрастании τ ⁷⁾, однако это приводит к конструктивно неприемлемым соотношениям: машины с большим полюсным делением получаются непомерно длинными, и наоборот. Конструктивные соотношения требуют обратного, и для ходовых машин переменного тока можно указать следующие соотношения:

для асинхронных машин длина железа без каналов

$$L = (4,5 \div 8) \tau^{0.5}, \tag{11}$$

для синхронных машин с явновыраженными полюсами ⁸⁾

$$L = (4 \div 7) \tau^{0.5}. \tag{12}$$

Указанные пределы соответствуют машинам с наименьшей и наибольшей длиной железа при одинаковом диаметре.

На основании уравнений (4), (7), (8), (9), (10) можно найти мощность на полюс. При $f = 50 Hz$ получим:

для асинхронных машин с $2p = 4$

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} = 1,65 \cdot 10^{-4} \tau^{2,8} L; \tag{13}$$

для асинхронных машин с $2p \geq 6$

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} = 3,75 \cdot 10^{-4} \tau^{2,6} L; \tag{14}$$

для синхронных машин с $2p \geq 6$

$$\frac{P_{[kVA]}}{2p} = 4,25 \cdot 10^{-4} \tau^{2,6} L. \tag{15}$$

3. Полюсное деление и рассеяние машины

Рассеяние играет существенную роль в рабочем процессе машины. Особенно велико его значение для асинхронных двигателей, где оно определяет коэффициент

⁶⁾ Индукция V_{cp} отнесена к длине железа без каналов.

⁷⁾ См., например, Vickers. The Induction Motor.

⁸⁾ Гидрогенераторы имеют обычно несколько большую длину железа.

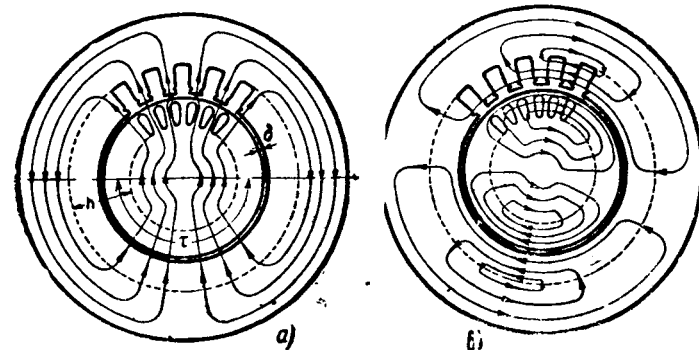


Рис. 6 а — распределение главного потока; б — распределение потоков рассеяния

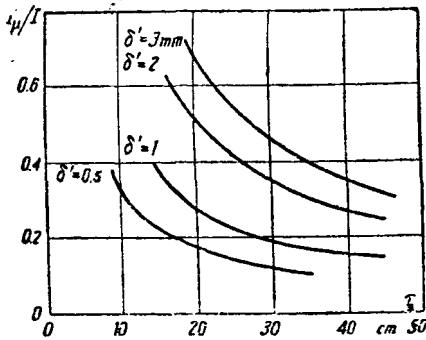


Рис. 7. Отношение намагничивающего тока асинхронного двигателя к нормальному току

мощности⁹⁾ и связанную с ним перегрузочную способность.

На рис. 5 показана упрощенная круговая диаграмма асинхронного мотора.

Максимальный $\cos \varphi$, а косвенно и $\cos \varphi$ при нормальной работе определяются отношением

$$\sigma = \frac{I_{\mu}}{I_{ki}}$$

Очевидно,

$$\sigma = \frac{I_{\mu}}{I_{ki}} \approx \frac{X_k}{X_m}$$

где X_m — реактанс главного потока; X_k — реактанс потоков рассеяния.

На рис. 6а дано примерно распределение главного потока. Реактанс фазы, обусловленный главным потоком, будет

$$X_m \equiv \frac{\omega^2 \tau f}{\delta' \mu}$$

где ω — число витков фазы; $\delta' = k_c \delta$ — приведенный воздушный зазор;

$$\mu = \frac{AW}{AW_L}$$

т. е. отношению ампервитков магнитной цепи к ампервиткам воздушного зазора. На рис. 6б показано примерное распределение силовых линий рассеяния⁹⁾.

В основном поток замыкается через пазы и для него можно написать

$$\Phi_n \equiv \frac{AWh}{\tau k_1}, \text{ (см. рис. 6б)}$$

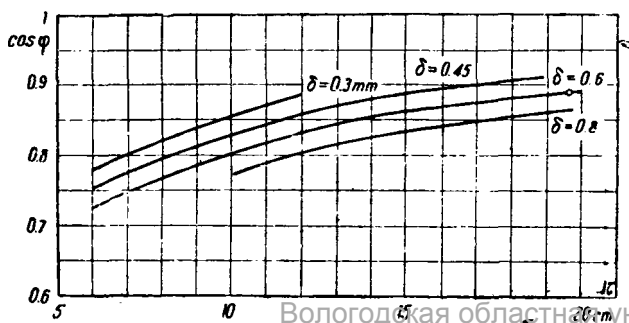
где AW — ампервитки, создающие потоки рассеяния; k_1 — среднее отношение ширины паза к шагу паза для статора и ротора.

Реактанс фазы, обусловленный потоками рассеяния замыкающимися через стенки пазов

$$X_n \equiv \frac{\omega^2 fh}{\tau k_1}$$

Для потоков рассеяния лобовых частей и потоков высших гармоник можно написать зависимость от τ ,

⁹⁾ Для упрощения взяты лишь ток ротора и компенсирующая его слагающая тока статора.



Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksp.ru

близкую к вышеприведенной. Тогда в первом приближении можно написать

$$\sigma = \frac{I_{\mu}}{I_{ki}} \approx \frac{X_k}{X_m} \approx \frac{\omega^2 fh \delta' \mu}{\tau k_1 \omega^2 \tau f} \approx \frac{h \delta' \mu}{k_1 \tau^2}$$

Это соотношение грубо дает зависимость σ от τ . Однако и более строгий вывод с учетом всех составляющих потоков рассеяния приводит к зависимости по своему строению, близкой к вышеприведенной.

Рассмотрим теперь связь между намагничивающим током и полюсным делением машины.

Для намагничивающего тока имеем известное соотношение

$$I_{\mu} = \frac{1,11 AW \cdot 2p}{m \omega f k f_w}$$

Кроме того, имеем

$$AW = \frac{0,88' B_{cp} \mu}{a_i}$$

и

$$\omega = \frac{\pi D A S}{2 m l} = \frac{\tau p A S}{m l}$$

Полагая $f_w = 0,96$, $a_i = 0,69$ и $k = 0,95$, легко прийти к следующей зависимости:

$$\frac{I_{\mu}}{I} = \frac{2,8 \delta' \mu B_{cp}}{A S \tau} \quad (16)$$

Если представить в уравнение (16) значения $A S$ и B_{cp} из уравнений (8) и (9) и принять ходовые значения μ , изменяющиеся в сравнительно узких пределах, то мы можем найти зависимость намагничивающего тока от полюсного деления. Эта зависимость показана на рис. 7. Мы видим, что σ и I_{μ} определяются лишь величиной полюсного деления и не зависят от частоты, влияние которой может сказаться лишь косвенно, отразившись на величинах $A S$, B_{cp} и μ .

Мы нашли связь между I_{μ} , σ и величиной полюсного деления τ , а отсюда легко дать зависимость

$$\cos \varphi = f(\tau, \delta).$$

На рис. 8 и 8а показана эта зависимость, полученная на основании данных нескольких серий асинхронных двигателей. Мы видим, что $\cos \varphi$ асинхронного двигателя определяется не его суммарной мощностью, а зависит от полюсного деления и воздушного зазора.

Для машин синхронных с явновыраженными полюсами и машин постоянного тока величина коэффициента рассеяния также является функцией полюсного деления, однако ввиду недостатка места мы этой зависимости приводить не будем.

4. Потери

1. Механические потери. Для широкораспространенной радиальной системы вентиляции на основании опытных кривых можно дать следующую зависимость механических потерь от полюсного деления:

а) Для асинхронных машин с фазным ротором без добавочного вентилятора, но с сильно развитыми прямыми частями обмотки ротора при $f = 50$ механические потери на полюс равны

$$3,5 \cdot 10^{-4} v^{3,4} \left(\frac{l}{b} + 10 \right) w,$$

где b — ширина пакета железа без канала (см) и v —

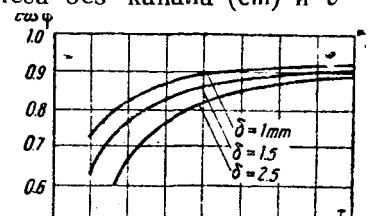


Рис. 8а. Коэффициент мощности асинхронных двигателей с от-

окружная скорость (m/sec). Эта зависимость хорошо подтверждается опытными данными.

Для других частот механические потери нужно изменить в отношении $50 : f$. При $f = 50$ имеем потери на один полюс, равные

$$3,5 \cdot 10^{-4} \tau^{3,4} \left(\frac{L}{b} + 10 \right) \text{ в.} \quad (17)$$

Найдем теперь механические потери в процентном отношении к мощности машины. Выше мы имели величину мощности на полюс для асинхронных машин (14). Механические потери, выраженные в процентах на основании уравнений (14) и (17) для асинхронных машин $2p \geq 6$ при $f = 50 \text{ Hz}$

$$W_{\text{мех}} \% = \frac{3,5 \cdot 10^{-4} \tau^{3,4} \left(\frac{L}{b} + 10 \right)}{3,75 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^{2,6} L \cdot \cos \varphi \cdot 10} = \frac{0,09 \cdot \tau^{0,8} \left(\frac{1}{b} + \frac{10}{L} \right)}{\cos \varphi} \% \quad (18)$$

Если принять ширину пакета $b = 4 \text{ см}$ и соотношение между L и τ согласно (11), то из (18) с небольшими коррективами на основании опыта для асинхронных машин можно найти следующую зависимость при $2p \geq 6$:

v m/sec	$W_{\text{мех}} \cdot \cos \varphi$ %
15	$0,65 \div 0,45$
25	$0,9 \div 0,6$
35	$1,1 \div 0,75$
45	$1,3 \div 0,9$

Большие значения относятся к машинам с меньшей длиной железа, и наоборот.

Для 4-полюсных машин механические потери получаются на 20—30% больше.

б) Для синхронных машин с явно выраженными полюсами механические потери в ваттах на полюс при $f = 50$ равны

$$1,6 \cdot 10^{-3} v^{2,9} \left(\frac{L}{b} + 7 \right). \quad (19)$$

Для других частот потери изменяются в отношении $50 : f$. Из (15) и (19) найдем для $f = 50$

$$W_{\text{мех}} = \frac{0,377 \tau^{0,3} \left(\frac{1}{b} + \frac{7}{L} \right)}{\cos \varphi} \% \quad (20)$$

Если учесть связь между τ и L на основании (12) и выправить полученные данные на основании опыта, то можно найти для синхронных машин с $2p \geq 6$

$$W_{\text{мех}} = \frac{0,8 \div 0,6}{\cos \varphi} \%.$$

Большой предел относится к машинам с меньшей длиной железа, и наоборот. Зная $\cos \varphi$ машины, легко найдем ее механические потери.

2. Потери в железе. На рис. 9 показана часть листа железа. Потери в железе складываются из потерь в ярме и потерь в зубцах (для упрощения расчета пульсационные потери можно отнести к потерям в зубцах, соответственно изменив коэффициент потерь).

а) Потери в зубцах с достаточным приближением можно считать по среднему сечению. Средняя ширина зубца

$$z = \frac{t B_{cp}}{k_2 B_z \alpha_i}$$

Здесь B_z — индукция в среднем сечении зубца,

$$\alpha_i = \frac{B_{cp}}{B_{\text{max}}}$$

Высота зубца h_z может быть принята примерно пропорциональной полюсному делению:

$$h_z \approx C_1 \tau.$$

Потери в железе определим для одного полюсного деления. Число зубцов на полюс

$$Q_1 = \frac{\tau}{t}.$$

Объем железа зубцов на полюс

$$V_z = Q_1 h_z z L k_2 = \frac{\tau C_1 \tau t B_{cp} L k_2}{t k_2 B_z \alpha_i} = \frac{C_1 \tau^2 B_{cp} L}{B_z \alpha_i}.$$

Потери в зубцах

$$W_z \approx k_z V_z B_z^2,$$

где k_z — коэффициент, зависящий от сорта железа и частоты.

Из этих уравнений можно найти

$$W_z \approx \frac{k_z C_1 \tau^2 B_{cp} L B_z^2}{B_z \alpha_i} \approx k_z \frac{C_1}{\alpha_i} \tau^2 L B_{cp} B_z.$$

Для ярма найдем (рис. 9)

$$h_j = \frac{\tau B_{cp}}{2 B_j k_2},$$

где B_j — индукция в ярме,

Объем ярма на полюс

$$V_j \approx h_j L k_2 \tau C_2,$$

где

$$C_2 = \frac{D_j}{D}.$$

Потери в ярме

$$W_j \approx k_j V_j B_j^2$$

Сопоставляя эти выражения, найдем

$$W_j \approx \frac{k_j \tau B_{cp} L k_2 \tau C_2 B_j^2}{2 B_j k_2} \approx k_j \frac{C_2}{2} \tau^2 L B_{cp} B_j.$$

Потери в железе на полюс будут

$$W_{\text{жс}} \approx W_z + W_j \approx \tau^2 L B_{cp} \left[k_z \frac{C_1}{\alpha_i} B_z + k_j \frac{C_2}{2} B_j \right].$$

Для определенного сорта железа и частоты величина, стоящая в скобках, почти неизменна, и потому можно приближенно считать

$$W_{\text{жс}} \approx A \tau^2 L B_{cp},$$

где A — постоянная.

Сопоставляя это выражение с выражением (1) и (2), найдем процентные потери в железе

$$W_{\text{жс}} \% = \frac{W_{\text{жс}} \cdot 100}{\frac{P_{[\text{kVA}]}}{2p} \cos \varphi \cdot 10^3} =$$

$$= \frac{A \tau^2 L B_{cp} f}{5 \cdot 10^{-8} k B_{cp} A S L \cdot 4 \tau^2 f^2 \cos \varphi \cdot 10} \%.$$

или

$$W_{\text{жс}} = \frac{C}{A S \cos \varphi} \% \quad (21)$$

Несмотря на сделанные нами допущения, совпадение уравнения (21) с опытом получается хорошим.

Просчет нескольких десятков машин наших и иностранных заводов мощностью от нескольких киловатт до нескольких мегаватт позволил установить следующие константы: для динамной стали толщиной 0,5 мм и с потерями 3,5 W/kg при $B = 10000$ и $f = 50$ для асинхронных машин с ползакрытыми пазами $C =$

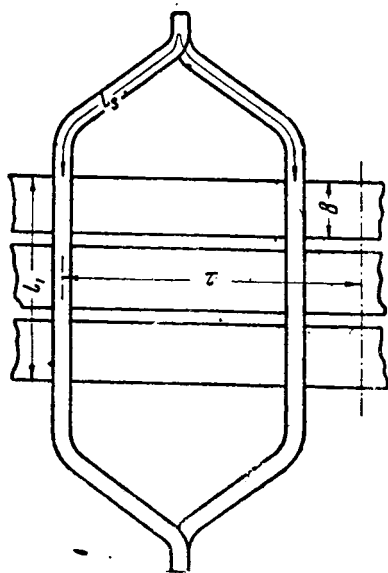


Рис. 10

$= 950 \div 1100$. Для синхронных машин с явно выраженными полюсами при холостом ходе $C = 600 \div 800$.

Для машин постоянного тока возможно применение той же формулы, однако отклонения будут несколько больше, чем для машин переменного тока, благодаря непостоянству частоты намагничивания железа.

3. Потери в меди. Как известно, потери в обмотке выражаются уравнением:

$$W_m' = \pi D A S \Delta l_{cp} \frac{\rho}{100} W, \quad (22)$$

где l_{cp} — средняя длина проводника в сантиметрах. Для средней длины проводника можно написать (рис. 10)

$$l_{cp} = l_1 + l_2 = \lambda L + \beta \tau,$$

где

$$\lambda = \frac{l_1}{L}$$

— отношение полной длины железа к длине железа без каналов:

$$\beta = \frac{l_2}{\tau}$$

— отношение длины лобовой части к полюсному делению.

При ширине пакета $b = 4$ и канала 1 см можно считать

$$\lambda = \frac{4+1}{4} = 1,25.$$

Примем

$$\frac{L}{\tau} = \gamma; \quad (23)$$

тогда

$$l_{cp} (\lambda \gamma + \beta) \tau. \quad (24)$$

Потери в меди на полюс на основании (22) будут

$$W_m = \frac{W_m'}{2p} = \tau A S \Delta l_{cp} \frac{\rho}{100}. \quad (25)$$

Процентные потери в меди

$$\frac{W_m \cdot 100}{\frac{P_{[кВт]} \cdot 10^3}{2p} \cos \varphi} = \frac{W_m}{\frac{P_{[кВА]} \cdot 10^3}{2p} \cos \varphi} \cdot 10$$

Тогда из выражений (1), (2), (23), (24) и (25) найдем потери в обмотке

$$W_m = \frac{10^6 \Delta \rho}{v B_{cp} \cos \varphi} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right) \%. \quad (26)$$

Эта формула пригодна для машин постоянного и переменного токов. Посмотрим, в каких пределах изменяются отдельные величины.

а) Статор машин переменного тока. Для обмотки статора машин переменного тока с открытым пазом и укороченным шагом можно принять:

$$\begin{aligned} \text{для асинхронных } l_2 &= 20 \text{ см} + 1,1 \tau, \\ \text{для синхронных } l_2 &= 20 \text{ см} + 0,9 \tau. \end{aligned}$$

Тогда на основании (11) и (12), и принимая $\lambda = 1,25$, можно найти для асинхронных машин и синхронных машин с явно выраженными полюсами

$$\lambda + \frac{\beta}{\gamma} = 3,5 \div 2,5,$$

причем больший предел относится к машинам с меньшей длиной железа.

Считая при $t = 75^\circ \text{C}$, для меди $\rho = 0,0213$ для машин переменного тока процентные потери в меди статора будут

$$W_m = \frac{(7,5 \div 5,3) 10^4 \Delta}{v B_{cp} \cos \varphi} \%.$$

б) Фазовые роторы асинхронных машин. Потери в меди ротора асинхронных машин могут быть подсчитаны по формуле (26) с той разницей, что $\cos \varphi$ должен учитывать два фактора: 1) сдвиг фаз между током и напряжением ротора; 2) падение напряжения в статоре. С достаточным приближением можно выразить эффективный $\cos \varphi$ ротора, учитывающий оба эти фактора,

$$\cos \varphi_{эфф} = 1 - \frac{1 - \cos \varphi}{2}.$$

Длину лобовой части стержневой обмотки фазового ротора можно выразить следующим образом:

$$l_2 = 10 \text{ см} + 1,1 \tau.$$

Отсюда найдем значение $\lambda + \frac{\beta}{\gamma}$, которое оказывается в среднем равным $3,0 \div 2,25$. Тогда потери в меди фазового ротора будут

$$W_{mp} = \frac{(6,4 \div 4,8) \cdot 10^4 \Delta}{v B_{cp} \cos \varphi_{эфф}} \%$$

в) Короткозамкнутые роторы асинхронных машин. Можно доказать, что сопротивление замыкающего кольца беличьей клетки соответствует составлению лобовой части обмотки с длиной, равной $l_2 = \frac{2}{\pi} \tau$ (если принять средний диаметр кольца равным диаметру ротора). Принимая плотность тока в кольце равной плотности тока в стержне, получим для беличьей клетки $\beta = \frac{2}{\pi}$.

Учитывая наличие выступающих частей стержней с каждой стороны в Δl_2 см, получим по аналогии с (26) для обмотки короткозамкнутого ротора

$$W_{мкзр} = \frac{10^6 \Delta \rho}{v B_{cp} \cos \varphi_{эфф}} \left(\lambda + \frac{2 \Delta l_2}{L} + \frac{2}{\pi \gamma} \right) \%. \quad (27)$$

Можно принять длину прямых частей стержней

$\Delta l_2 = 2,5 \text{ см}$	при $\tau = 15 \text{ см}$
3,0	25
3,5	35
4,0	45

Пределы длины железа для средних и больших машин с короткозамкнутым ротором примерно те же, что и для фазных.

Тогда при $\rho = 0,0213$ на основании (11) и (27) найдем потери в медной клетке ротора

$$W_{мкзр} = \frac{(5 \div 4) \cdot 10^4 \Delta}{v B_{cp} \cos \varphi_{эфф}} \%.$$

д) Потери в меди машин постоянного тока. Якорь машин постоянного тока по конструкции обмотки и соотношениям близок к фазовому ротору асинхронной машины, поэтому для него можно принять по-

$$W_m = \frac{(6,5 \div 5) \cdot 10^4 \Delta}{v B_{cp} \cos \varphi} \%.$$

10) Более короткая лобовая часть обусловлена меньшим отноше-

е) Обмотка возбуждения синхронной машины. В синхронных машинах ампервитки ротора определяются устойчивостью работы машины, в связи с чем должно быть обеспечено нужное соотношение ампервитков якоря и ампервитков возбуждения, что, как известно, достигается изменением величины воздушного зазора.

Ампервитки реакции якоря на полюс определяются формулой

$$\frac{AW_a}{2p} = \frac{0,9I_w m f_w f_k}{2p}$$

Линейная нагрузка

$$AS = \frac{2I_w m}{2p \tau}$$

откуда

$$\frac{AW_a}{2p} = 0,45 f_w f_k AS \tau$$

Полагая $f_w = 0,96$ и $f_k = 0,95$, получим

$$\frac{AW_a}{2p} \approx 0,4 \tau AS. \tag{28}$$

Обозначим через T отношение числа ампервитков возбуждения на полюс при нагрузке AW_m к числу ампервитков реакции якоря AW_a ; через w'' — число витков обмотки возбуждения на полюс; l_{cp} — среднюю длину провода обмотки возбуждения в сантиметрах; I_m — ток возбуждения; Δ_m — плотность тока в обмотке возбуждения (A/mm^2); q — сечение проводника (mm^2).

Потери в обмотке возбуждения на полюс

$$\frac{W_m}{2p} = \frac{2w'' l_{cp}'' \rho I_m^2}{100q} = \frac{2l_{cp}'' \rho AW_m \Delta_m}{100} = 2l_{cp}'' \frac{\rho \Delta_m \cdot 0,4 \tau AS T}{100}$$

Средняя длина провода

$$l_{cp}'' = l_1 + l_2'' = \lambda L + l_s'' = \lambda \tau + \beta \tau$$

Тогда потери в меди на полюс будут

$$\frac{W_m}{2p} = 8 \cdot 10^{-3} \rho \Delta_m AS T^2 (\lambda + \beta)$$

Взяв выражение мощности на полюс из уравнения (2) и подставляя $\tau = \frac{50v}{f}$, найдем потери в меди ротора синхронной машины в процентах от мощности машины:

$$W_m = \frac{0,8 \cdot 10^6 \rho \Delta_m T}{B_{cp} v \cos \varphi} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right) \% \tag{29}$$

эта формула по своему строению вполне сходна с предыдущими.

На основании просчета ряда синхронных машин, работающих с $\cos \varphi = 0,8$, найдено соотношение ампервитков, даваемое рис. 11.

Отношение длины лобовой части обмотки возбуждения к полюсному делению на основании выполненных конструкций можно принять

$$\beta = \frac{l_s''}{\tau} = 0,75.$$

Полагая далее $\rho = 0,0213$ и взяв длину железа согласно (12) и значения T из рис. 11, получим

$$W_m = \frac{(7,3 \div 5,8) 10^4 \Delta_m}{v B_{cp} \cos \varphi} \%.$$

Если учесть потери в возбuditеле, приняв $\eta_{возб} = 0,8$, то мы получим полные потери на возбуждение синхронной машины

$$W_m = \frac{(9,2 \div 7,2) \cdot 10^4 \Delta_m}{v B_{cp} \cos \varphi}$$

(большие значения относятся к машинам с меньшей длиной железа)

в) Обмотки возбуждения машин постоянного тока. Для машины постоянного тока

$$AW_a = 0,5 \tau AS.$$

Тогда получаем потери в обмотке возбуждения

$$W_m = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot \rho \Delta_m T}{B_{cp} v} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right) \% \tag{30}$$

Для машин постоянного тока обычно

$$T = \frac{AW_m}{AW_a} = 1,1 \div 1,4;$$

тогда при $\rho = 0,0213$ получаем приблизительно

$$W_m = \frac{(4 \div 3) \cdot 10^4 \Delta_m}{v B_{cp}} \%.$$

3. Дополнительные потери. Дополнительные потери для асинхронных машин согласно норм принимаются равными 0,5%. Для синхронных машин дополнительные потери могут быть выражены как функция полюсного деления.

Ввиду ограниченности места приводить значения дополнительных потерь не будем.

5. Коэффициент полезного действия

Выше мы получили отдельные потери в зависимости от окружной скорости и основных нагрузок машины. Но самые нагрузки, как мы видели, также связаны с величиной окружной скорости, поэтому к. п. д. является ее функцией.

а) Асинхронные машины с фазовым ротором. Выше мы нашли, что потери в меди статора

$$W_m = \frac{(7,5 \div 5,3) \cdot 10^4 \Delta}{v B_{cp} \cos \varphi} \%.$$

Полагая для $f = 50$ $v = \tau$, $B_{cp} = 3000 v^{0,2}$ и считая в среднем $\Delta = 4,75 A/mm^2$, получим потери в меди статора

$$W_m = \frac{122 \div 85}{v^{1,2} \cos \varphi} \%.$$

Потери в обмотке ротора асинхронного двигателя

$$W_{mp} = \frac{(6,4 \div 4,8) \cdot 10^4 \Delta}{v B_{cp} \left(1 - \frac{1}{2} \cos \varphi \right)} \%.$$

Полагая плотность тока $\Delta = 4,5$ и приблизительно

$$\cos \varphi_{эфф} \approx 1 - \frac{1 - \cos \varphi}{2} \approx 1,15 \cos \varphi,$$

получим

$$W_{mp} = \frac{80 \div 60}{v^{1,2} \cos \varphi} \%.$$

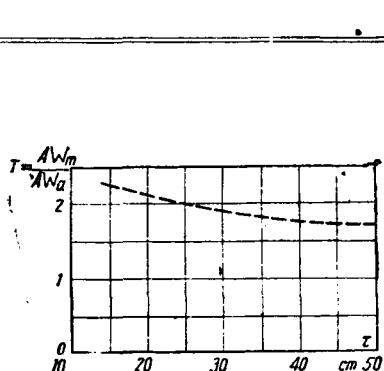


Рис. 11. Отношение ампервитков возбуждения к ампервиткам реакции якоря синхронных моторов

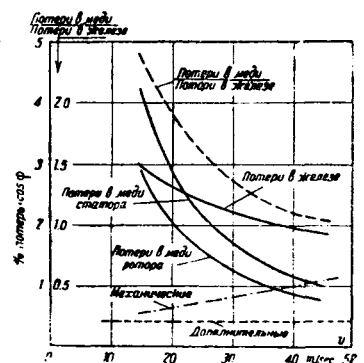


Рис. 12. Распределение потерь асинхронного двигателя с фазовым ротором. Принято $f = 50$; $2p \geq 6$, плотность тока статора

Для потерь в железе машин с открытыми пазами мы имели в среднем

$$W_{ж} = \frac{1050}{AS \cos \varphi} \%.$$

Полагая для машин с $2p \geq 6$ линейную нагрузку $AS = 125 v^{0,4}$, получим

$$W_{ж} = \frac{8,5}{v^{0,4} \cos \varphi} \%.$$

Эти формулы дают потери для машин с предельными длинами железа.

Для упрощения возьмем значения потерь для средней длины железа и тогда можем построить зависимость отдельных потерь от полюсного деления (рис. 12). Для машин с наименьшей и наибольшей длиной железа отклонения в потерях составляют примерно $\pm 15\%$. Для того чтобы исключить влияние коэффициента мощности, показано произведение процентных потерь на $\cos \varphi$. Там же нанесено отношение потерь в меди статора и ротора к потерям в железе. Кривые показывают сильное изменение потерь в меди и сравнительно небольшое изменение потерь в железе при различных v , а это приводит к изменению соотношения потерь в меди и железе и влияет на протекание кривой к. п. д. в зависимости от нагрузки: в машинах с большой окружной скоростью к. п. д. в области перегрузок сохраняет или увеличивает свое значение, в машинах с малым полюсным делением при перегрузках к. п. д. быстро падает.

Мы видим, что распределение потерь между медью и железом вращающихся машин существенно отличается от распределения потерь в трансформаторе. В то время как в трансформаторе соотношение потерь может быть выдержано независимым от размеров трансформатора, во вращающихся машинах это соотношение сильно меняется в зависимости от окружной скорости. Одна из причин этого — большая роль коэффициента рассеяния, заставляющего изменять соотношение между AS и B_{cp} . На рис. 13 показаны аналогичные кривые для синхронных машин.

Отметим, что кривые рис. 12 и 13, иллюстрирующие значение окружной скорости, дают лишь ориентировочные цифры. В действительности не удастся сохранить плотность тока постоянной, значения индукции также могут отклоняться от принятых, поэтому для получения точных данных следует пользоваться выведенными формулами, подставляя в них нагрузки, соответствующие рассматриваемому случаю.

6. Вес активных материалов.

а) Медь. Наиболее просто выражается вес меди. Как известно, джоулевы потери обмотки определяются формулой

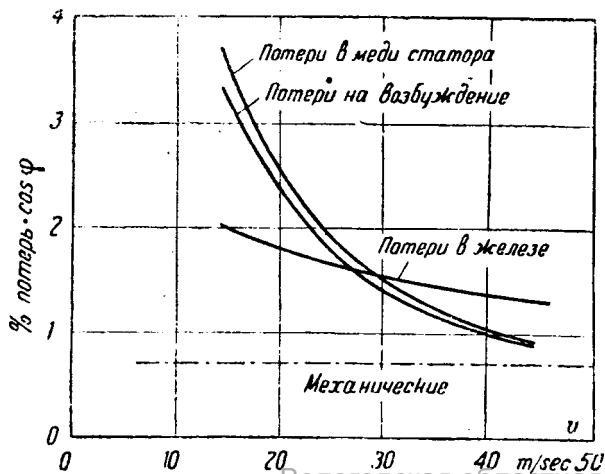


Рис. 13. Распределение потерь синхронного двигателя.

$$W_{ж} = \frac{1000 \rho \Delta^2 G_{ж}}{\gamma_1} W,$$

где $G_{ж}$ — вес обмотки (kg); γ_1 — удельный вес. Потери в обмотке машины

$$W_{ж} = W_{ж\%} \frac{P_{[kW]} \cdot 10^3}{10^2};$$

$$G_{ж} = \frac{W_{ж} \gamma_1 10^{-3}}{\rho \Delta^2} = W_{ж\%} \frac{P_{[kW]} \gamma_1 \cdot 10^{-2}}{\Delta^2 \rho}.$$

Вес обмотки на 1 kW

$$\frac{G_{ж}}{P_{[kW]}} = \frac{W_{ж\%} \gamma_1 \cdot 10^{-2}}{\rho \Delta^2}. \quad (31)$$

На основании (26) получаем

$$\frac{G_{ж}}{P_{[kW]}} = \frac{10^6 \Delta \rho \gamma_1 \cdot 10^{-2}}{v B_{cp} \cos \varphi \Delta^2 \rho} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right) = \frac{\gamma_1 \cdot 10^4}{v B_{cp} \cos \varphi \Delta} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right). \quad (32)$$

Для меди имеем

$$\frac{G_{ж}}{P} = \frac{8,9 \cdot 10^4}{v B_{cp} \Delta \cos \varphi} \left(\lambda + \frac{\beta}{\gamma} \right) \text{ kg/kW}.$$

На основании соотношений длин железа и лобовых частей согласно предыдущему получим для обмоток статора машин переменного тока вес меди

$$\frac{G_{ж}}{P} = \frac{(3,2 \div 2,2) \cdot 10^5}{v B_{cp} \Delta \cos \varphi} \text{ kg/kW}$$

для генераторов. Для моторов мы должны отнести вес меди к мощности на валу, т. е. учесть к. п. д. Если доложить в среднем $\eta = 0,9$, то получим

$$\frac{G_{ж}}{P} = \frac{(3,5 \div 2,5) \cdot 10^5}{v B_{cp} \Delta \cos \varphi} \text{ kg/kW}.$$

Совершенно аналогично на основании формулы (31) и формул, определяющих процент потерь в меди, можно получить величины расхода меди для обмоток ротора асинхронного мотора, обмоток возбуждения и пр. Все эти формулы имеют одинаковое строение и показывают, что расход меди обратно пропорционален окружной скорости, индукции в воздухе, плотности тока и $\cos \varphi$.

б) Железо. Выше мы нашли формулу для потерь в железе

$$W_{ж} = \frac{C}{AS \cos \varphi} \%.$$

Поскольку насыщение железа колеблется в сравнительно узких пределах и процент отходов при штамповке также изменяется незначительно, можно грубо принять вес железа

$$\frac{G_{ж}}{P} \approx \frac{F}{AS \cos \varphi} \text{ kg/kW}. \quad (33)$$

Значение F было определено просчетом многих машин мощностью от 2 kW до 5 MW наших и иностранных заводов.

Вес железа подсчитывался, включая вес материала, занимавшего место пазов, но не включая обрезков по краям листов. Соответствующие значения F оказались зависящими от v . Они показаны на рис 14.

Отмечаем, что формула (33) дает лишь приближенные значения.

Рис. 15 показывает примерный расход железа и меди асинхронного мотора, определенный согласно уравнений

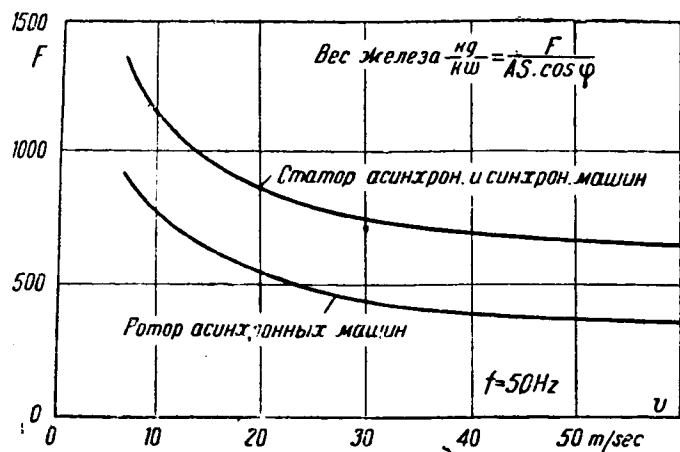


Рис. 14

7. Полюсное деление и окружная скорость

Нам удалось выразить свойства машин в функции полюсного деления τ и окружной скорости v .

Просматривая выведенные формулы, легко заметить различие между τ и v (хотя при $f=50$ числовые значения v и τ совпадают): удельные потери и расход материала определяются окружной скоростью, в то время как величины, связанные с магнитными потоками (коэффициент рассеяния, намагничивающий ток), зависят только от величины полюсного деления. И вполне понятно: некоторый объем материала с заданными удельными нагрузками (плотность тока, индукция), взаимодействуя с другим объемом, перемещается относительно него со скоростью v и развивает тяговое усилие Q . Это усилие и потери энергии в материале не зависят от скорости v ¹¹⁾, в то время как работа, совершаемая в единицу времени, пропорциональна скорости.

Отсюда ясно, что мощность, затрачиваемая на покрытие потерь, отнесенная к полной мощности Qv , развиваемой объемом (процент потерь), и удельный расход материала будут обратно пропорциональны скорости движения v и не будут зависеть от абсолютных размеров для данного объема (τ ¹²⁾). Наоборот, величины магнитных потоков не зависят от скорости перемещения объема, а связаны лишь с его размерами, и потому в выражения σ и I_m входит не скорость v , а геометрический размер τ .

8. Влияние частоты. Вышесказанное может быть иллюстрировано соотношениями между частотой и основными параметрами машины. Проследим, например, изменение потерь в меди при увеличении частоты в 2 раза.

Мы имеем процентные потери в меди

$$W_m = \frac{10^6 \Delta p}{v B_{cp} \cos \varphi} \left(\lambda \pm \frac{\beta}{\gamma} \right) \% .$$

Если спроектировать машину на ту же мощность и ту же скорость вращения, сохранив в первом приближении длину и диаметр, а следовательно, и окружную скорость, мы должны будем считаться с изменением величины $\lambda \pm \frac{\beta}{\gamma}$.

При увеличении частоты значение $\lambda = \frac{l_1}{L}$ не изменится (здесь l_1 — полная длина железа; L — длина железа без

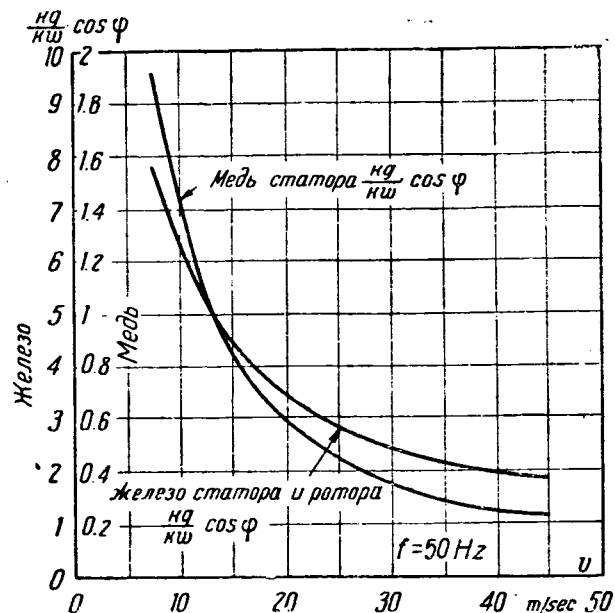


Рис. 15. Удельный расход активных материалов асинхронного двигателя. Принято $2p \geq 6$, плотность тока 4,75 А/мм².

каналов)¹³⁾. Величина $\beta = \frac{l_s}{\tau}$, где l_s — длина лобовой части обмотки благодаря уменьшению τ возрастет, и, наконец, величина $\gamma = \frac{L}{\tau}$ увеличится приблизительно в 2 раза. В результате $\lambda \pm \frac{\beta}{\gamma}$ уменьшится примерно на 15%.

Однако при увеличении частоты придется снизить индукцию в воздухе и потери в меди, а следовательно, и удельный расход меди изменится незначительно. Это подтверждает, что основным фактором, определяющим удельный расход материалов и потери, является окружная скорость.

Заключение

Ряд выведенных формул дает простые соотношения между основными параметрами машин.

Предложенные формулы не претендуют на замену формул, обычно применяющихся при расчетах; они лишь наглядно показывают, в каком направлении необходимо идти для получения желательных свойств машины.

Кроме того, они позволяют оценить характеристики машины, не производя ее расчета, а лишь выбрав основные нагрузки, что, несомненно, представляет значительные удобства.

Рассматривая выведенные формулы и соотношения, мы убедились в том, что окружная скорость и полюсное деление определяют все основные свойства машин.

Полюсное деление и окружная скорость тесно связаны между собой, однако значение их неравноценно: окружная скорость определяет удельный расход материалов и удельные потери, в то время как величина полюсного деления обуславливает величину коэффициента рассеяния, а в асинхронных машинах совместно с воздушным зазором — ток холостого хода и $\cos \varphi$.

Мы видели, что с увеличением окружной скорости улучшаются показатели машины и снижается удельный расход материалов. Мы убедились в том, что для получения ясного представления о свойствах машины достаточно указать ее окружную скорость (а для асинхронных машин — дополнительно воздушный зазор) и что, таким образом, окружная скорость и полюсное деление являются теми параметрами, от которых зависят все основные свойства электрических машин постоянного и переменного токов.

¹¹⁾ Отвлекаясь от вторичных явлений, как, например, пульсационные потери.

¹²⁾ Опять-таки, отвлекаясь от вторичных явлений, связанных с изменением конструкции отдельных частей, при изменении их размеров (например отношение длины лобовой части витка обмотки

Определение основных размеров электрических машин

Инж. И. И. Славцев
Москва

Машинная постоянная

Использование активного материала (главным образом железа) электрических машин вращательного движения характеризуется так называемой машинной постоянной.

Арнольд ввел величину, которую можно обозначить через C_A :

$$C_A = \frac{D^2 l_i n}{P} \left[\frac{\text{см}^3 \times \text{об/мин}}{\text{kVA}} \right].$$

Несколько удобнее для дальнейшего сравнения пользоваться аналогичной величиной, которую обозначим через C_A' , когда линейные размеры машины измеряются в метрах вместо сантиметров,

$$C_A' = \frac{D^2 l_i n}{P} = C_A \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{м}^3 \times \text{об/мин}}{\text{kVA}} \right].$$

Интерпретация этой величины несколько своеобразна. Надо представить себе прямоугольную призму с квадратными основаниями, с шириной стороны D и длиной ребер l_i , которую надо вращать вокруг оси, проходящей через центр оснований. Отношение объема этой призмы, умноженного на число оборотов в минуту n к мощности в киловольтамперах (или киловаттах), и является этой постоянной.

Рейхель ввел обратную величину:

$$C_{Reich} = \frac{P}{D^2 l_i n} = \frac{1}{C_A'} \left[\frac{\text{kVA}}{\text{м}^3 \times \text{об/мин}} \right].$$

Рихтер применяет несколько иную машинную постоянную:

$$C_{Richt} = \sigma_s = \frac{P}{\pi^2 n' D^2 l_i} = \frac{6,1P}{n D^2 l_i} = 6,1 C_{Reich} \left[\frac{\text{kVA}}{\text{м}^2 \times \text{м/сек}} \right].$$

Интерпретация этой величины более естественна. Здесь n' — число оборотов в секунду вращающейся части машины. Можно написать

$$\sigma_s = \frac{P}{\pi^2 n' \cdot D^2 l_i} = \frac{P}{\pi D l_i \cdot \pi D n'} = \frac{P}{Fv} \left[\frac{\text{kVA}}{\text{м}^2 \times \text{м/сек}} \right],$$

где F — поверхность машины по воздушному зазору (м^2), а v — окружная скорость поверхности (м/сек). Машинную постоянную Рихтера можно поэтому назвать поверхностно-скоростной удельной мощностью машины.

Соотношение этих машинных постоянных для значений, встречающихся в практике машиностроения, видно из прилагаемой таблицы:

C_A	C_A'	C_{Reich}	$C_{Richt} = \sigma_s$
$120 \cdot 10^4$	1,20	0,833	5,08
$100 \cdot 10^4$	1,00	1,00	6,10
$80 \cdot 10^4$	0,80	1,25	7,62
$60 \cdot 10^4$	0,60	1,67	10,2
$40 \cdot 10^4$	0,40	2,50	15,3
$20 \cdot 10^4$	0,20	5,00	30,5

Машинная постоянная играет большую роль в ходе исторического развития электромашиностроения, и мы видим, как она принимает постепенно более ясные очертания.

как можно пользоваться машиной постоянной Рихтера σ_s при определении основных размеров электрических машин.

Определение основных размеров электрических машин

Машинная постоянная σ_s введена Рихтером в форме

$$\sigma_s = \frac{N_i}{\pi^2 n' D^2 l_i}, \quad (1)$$

где n' — число оборотов машины в сек.; D и l_i — линейные ее размеры в м. Но в практике машиностроения при расчете машин скорость вращения выражают обычно числом оборотов в минуту, а линейные размеры измеряются в сантиметрах. Не меняя числового значения этой машинной постоянной, можно представить ее в форме

$$\sigma_s = \frac{N_i \cdot 10^6}{\pi^2 \frac{n}{60} D^2 l_i} = \frac{6,1 N_i \cdot 10^6}{n D^2 l_i} \left[\frac{\text{kVA}}{\text{м}^2 \times \text{м/сек}} \right], \quad (2)$$

где n — число оборотов в минуту, D и l_i — линейные размеры в см.

В обоих приведенных выше выражениях N_i — „внутренняя“ мощность машины в kVA (или при постоянном токе в kW).

Если в последнее выражение ввести

$$l_i = \lambda \tau = \lambda \frac{\pi D}{2p}, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{l_i}{\tau}$, то для диаметра якоря получаем

$$D_{[\text{cm}]} = 15,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{p}{\lambda \sigma_s} \frac{N_i}{1000}} = 15,7 \sqrt[3]{\frac{p}{\lambda} \cdot \frac{N_i \cdot 1000}{\sigma_s}}. \quad (4)$$

Здесь $N_{i \cdot 1000}$ — приведенная к 1000 об/мин — „внутренняя“ мощность машины.

Определив диаметр якоря, можно определить с помощью выражения (3), где величиной λ уже задаемся ранее, и расчетную длину его l_i .

Рассмотрим несколько ближе отдельные величины, входящие в выражение (4).

Машинная постоянная σ_s в зависимости от электромагнитных параметров и обмоток машины.

Машинная постоянная Рихтера σ_s определяется уравнением

$$\sigma_s = f_E f_w f_w A S \alpha_i B_i \cdot 10^{-5} = f_E f_w f_w \frac{AS}{10} \alpha_i \frac{B_i}{10^4}, \quad (5)$$

где f_E — коэффициент формы кривой напряжения. В машинах переменного тока с синусоидальной формой кривой напряжения $f_E = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ (в машинах постоянного тока $f_E = 1$); f_w — обмоточный коэффициент (для машин трехфазного тока $f_w = 0,96$. Машины однофазного тока, редко встречающиеся в практике настоящего времени, здесь не рассматриваются. Для машин постоянного тока $f_w = 1$).

В машинах не с диаметрными обмотками, а с обмотками, имеющими укороченный шаг, максимальный магнитный поток, пронизывающий виток, будет меньше

магнитный поток, пронизывающий виток, будет меньше

- том укорочения шага обмотки f_w . Этот же коэффициент учитывает и влияние сдвига щеток от нейтральной зоны в машинах постоянного тока. Но в современных реверсивных машинах постоянного тока, имеющих дополнительные полюса, щетки располагаются всегда в нейтральной зоне. При определении коэффициента f_w мы не сделаем большой относительной погрешности даже для машин постоянного тока, если будем рассматривать форму кривой поля машины как синусоидальную. При этом условии

$$f_w = \sin \frac{\pi W}{2 \tau}$$

где W — ширина катушки. Укорочение шага обмотки обычно применяется не слишком большим. Полагая $W_{\min} = 0,8 \tau$, имеем $f_w \approx 0,96$. Укороченный шаг применяется в американских обмотках переменного тока и почти всегда в обмотках машин постоянного тока¹⁾.

Величины $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$ и $\lambda = \frac{l_i}{\tau}$ можно найти в курсах по проектированию электрических машин.

„Внутренняя“ мощность машины N_i

Эта мощность всегда несколько больше мощности на клеммах генератора или на валу мотора. Понятие о ней введено также Рихтером

$$N_i = mEI_A,$$

где m — число фаз; E — э. д. с. при нагрузке; I_A — ток в якоре (или статоре).

Для машины постоянного тока (генератора или мотора) Рихтер дает

$$N_i \approx \frac{1 + \eta}{2 \eta} N, \quad (6)$$

где η — к. п. д., N — полезная мощность машины (на клеммах генератора или на валу мотора) в киловаттах. Для асинхронных двигателей подводимая мощность

$$N_1 = \frac{N}{\eta \cos \varphi} \text{ kVA.}$$

„Внутренняя“ мощность может быть представлена в виде

$$N_i \approx 0,97 \frac{1 + \eta}{2 \eta} \frac{N}{\cos \varphi} \text{ kVA,} \quad (7)$$

где N — полезная мощность на валу двигателя в киловаттах; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности подводимой к двигателю энергии; коэффициент 0,97 учитывает падение напряжения в обмотке статора. Для малых двигателей может быть взят несколько меньше.

Для синхронных генераторов Рихтер дает уравнение

$$N_i \approx \left(1 + \frac{X_\sigma I_N}{U_N} \sin \varphi \right) N, \quad (8)$$

¹⁾ В формуле для машинной постоянной σ_s , данной проф. Рихтером, коэффициент f_w отсутствует, но понятие о нем в значительно расширенном виде дается в его книге „Обмотки электрических машин“. См. также книгу Бергера, Обмотки машин переменного тока, Гостехиздат, 1933.

где N — кажущаяся мощность на клеммах генератора в киловольт-амперах, X_σ — сопротивление рассеяния машины в омах, I_N и U_N — номинальные ток и фазовое напряжение машины. $\varphi > 0$ при отстающем токе, что соответствует перевозбужденному генератору.

Для синхронных двигателей можно принять²⁾

$$N_i \approx \left(1 - \frac{X_\sigma I_N}{U_N} \sin \varphi \right) \frac{N}{\cos \varphi}, \quad (9)$$

где N — полезная мощность на валу мотора в киловаттах, $\varphi > 0$ при отстающем токе, что соответствует недо- возбужденному двигателю.

Обычно синхронные машины работают с перевозбуждением. В этом случае для генераторов $N_{i[\text{kVA}]} > N_{[\text{kVA}]}$;

для двигателей $N_{i[\text{kVA}]} > \frac{N_{[\text{kW}]}}{\cos \varphi}$.

Потерями на трение и в омическом сопротивлении обмоток для синхронных машин можно пренебречь, так как они мало влияют на „внутреннюю“ мощность машины сравнительно с падением напряжения в реактивном сопротивлении ее обмоток.

Иной способ определения основных размеров

Если в уравнении (2) положить

$$l_i = \lambda \tau \text{ и } D = \frac{2p \tau}{\pi} \quad (10)$$

и принять во внимание, что

$$\frac{pn}{60} = f,$$

то для машинной постоянной σ_s получаем

$$\sigma_s = \frac{N_i \cdot 10^6}{4fp \lambda \tau^3}. \quad (11)$$

Отсюда

$$\tau_{[\text{cm}]} = 100 \sqrt[3]{\frac{N_i}{4fp \lambda \sigma_s}}. \quad (12)$$

Пользование уравнением (12) часто удобнее в том отношении, что, найдя величину τ и зная частоту переменного тока f , мы сразу же определяем и окружную скорость на поверхности якоря (ротора или индуктора), пользуясь известным соотношением:

$$v_{[\text{m/sec}]} = \tau_{[\text{cm}]} \frac{f}{50}.$$

Линейные размеры определяются уравнениями (10).

²⁾ Уравнения (7) и (9) у проф. Рихтера не приводятся. Но уравнение (9) согласовано с введенным им понятием „внутренней мощности“ для синхронных генераторов и методом ее определения.

К РАСЧЕТУ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Влияние нагрузки на величину установившегося тока короткого замыкания при несимметричных коротких¹⁾

Инж. Г. Б. Розенберг
Сев.-зап. отд. Теплоэлектропроекта

В предыдущей статье нами было установлено влияние нагрузки на величину установившегося тока к. з. при трехполюсном коротком. Выводы по этому вопросу вкратце сводились к нижеследующим:

1. Эквивалентная схема произвольного узла содержит две ветви (рис. 1): ветвь H , представляющую эквивалентное сопротивление нагрузки, приключенной к здоровым фидерам, и ветвь K фидера, на котором произошло короткое замыкание, причем нагрузка, присоединенная к означенному фидеру (показана пунктиром), шунтирована коротким.

2. При вычислении установившегося тока к. з. учету подлежит только нагрузка, присоединенная к ветви H , так как напряжение на зажимах приемников ветви K равно нулю и, следовательно, эти приемники тока не потребляют.

3. В зависимости от величины остаточного напряжения и рода приводимого в движение механизма двигателя, присоединенные к ветви H , либо тормозятся, переходя на режим короткого, и отключаются защитой, либо продолжают работу при пониженной скорости вращения и изменившемся потреблении тока из сети.

4. Исходя из предпосылки, что всякая система проектируется таким образом, чтобы авария в одной ее части не внесла бы перебоя в работу другой части, можно считать, что все двигатели ветви H продолжают вращаться. Та часть этих двигателей, которая обслуживает приводы с постоянным противодействующим моментом вращения при пониженном напряжении, потребляет ток, превышающий нормальный, двигатели же, обслуживающие приводы вентиляторного и насосного типа, поддерживают работу при токе, меньшем нормального. Приемники с постоянным сопротивлением снижают потребление тока пропорционально снижению напряжения.

Эти противостоящие друг другу факторы дают возможность в тех случаях, когда моторная нагрузка является преобладающей, считать, что ток, потребляемый ветвью H , при коротком в точке K равен току, потребляемому этой ветвью при нормальной работе.

5. Последнее допущение дает возможность в первом приближении заменить нагрузочную ветвь H замкнутым на конце реактантом, величина которого при учете нормальных параметров сети и синуса угла сдвига фаз меж-

ду током и э. д. с. генератора может быть принята равной в среднем 100%.

6. Таким образом нагрузка при трехполюсном коротком, отсасывая некоторый ток, всегда снижает величину установившегося тока к. з., устремляющегося к месту короткого.

Несимметричное короткое в точке K , как это следует из метода симметричных составляющих, может быть представлено по отношению к току прямой последовательности как трехполюсное короткое, только отодвинутое от места действительной аварии на величину комбинированного реактанса обратного и нулевого следования фаз.

Так при однополюсном коротком в точке K схема рис. 1 приобретает вид, изображенный на рис. 2.

Здесь X_{23} — эквивалентное сопротивление обратного следования фаз, а X_{03} — эквивалентное сопротивление нулевого следования фаз.

Если при трехполюсном коротком в основу учета нагрузочной ветви H была положена предпосылка, что остаточное напряжение в питающем ее узле составляет не менее 65–70% нормального, то при этих условиях очевидно, что величина остаточного напряжения для прямого следования фаз будет еще больше.

Так как вращение двигателей поддерживает именно система прямого следования фаз (об этом подробнее ниже), то, следовательно, при несимметричном коротком тем более справедливо положение о необходимости учета отсоса тока ветвью H . Мало того, как по отношению к системе прямого следования точка короткого оказалась отнесенной на некоторый эквивалентный реактанс, то и в узле, где присоединена нагрузка поврежденного фидера (точка K), напряжение прямого следования уже не равно нулю и, следовательно, могут иметь место случаи, когда двигатели, присоединенные и к этому фидеру, также сохраняют вращение и будут потреблять некоторый ток.

Таким образом при несимметричном коротком анализу подлежит роль как нагрузочной ветви H , так и нагрузочной ветви H' , присоединенной к поврежденному фидеру.

Разберем в отдельности, что произойдет при двухполюсном коротком и при однополюсном.

1. Двухполюсное короткое

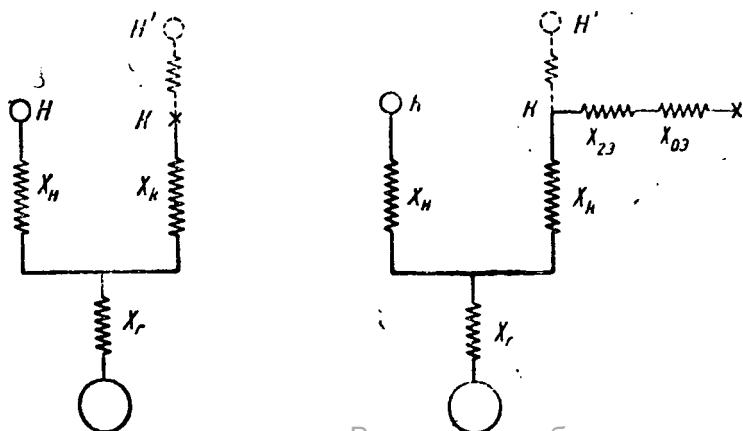
При наступлении установившегося режима диаграмма фазовых напряжений в месте аварии приобретает вид, изображенный на рис. 3, т. е.

$$U_b' = U_c' = -\frac{1}{2} U_a',$$

где U_a' — остаточное напряжение здоровой фазы, а U_b' и U_c' — остаточные напряжения поврежденных фаз.

Разлагая несимметричную систему фазовых напряжений на симметричные составляющие, имеем

$$\begin{aligned} U_{a1}' &= \frac{1}{3} (U_a' + aU_b' + a^2U_c') = \\ &= \frac{1}{3} \left(U_a' - a \frac{U_a'}{2} - a^2 \frac{U_a'}{2} \right) = \\ &= \frac{U_a'}{3 \cdot 2} [2 - (a + a^2)], \end{aligned}$$



¹⁾ Статья является продолжением статьи автора, помещенной в № 17 „Электричество“ за 1933 г.

где a — оператор, равный $-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; так как $a + a^2 = -1$, то

$$U_{a1}' = -\frac{U_{a'}}{2},$$

$$U_{a2}' = \frac{1}{3} (U_{a'} + a^2 U_{b'} + a U_{c}') =$$

$$= \frac{1}{3} (U_{a'} - a^2 \frac{U_{a'}}{2} - a^2 \frac{U_{a'}}{2}) = \frac{U_{a'}}{2},$$

$$U_{a0}' = \frac{1}{3} (U_{a'} + U_{b'} + U_{c}') = \frac{1}{3} (U_{a'} - \frac{U_{a'}}{2} - \frac{U_{a'}}{2}) = 0.$$

Таким образом получается, что векторы системы прямого следования фаз, так же как и векторы системы обратного следования, равны по величине половине остаточного напряжения здоровой фазы; система же нулевого следования отсутствует. Системы прямого и обратного следования фаз создают в двигателях, приключенных к ветви H' , два поля — прямое и обратное.

Влиянием обратного поля можно пренебречь, так как это поле, как известно, почти полностью компенсируется токами, наводимыми им в роторе. Взаимодействуя же с прямым полем ротора двигателей ветви H' могут вращаться, если только развиваемые при этом моменты окажутся достаточными для покрытия противодействующих моментов приводимых механизмов.

Вращающий момент асинхронного двигателя в функции от величины подводимого напряжения может быть представлен в следующем виде:

$$M = kU^2 \frac{r_2 s}{r_2^2 + (\omega_1 L_2)^2},$$

где M — вращающий момент; U — подводимое напряжение; r_2 — омическое сопротивление фазы цепи ротора; L_2 — индуктивность фазы цепи неподвижного ротора; s — скольжение; ω_1 — синхронная угловая скорость; k — коэффициент пропорциональности, откуда видно, что этот момент для каждого значения скольжения s (а следовательно, и для значения s , соответствующего максимальному вращающему моменту) пропорционален квадрату величины подводимого напряжения.

Таким образом максимальный момент, развиваемый двигателями ветви H' при двухполюсном коротком в точке K даже в том случае, когда величина остаточного напряжения почти равна нормальному (значительная отдаленность места короткого, большая мощность системы), будет в 4 раза меньше максимального момента при нормальном напряжении, а в обычных условиях еще меньше, т. е.

$$M'_{\max} \leq \frac{M_{\max}}{4}.$$

Так как, с другой стороны, в большинстве случаев

$$M_{\max} = 2 \div 2,5 M_{\text{норм}}$$

то в тех случаях, когда противодействующий момент механизма $M_{\text{прот}}$ остается неизменным и, следовательно, равным $M_{\text{норм}}$, получается, что

$$M'_{\max} < M_{\text{прот}}$$

и, следовательно, двигатель тормозится и должен отключиться под действием нулевой или максимальной защиты.

Таким образом из общей массы двигателей те из них, которые обслуживают механизмы с постоянным противодействующим моментом, а таких обычно большинство, вообще отключаются, остальные же двигатели хотя и могут сохранить вращение, но при уменьшенном потреблении тока, что имеет также место и для приемников тока с постоянным сопротивлением.

Отсюда без большой погрешности можно вообще пренебречь отсасывающим действием нагрузки, присоеди-

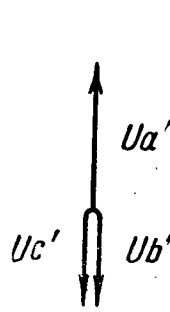


Рис. 3

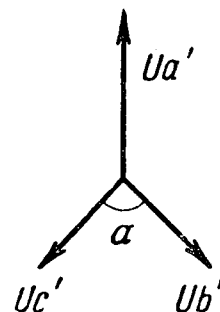


Рис. 4

диненной к поврежденному фидеру, и так же как и при трехполюсном коротком, исключить ее из рассмотрения.

Двигатели ветви H находятся в условиях промежуточных между нормальной работой и разобранным выше состоянием двигателей ветви H' . Диаграмма фазовых напряжений на их зажимах будет иметь вид, изображенный на рис. 4, причем $U_{b'} + U_{c'} = -U_{a'}$. угол α между векторами $U_{b'}$ и $U_{c'}$ и величина вектора $U_{a'}$ будут тем большими, чем дальше место короткого замыкания от питающего узла (при отдаленности, равной бесконечности, угол $\alpha = 120^\circ$ и $U_{a'} = U_a$).

При разложении этой системы векторов на симметричные составляющие мы получаем систему прямого следования, скалярно значительно большей, чем система обратного.

Если исходить из предпосылки, положенной в основу учета нагрузки при трехполюсном коротком замыкании, что сеть должна быть спроектирована таким образом, чтобы короткое где-либо на одном из фидеров не выводило бы из строя двигателей, присоединенных к другим фидерам, т. е. что реактивное сопротивление фидера достаточно для поддержания в узле около 70% напряжения при трехполюсном коротком, то, как указано было выше, при двухполюсном коротком система напряжений прямого следования будет еще больше. Таким образом двигатели ветви H должны сохранить вращение и путем отсоса снизить величину тока, устремляющегося к месту короткого.

Для того чтобы установить количественное значение этого отсоса, необходимо определить эквивалентное сопротивление нагрузочной ветви как по отношению к токам прямого, так и обратного следования.

Эквивалентное сопротивление по отношению к токам прямого следования определяется из тех же соображений, что и при трехполюсном коротком, а именно: учитывая, что двигатели с постоянным противодействующим моментом будут потреблять из сети ток прямого следования, больший нормального, а двигатели с моментом вентиляторного типа и приемники с постоянным сопротивлением, — меньший нормального, можно принять в первом приближении, что ток прямого следования, устремляющийся в нагрузочную ветвь, равен нормальному току до аварии, что приводит к реактивности прямого следования, равной в среднем 100%.

Что касается реактивности по отношению к токам обратного следования фаз, то такая величина может быть определена из следующих соображений. Реактивность двигателей токам обратного следования может быть в среднем оценена в 25÷30% к мощности двигателей, реактивности же сети будут колебаться в некоторых пределах в зависимости от отдаленности двигателей от питающего узла, количества трансформаций и пр. Учитывая, однако, что падение напряжения и потеря мощности по отношению к самым отдаленным двигателям не могут превосходить экономически допустимых пределов, означенные колебания получаются не очень значительными, и с достаточной для практики точностью реактивность сети может быть принята в среднем рав-

ной 20÷25%²⁾. Таким образом суммарная реактивность ветви *H* получается приблизительно равной 50%.

Здесь необходимо подчеркнуть, что в обычно применяемых методах расчета, когда нагрузка заменяется реактантом $X_H = \frac{100}{\sin \varphi}$, считается, что $X_{1H} = X_{2H}$, что при $\sin \varphi = 0,6$ дает $X_{1H} = X_{2H} = 166\%$.

Отсюда получается, так же как и при трехполюсном коротком, весьма искаженная картина влияния нагрузки и зачастую значительно преувеличение тока к.з. Помимо того в еще большей степени искажается картина токо-распределения.

Приведенный в конце статьи примерный расчет иллюстрирует сказанное.

II. Однополюсное короткое

Для однополюсного к.з. в зависимости от рода заземления нейтрали нам необходимо разобрать три случая.

1. Наглухо заземленная нейтраль. При наличии наглухо заземленной нейтрали диаграмма фазовых напряжений в месте короткого приобретает вид, изображенный на рис. 5, а. Здесь $U'_c = 0$, $U'_b = a^2 U'_a$. Раскладывая на симметричные составляющие систему фазовых напряжений, имеем

$$U_{a1}' = \frac{1}{3} (U'_a + aU'_b + a^2U'_c) = \frac{1}{3} (U'_a + a^3U'_a);$$

и так как $a^3 = 1$, то

$$U_{a1}' = \frac{2}{3} U'_a.$$

Таким образом векторы прямого следования фаз составляют $\frac{2}{3}$ величины раскладываемого напряжения.

$$U_{a2}' = \frac{1}{3} (U'_a + a^2U'_b + aU'_c) = \frac{1}{3} U'_a (1 + a);$$

$$U_{a0}' = \frac{1}{3} (U'_a + U'_b + U'_c) = \frac{1}{3} U'_a (1 + a^2).$$

Разложение векторов показано на рис. 5, б, 5, с, 5, д.

2. Изолированная нейтраль. В случае отсутствия заземленных нейтральных точек диаграмма фазовых напряжений в месте короткого принимает вид, изображенный на рис. 6, а³⁾, где $U'_a = U_{ab}$, $U'_b = U_{bc}$ и $U'_c = 0$. Здесь U_{ab} — линейное напряжение между фазами *a* и *b*, равное $j a^2 \sqrt{3}$; U_a и U_{bc} — линейное напряжение между фазами *b* и *c*, равное $-j \sqrt{3} U_a$.

Раскладывая на симметричные составляющие систему фазовых напряжений, имеем

$$U_{a1}' = \frac{1}{3} (U'_a + U'_b + a^2U'_c);$$

но так как $U'_c = 0$, а $U'_a = U_{ab} = j a^2 \sqrt{3} U_a$ и $U'_b = U_{bc} = -j \sqrt{3} U_a$, то

$$U_{a1}' = U_a.$$

²⁾ Более подробно означенное будет освещено в отдельной статье, посвященной влиянию нагрузки на величину ударных токов к.з.
³⁾ Здесь под фазовым напряжением понимаем напряжение между фазой и землей.

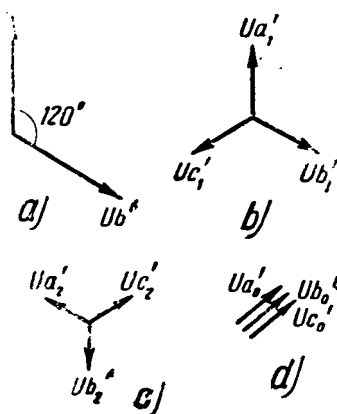


Рис. 5

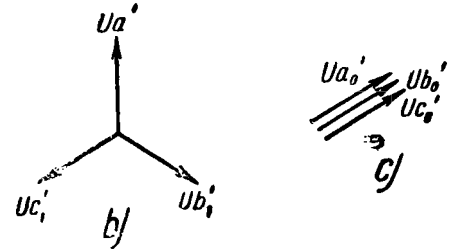
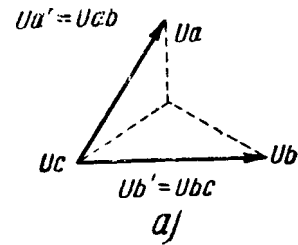


Рис. 6

т. е. векторы прямого следования фаз равны векторам фазного напряжения при нормальной работе:

$$U_{a2}' = \frac{1}{3} (U'_a + a^2U'_b + aU'_c) = 0,$$

$$U_{a0}' = \frac{1}{3} (U'_a + U'_b + U'_c) = -aU_a.$$

Разложение векторов показано на рис. 6, б и 6, с.

3. Нейтраль, заземленная через некоторое сопротивление. Этот случай является промежуточным по отношению к первым двум, на основании чего можно установить, что величина векторов прямого следования будет иметь значение большее, чем $\frac{2}{3}$ напряжения здоровой фазы, и меньше величины полного напряжения.

Переходя к вопросу роли нагрузки ветви *H'*, т. е. нагрузки, присоединенной к поврежденному фидеру, прежде всего необходимо отметить, что случай второй практического интереса не представляет, так как при отсутствии заземленных точек однополюсное к.з. может вызвать прохождение только емкостных токов. Таким образом исследованию подлежат лишь случаи первый и третий.

На основании вышеизложенного видно, что в зависимости от величины встроенного в нейтраль сопротивления вектора системы прямого следования будут уменьшаться, но даже в пределе при глухом заземлении нейтрали не могут быть меньше $\frac{2}{3}$ остаточного напряжения здоровых фаз.

Так как размагничивающее действие тока однополюсного короткого относительно невелико, то остаточное напряжение здоровых фаз в большинстве случаев (а в особенности для мощных систем) не многим отличается от нормального напряжения.

Отсюда есть основание предполагать, что в большинстве случаев величины напряжений прямого следования окажутся таковыми, что даже двигатели с постоянным противодействующим моментом, присоединенные к поврежденному фидеру, не будут заторможены.

Таким образом для мощных систем и в особенности, когда нейтральные точки заземлены через некоторое сопротивление, необходимо считаться с тем, что нагрузка, присоединенная к поврежденному участку, будет и после аварии потреблять ток и, следовательно, не может быть сброшена, как это имело место при двухполюсном или трехполюсном к.з.

Вполне очевидно, что тем более нагрузка, присоединенная к узлу, отделенному от места аварии некоторым реактантом, также не будет отключена и, следовательно, должна быть учтена при вычислении тока к.з. Величины реактантов для учета нагрузки по аналогии с предыдущим могут быть приняты равными: 100% — для

прямого следования фаз и 50% — для обратного. Реактанс нулевого следования фаз, ввиду того что моторы не имеют обычно заземленных точек, может быть принят равным бесконечности.

Так же, как и для случаев двухполюсного и трехполюсного короткого, учет нагрузки предлагаемым методом показывает значительно большее влияние таковой, чем обычно принято считать, а также дает возможность получения более или менее правильной картины токораспределения.

Пример

Для примерного расчета используем схему, приведенную в предыдущей статье и изображенную на рис. 7, где допустим, что в точке К произошло двухполюсное к. з. Вычисления ведутся, как при трехполюсном, тремя способами:

- 1) применением декрементных кривых;
- 2) методом Ферстера, при учете нагрузки сопротивлением $X'_H = \frac{100}{\sin \varphi} \%$;
- 3) методом Ферстера при учете нагрузки сопротивлением $X_H = 100\%$.

Приняв за базисную мощность суммарную мощность генерирующих источников $P_0 = 90\,000\text{ kVA}$ ($I_0 = 15\,700\text{ A}$ при $3,3\text{ kV}_1$), имеем

Реактанцы, отнесенные к базисной мощности для прямого следования фаз

Реактанцы, отнесенные к базисной мощности для обратного следования фаз

$X'' = 45\%$	$X_2 = 45\%$
$X_0 = 405\%$	$X_{P2} = 66\%$
$X_{P1} = 66\%$	$X_{T2} = 128\%$
$X_{T1} = 128\%$	$X'_{H2} = 184\%$
$X'_{H1} = 184\%$	$X_{H2} = 55\%$
$X_{H1} = 110\%$	

1. Вычисление тока к. з. применением декрементных кривых. Эквивалентная схема изображена на рис. 8.

Эквивалентное сопротивление для прямого следования

$$X_{10} = \frac{X''}{3} + \frac{X_{P1}}{2} + \frac{X_{T1}}{2} = \frac{45}{2} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 112\%$$

Эквивалентное сопротивление для обратного следования

$$X_{20} = \frac{X_2}{3} + \frac{X_{P2}}{2} + \frac{X_{T2}}{2} = \frac{45}{3} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 112\%$$

Ток прямого следования

$$I_{a1} = I_0 \frac{100}{X_{10} + X_{20}} = 15\,700 \frac{100}{112 + 112} = 7\,000\text{ A.}$$

Токи в поврежденных фазах

$$|I_0| = |I_c| = \sqrt{3} \cdot 7\,000 = 12\,100\text{ A.}$$

2. Вычисление тока к. з. методом Ферстера при учете нагрузки сопротивлением $X'_H = \frac{100}{\sin \varphi}$. Эквивалентная схема изображена на

рис. 9.

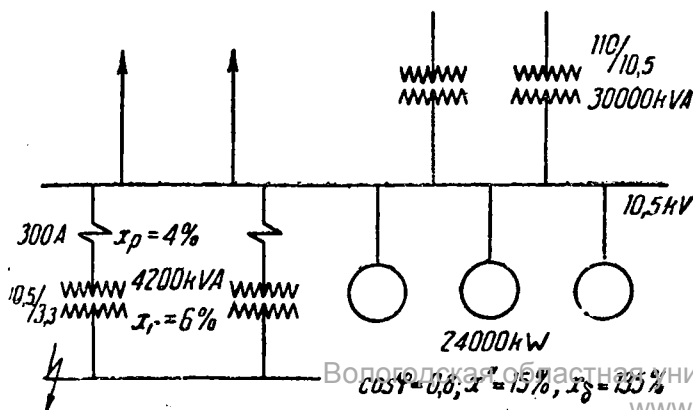


Рис. 7

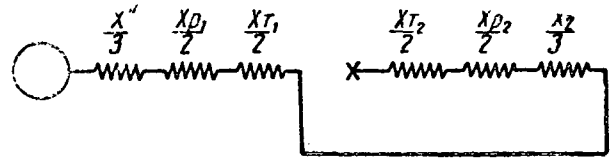


Рис. 8

рис. 9. Эквивалентное сопротивление для прямого следования

$$X_{10} = \frac{X'_{H1} \frac{X_0}{3}}{X'_{H1} + \frac{X_0}{3}} + \frac{X_{P1}}{2} + \frac{X_{T1}}{2} = \frac{184 \cdot \frac{405}{3}}{184 + \frac{405}{3}} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 175\%$$

Эквивалентное сопротивление для обратного следования

$$X_{20} = \frac{X'_{H2} \frac{X_2}{3}}{X'_{H2} + \frac{X_2}{3}} + \frac{X_{P2}}{2} + \frac{X_{T2}}{2} = \frac{184 \cdot \frac{45}{3}}{184 + \frac{45}{3}} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 111\%$$

Эквивалентная э. д. с.

$$E_0 = \frac{E_1 y_1 + E_2 y_2}{y_1 + y_2} = \frac{2,2 \frac{3}{405} + 0 \cdot \frac{1}{184}}{\frac{3}{405} + \frac{1}{184}} = 2,2U \frac{3}{405}$$

или в процентах

$$\frac{E_0}{U} = \frac{2,2 \cdot \frac{3}{405}}{\frac{3}{405} + \frac{1}{184}} \cdot 100 = 127\%$$

Ток прямого следования

$$I_{a1} = I_0 \frac{E_0}{U} = 15\,700 \frac{127}{175 + 111} = 7\,000\text{ A.}$$

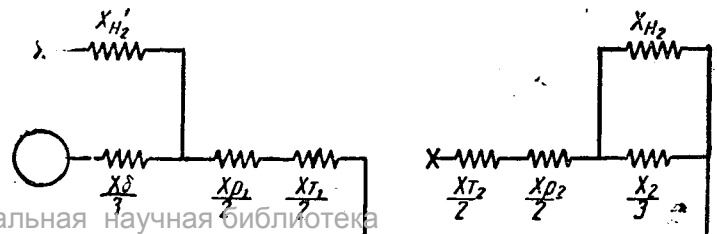
Ток в поврежденных фазах

$$|I_0| = |I_{ci}| \sqrt{3} \cdot 7\,000 = 12\,100\text{ A.}$$

3. Вычисление тока к. з. методом Ферстера при учете нагрузки сопротивлением $X_H = 100\%$. Эквивалентная схема изображена на рис. 10.

Эквивалентное сопротивление для прямого следования

$$X_{10} = \frac{X_{H1} \frac{X_0}{3}}{X_{H1} + \frac{X_0}{3}} + \frac{X_{P1}}{2} + \frac{X_{T1}}{2}$$



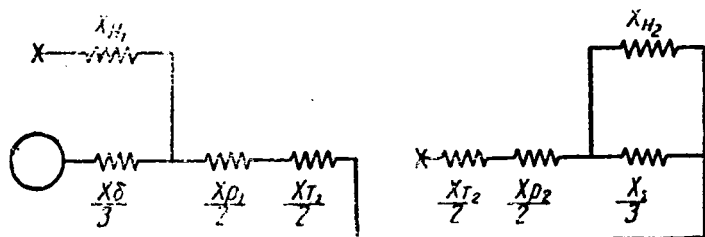


Рис. 10

$$= \frac{110 \cdot \frac{405}{3}}{110 + \frac{405}{3}} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 157\%$$

Эквивалентное сопротивление для обратного следования

$$X_{2a} = \frac{X_{H2} \frac{X_2}{3}}{X_{H2} + \frac{X_2}{3}} + \frac{X_{D2}}{2} + \frac{X_{Г2}}{2} = \frac{55 \cdot \frac{45}{3}}{55 + \frac{45}{3}} + \frac{66}{2} + \frac{128}{2} = 109\%$$

Эквивалентная э. д. с. в процентах

$$\frac{E_s}{U} = \frac{2,2 \cdot \frac{3}{X_6}}{\frac{3}{X_6} + \frac{1}{X_H}} \cdot 100 = \frac{2,2 \cdot \frac{3}{405}}{\frac{3}{405} + \frac{1}{110}} \cdot 100 = 99\%$$

Ток прямого следования

$$I_{a1} = I_6 \frac{E_s}{U} = 15700 \frac{99}{157 + 109} = 5800 \text{ А.}$$

Ток в поврежденных фазах

$$|I_s| = |I_c| = \sqrt{3} \cdot 5800 = 10000 \text{ А.}$$

Полученные результаты показывают, что учет нагрузки, проводимый обычными методами, приводит к преувеличению тока, устремляющегося к месту короткого, свыше чем на 20%.

Помимо того и вся картина токораспределения искажается в еще большей степени, что нетрудно проследить на данном же примере. При этом необходимо отметить, что здесь нагрузка все же присоединена к генераторным шинам, что соответствует допущению, принятому при построении декрементных кривых. В тех случаях, когда это не имеет места, нахождение токораспределения при пользовании методом декрементных кривых является совершенно невозможным.

21/XI 1933 г.

К вопросу о расчете нагрева токоведущих частей при коротких замыканиях

Инж. Л. Е. Машкиллейсон
Ленинград

При расчете нагрева проводников во время коротких замыканий исходят из предположения отсутствия теплопередачи и теплоотдачи за время нагрева, т. е. предполагают, что все количество тепла, освободившееся в материале токоведущей части, идет на ее нагрев.

Рассматривая элемент времени dt , мы можем, таким образом, написать следующее дифференциальное уравнение нагрева однородного проводника:

$$\frac{iK \rho_0 \varphi(T)}{q} dt = \gamma \Gamma C_0 \Psi(T) dT, \quad (1)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление материала провода при 0°C (в $\Omega \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$); K — отношение потерь при переменном токе к потерям при постоянном токе (учитывая явление скин-эффекта, эффекта близости и т. п.); q — сечение проводников мм^2 ; γ — плотность материала проводника г/см^3 ; C_0 — удельная теплоемкость в $\text{В/г}^\circ\text{C}$; $\varphi(T)$ — закон изменения удельного сопротивления при изменении температуры; $\Psi(T)$ — закон изменения удельной теплоемкости при изменении температуры; i — мгновенное значение силы токов А; T — температура проводника ($^\circ\text{C}$).

В уравнении (1) левая часть уравнения дает количество энергии, выделившееся на 1 м длины проводника на элемент времени dt , а правая часть дает количество энергии, идущее на повышение температуры проводника на dT .

Разделяя переменные, мы можем переписать уравнение (1) в виде

$$\Delta^2 dt = F(T) dt, \quad (2)$$

где

$$F(T) = \frac{\gamma C_0 \Psi(T)}{K \rho_0 \varphi(T)}, \quad (3)$$

и $\Delta = \frac{i}{q} \text{ А/мм}^2$ есть плотность тока в проводнике

Интегрируя уравнение (2), получим

$$\int_{T_0}^T F(T) dt = \int_{T_0}^T \Delta^2 dt. \quad (4)$$

Зная функцию $F(T)$, мы можем найти значение интеграла левой части уравнения (4) или (в простейшем случае) путем непосредственного интегрирования или же, если функция $F(T)$ дана в виде кривой или имеет очень сложный вид, графическими методами при помощи планиметра. Полагая начальную температуру $T_0 = 0$, мы можем, таким образом, построить график функции

$$\Phi(T) = \int_0^T F(T) dt.$$

Наиболее простое решение получается для случая, когда действующее значение тока через проводник является постоянным за все время действия тока. В этом случае

$$\int_0^t \Delta^2 dt = \Delta^2 t, \quad (5)$$

где Δ — плотность действующего тока в А/мм^2 . Из уравнения (4) и (5) получим

$$\Phi(T) = \Delta^2 t. \quad (6)$$

На рис. 1 изображена, например, кривая кратковременного нагрева проводов красной меди в предположении $K=1$, причем по оси абсцисс отложены величины $\Delta^2 t$.

В условиях действительного короткого замыкания в электрической системе действующее значение тока не будет, однако, постоянной величиной, а является функцией времени t .

Таким образом мы можем написать

$$\Phi(T) = I_0 t(t), \quad (7)$$

где I_0 — некоторый базисный ток, не зависящий от

Из уравнения (7) получим

$$\int_0^t \Delta^2 dt = \frac{I_0^2}{q^2} \int_0^t [f(t)]^2 dt = \Delta_0^2 t', \quad (8)$$

где Δ_0 есть базисная плотность тока и

$$t' = \int_0^t [f(t)]^2 dt \quad (9)$$

носит название фиктивного времени короткого замыкания.

Из уравнения (9) следует, что фиктивное время короткого замыкания зависит от действительной длительности короткого замыкания t и от формы изменения действующего значения тока короткого замыкания [от вида функции $f(t)$] и выбора базисного значения тока.

Таким образом, заменяя действительное время короткого замыкания t на фиктивное время t' , мы можем вести расчет перегрева по кривой 3 рис. 1, отсчитывая по оси абсцисс величину $\Delta_0^2 t'$.

Бирмансом были даны кривые фиктивного времени короткого замыкания, основанные на американских кривых затухания тока короткого замыкания синхронных генераторов 1918 г., причем в качестве базисного тока им был выбран установившийся ток короткого замыкания I_a , и постоянная составляющая тока короткого замыкания не учитывалась. Эти кривые до настоящего времени широко использовались для расчетов, хотя, как будет показано ниже, даваемая ими точность является недостаточной.

Зная вид функций $f(t)$, фиктивное время t' может быть определено по уравнению (9) или аналогичными или графическими методами. Графическое интегрирование путем планиметрирования квадратичной кривой $[f(t)]^2$ позволяет по имеющейся осциллограмме всегда найти величину t' с достаточной точностью, но во многих случаях требует кропотливой работы. К сожалению, точное уравнение функций $f(t)$ имеет весьма сложный вид и во многих случаях вообще является неизвестным, что затрудняет аналитическое интегрирование уравнения (9).

Ниже будет приведен метод, позволяющий по определенным данным сравнительно просто написать приближенное уравнение, функции $f(t)$ и с достаточной точностью определить фиктивное время t' аналитическим путем.

Заметим, что кривые фиктивного времени Бирманса могут быть вычислены, предполагая, что действующее значение тока короткого замыкания при трехфазном коротком замыкании изменяется по закону

$$I = I_a \left[\left(\frac{I_a}{I_d} - 1 \right) e^{-2,65 t} + 1 \right], \quad (10)$$

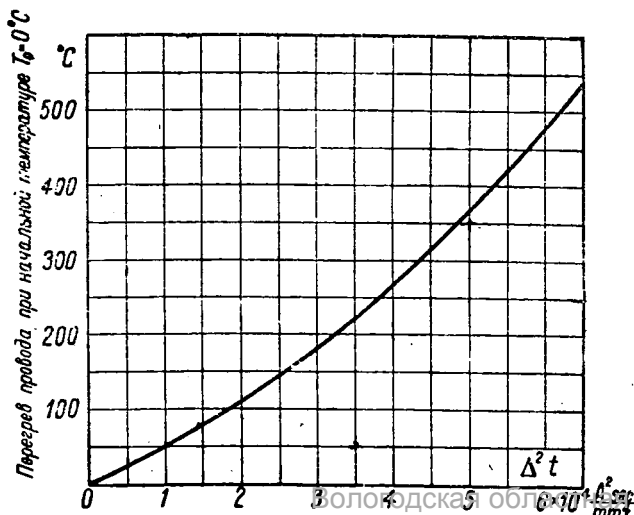


Рис. 1. Кратковременный перегрев проводов красной меди.

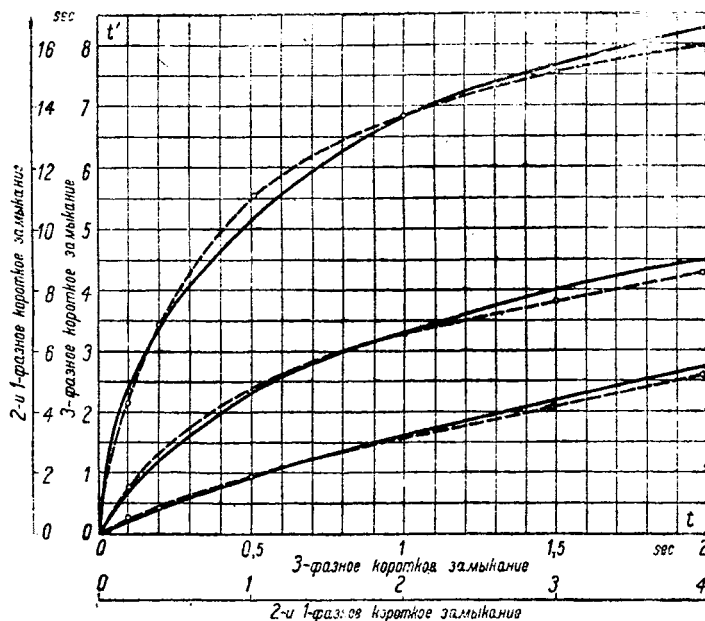


Рис. 2. Кривые фиктивного времени. Сплошные кривые — по Бирмансу, пунктирные — по уравнению (12)

где I_a — мгновенный ток короткого замыкания (симметричная составляющая). Отсюда.

$$f(t) = \left(\frac{I_a}{I_d} - 1 \right) e^{-2,65 t} + 1 \quad (11)$$

и

$$t' = \int_0^t [f(t)]^2 dt = t + 0,755 \left(\frac{I_a}{I_d} - 1 \right) (1 - e^{-2,65 t}) + 0,19 \left(\frac{I_a}{I_d} - 1 \right)^2 (1 - e^{-5,3 t}). \quad (12)$$

На рис. 2 приведены кривые фиктивного времени по Бирмансу и пунктирные кривые, построенные по уравнению (12), показывающие достаточную точность уравнения (12).

Основным недостатком кривых фиктивного времени Бирманса является неучет постоянной составляющей тока короткого замыкания, а также устарелость тех данных о спадании тока короткого замыкания, которые были положены в основу при построении кривых (данные 1918 г.).

В 1932 г. Hahn'om и Wagner'om¹⁾ были опубликованы уточненные кривые затухания действующего значения тока короткого замыкания, приведенные на рис. 3. Можно показать, что эти кривые с большой точностью могут быть представлены эмпирическим уравнением

$$I = I_n (A + B e^{-at} + C e^{-bt}), \quad (13)$$

где I_n — номинальный ток, отнесенный к суммарной мощности P_n всех присоединенных синхронных машин, выбранный в данном случае за базисное значение тока.

Коэффициенты A, B, C, a и b зависят от мгновенной реактивности системы X (в процентах), отнесенной к базисной мощности P_n .

Член $B e^{-at}$ учитывает постоянную составляющую тока короткого замыкания и затухает весьма быстро. Учитывая это, коэффициенты уравнения (13) могут быть определены следующим образом:

Обозначим через n_t кратность тока короткого замыкания в момент времени t (т. е. отношение $\frac{I}{I_n}$).

Тогда, зная значение кратности n для моментов времени $t=0$ (первый полупериод), $t=0,2$ сек., $t=1$ сек., $t=2$ сек. и $t=3$ сек. и помня, что при $t \gg \frac{1}{a}$ сек., $B e^{-at}$

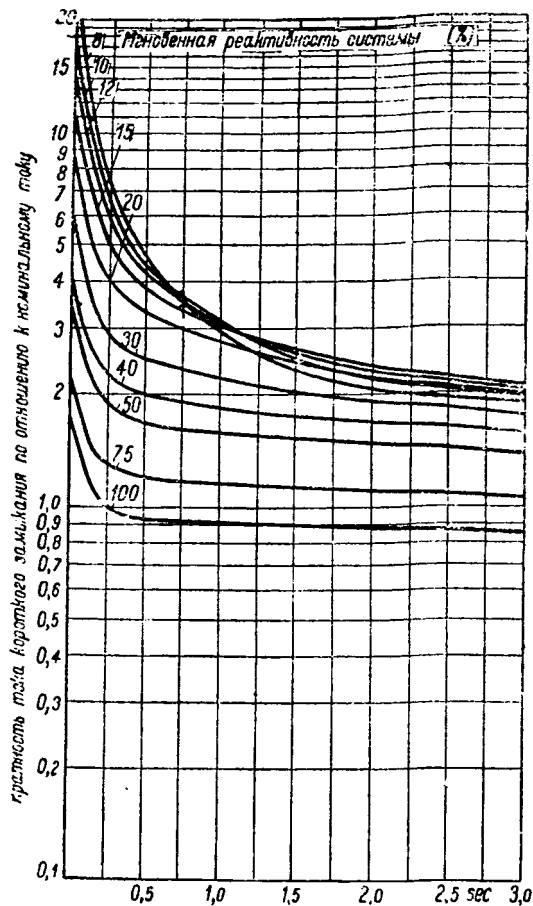


Рис. 3

$\cong 0$, получим следующие уравнения для определения коэффициента A, B, C, a и b :

$$\begin{aligned} A + B + C &= n_0 \\ A + Be^{-0,2a} + Ce^{-0,2b} &= n_{0,2} \\ A + Ce^{-b} &= n_1 \\ A + Ce^{-2b} &= n_2 \\ A + Ce^{-3b} &= n_3 \end{aligned}$$

Решая эти уравнения совместно, получаем

$$C = \frac{n_1 - n_2}{e^{-b} - e^{-2b}}, \tag{14}$$

$$A = n_1 - Ce^{-b}, \tag{15}$$

$$B = n_0 - A - C, \tag{16}$$

$$a = 2,31g \frac{B}{n_{0,2} - A - Ce^{-0,2b}} \tag{17}$$

и

$$f(b) = \frac{e^{-2b} - e^{-3b}}{e^{-b} - e^{-2b}} = \frac{n_2 - n_3}{n_1 - n_2}. \tag{18}$$

Для определения коэффициента b по уравнению (18) можно воспользоваться приведенным на рис. 4 графиком функции

$$f(b) = \frac{e^{-2\beta} - e^{-3\beta}}{e^{-\beta} - e^{-2\beta}}.$$

Найдя по уравнению (18) значение $f(b)$, определяем по кривой рис. 4 величину b , после чего все остальные коэффициенты легко определяются.

Для облегчения расчетов по уравнению (14) на рис. 4 приведен также график функции $e^{-b} - e^{-2b} = \varphi(b)$.

Из уравнения (13) получим

$$f(t) = A + Be^{-at} + Ce^{-bt},$$

откуда

$$t' = \int_0^t [f(t)]^2 dt =$$

$$\begin{aligned} &= A^2t + \frac{B^2}{2a}(1 - e^{-2at}) + \frac{C^2}{2b}(1 - e^{-2bt}) + \frac{2AB}{a}(1 - e^{-at}) + \\ &+ \frac{2AC}{b}(1 - e^{-bt}) + \frac{2BC}{a+b}(1 - e^{-(a+b)t}). \end{aligned} \tag{19}$$

Автором по кривым рис. 3 были определены значения коэффициентов уравнения (13), а затем по уравнению (19) построены кривые фиктивного времени $t = \varphi(t)$ для различных значений мгновенной реактивности X , приведенные на рис. 5. Кривые рис. 3 и 5 построены в предположении трехфазного короткого замыкания.

При двухфазном коротком замыкании между проводами кривые рис. 3 остаются справедливыми, если заменить мгновенную реактивность системы X на сумму реактивностей прямой и обратной последовательности фаз, причем полученная по кривой для новой реактивности кратность должна быть умножена на $\sqrt{3}$.

Практически реактивность обратной последовательности фаз равняется реактивности прямой последовательности. Таким образом при пользовании кривыми рис. 3 для определения затухания тока двухфазного короткого замыкания необходимо пользоваться кривой для удвоенной реактивности системы, умножая полученные величины кратности на $\sqrt{3}$.

При однофазном коротком замыкании аналогично необходимо пользоваться кривой для реактивности

$$2X + X_0,$$

где X — мгновенная реактивность прямой последовательности фаз, и X_0 — реактивность нулевой последовательности, причем полученные значения кратности тока короткого замыкания необходимо умножать на 3.

Отсюда следует, что при пользовании кривыми рис. 5 необходимо:

а) при двухфазном коротком замыкании пользоваться кривой для удвоенной мгновенной реактивности прямой последовательности фаз ($2X$) и полученные значения фиктивного времени умножать на 3;

б) при однофазном коротком замыкании пользоваться кривой для реактивности $2X + X_0$ и полученные значения фиктивного времени умножать на 9.

Необходимо иметь в виду, что стандартные кривые затухания рис. 3, а следовательно, и кривые фиктивного времени (рис. 5) построены при следующих главнейших допущениях:

- 1) все генераторы системы могут быть заменены одной эквивалентной синхронной машиной;
- 2) генераторы системы приняты соответствующим нормальным американским типам;
- 3) принято, что автоматическое регулирование напряжения не имеет места,
- 4) принято, что перед коротким замыканием генераторы работали при полной нагрузке и при $\cos \varphi = 0,8$;
- 5) при реактивности системы менее 15% принято, что внешняя реактивность равна нулю;
- 6) при реактивности системы более 15% принято, что реактивность генератора равняется 15%;
- 7) постоянная времени разомкнутой машины принята равной 5 сек.;
- 8) принято, что постоянная составляющая тока короткого замыкания максимальна.

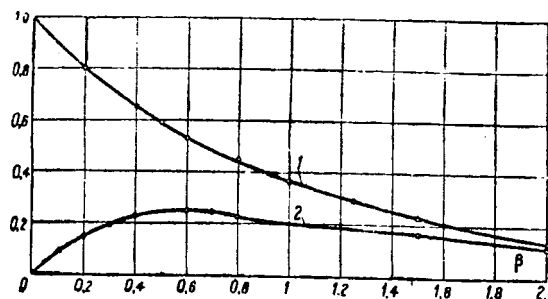


Рис. 4. Вспомогательные кривые для решения уравнений (14) и (18)

Кривая 1. $f(\beta) = \frac{e^{-2\beta} - e^{-3\beta}}{e^{-\beta} - e^{-2\beta}}$

Кривая 2. $f(\beta) = e^{-\beta} - e^{-2\beta}$

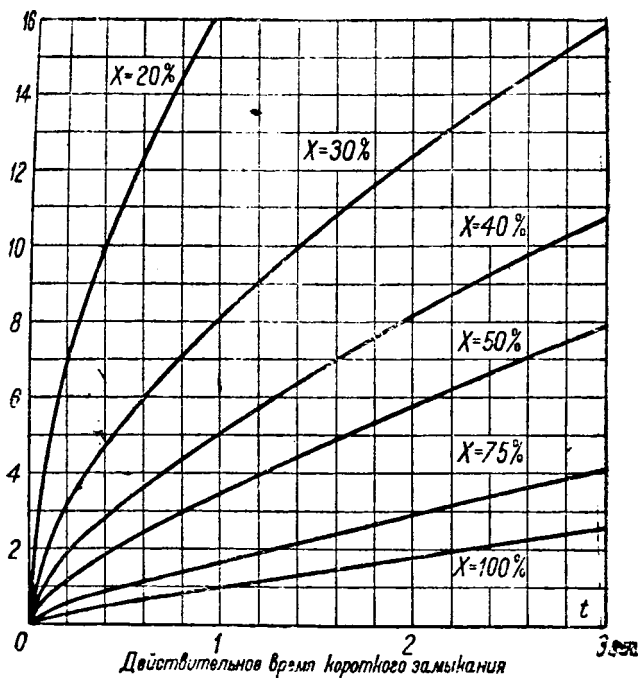


Рис. 5. Кривые фиктивного времени короткого замыкания. x — мгновенная реактивность системы короткого замыкания

особенности при наличии автоматических регуляторов напряжения и выдержки времени более 0,2 сек. В таких случаях можно рекомендовать пользоваться действительными осциллограммами тока короткого замыкания, ведя расчет по уравнению (19).

Для иллюстрации вышеизложенного рассмотрим следующий пример: требуется определить нагрев провода сечением 120 мм² при различных токах короткого замыкания длительностью 0,5 сек.

Система имеет следующие данные:

Мощность присоединенных синхронных машин $P_n = 100$ MVA, рабочее напряжение 11 kV, мгновенная реактивность до точки короткого замыкания $X = 15\%$. Реактивность нулевой последовательности фаз $X_0 = 10\%$.

Для принятых данных входящее в уравнение (12) отношение $\frac{I_a}{I_d}$ будет

для трехфазного короткого замыкания

$$\frac{I_a}{I_d} = 3,25 \text{ и } I_d = 2I_n,$$

для двухфазного короткого замыкания

$$\frac{I_a}{I_d} = 1,92 \text{ и } I_d = 3,05I_n,$$

для однофазного короткого замыкания

$$\frac{I_a}{I_d} = 1,61 \text{ и } I_d = 4,68I_n.$$

В дальнейшем произведем расчет по кривым рис. 5, а, также пользуясь кривыми фиктивного времени Бирманса.

Имеем номинальный ток

$$I_n = \frac{100\ 000}{11 \sqrt{3}} = 5,250 \text{ А.}$$

Номинальная плотность тока

$$\Delta_n = \frac{5\ 250}{120} = 43,7 \text{ А/мм}^2.$$

При трехфазном коротком замыкании по кривой рис. 5 для $X = 15\%$ получим при $t_2 = 0,5$ сек.; $t' = 19$ сек., откуда

$$\Delta_n^2 t' = 2,93 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^4.$$

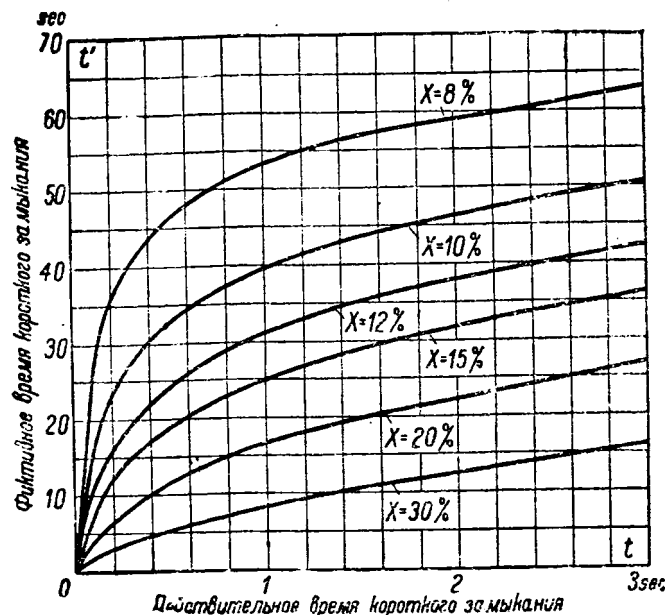


Рис. 6. Кривые фиктивного времени короткого замыкания: x — реактивность системы до точки короткого замыкания

По кривым Бирманса получим при $\frac{I_a}{I_d} = 3,25$ и $t = 2,6$ сек.,

$$\Delta_d = 2 \Delta_n = 87,5 \text{ А/мм},$$

откуда

$$\Delta_d^2 t' = 1,6 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^2.$$

При двухфазном коротком замыкании необходимо пользоваться при определении фиктивного времени по кривым рис. 5 кривой для реактивности $2X = 30\%$ и полученный результат умножить на 3. При этом получим $t' = 16$ сек., откуда

$$\Delta_n^2 t' = 2,45 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^4.$$

По кривым Бирманса получим при $\frac{I_a}{I_d} = 1,92$ и

$$\Delta_d^2 t' = 2,15 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^4.$$

При однофазном коротком замыкании принимаем реактивность $2X + X_0 = 40\%$; умножая полученное значение фиктивного времени на 9, получим по кривым рис. 5

$$t' \approx 28,8 \text{ сек. и } \Delta_n^2 t' = 4,4 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^4.$$

По кривым Бирманса получим

$$t' = 1,5 \text{ сек. и } \Delta_d = 4,68, \Delta_a = 205 \text{ А/мм}^2$$

$$t' = 1,5 \text{ сек. и } \Delta_d = 3,05, \Delta_n = 133 \text{ А/мм}^2$$

и

$$\Delta_d^2 t' = 4,6 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ сек/мм}^4.$$

Определенные по полученным данным температуры перегрева сведены в следующую таблицу.

Характер короткого замыкания	Температура перегрева	
	рассчитанная по методу, изложенному в настоящей статье	рассчитанная по кривым Бирманса
Трехфазное	180°C	87°C
Двухфазное	140	117
Однофазное	305	325

Приведенные в таблице данные показывают, что пользование кривыми фиктивного времени Бирманса может иногда приводить к значительной ошибке.

Определение температурных усилий и напряжений в мощных шинных конструкциях¹⁾

Инж. Д. А. Фукс

Ленинград

Введение

При помощи общеизвестных методов электрического расчета определяются необходимые размеры и форма сечения токоведущих обычно медных или алюминиевых шин. При этом, исходя из определенного конструктивного выполнения распределительного устройства, устанавливаются также величины пролетов шин между соседними опорными точками и выбираются стандартные типы изоляторов, на которых шины закрепляются.

В противоположность шинным устройствам на мелких маломощных установках, для которых совершенно достаточны указанные выше расчеты, для мощных и многопролетных шин необходимо большое внимание уделить выбору способа закрепления опорных изоляторов к строительным частям здания, а также выбору типа сложных или простых шинодержателей, помощью которых шины крепятся к изоляторам, выбору числа отдельных участков, на которые следует разделить прямолинейные многопролетные шины, и выбору температурных компенсаторов, при помощи которых необходимо соединять указанные отдельные участки шин.

Решения по всем этим вопросам должны обеспечить достаточную механическую прочность всей шинной конструкции в целом не только под действием электродинамических усилий, возникающих при коротких замыканиях, чему посвящены многочисленные материалы в литературе, но и при всех имеющих место в нормальных и аварийных эксплуатационных условиях изменениях температуры шин и изменениях температуры строительных частей, на которых закреплена шинная конструкция.

Настоящая работа посвящена выяснению метода решения последней задачи.

Прежде чем приступить к изложению теоретических выводов, мы здесь кратко отметим общую, обычно целесообразную последовательность при практических расчетах.

1. Зная конструкцию шинного устройства и наихудшее сочетание изменений температуры шин и основания под опорные изоляторы, можно предположить в начале расчета худший случай, а именно, что усилие в шинах достигает величины критического усилия, вследствие чего имеет место продольный изгиб шин. При этом, пользуясь построенной согласно раздела II диаграммой № 1 для медных шин и диаграммой № 3 для алюминиевых шин, можно найти критическое усилие $P_{кр}$, наибольшее напряжение в материале шин P_{max} и наибольшее отклонение шин при изгибе f_{max} . Если все найденные величины не превосходят допустимых значений, то расчет можно закончить.

В этом случае, очевидно, для изоляторов и шин нет никакой опасности от температурных изменений и, следовательно, можно отказаться и от шинных компенсаторов и от шинодержателей, предусматривающих возможность смещения шин.

Если в силу каких-либо причин заранее задано применение шинодержателей, обеспечивающих при определенном усилии, меньшем, чем критическое усилие при продольном изгибе, смещение шин в их осевом направлении по отношению к шинодержателям, то в качестве худшего случая следует принять, что усилие в шинах достигает такой величины, когда шины смещаются по

отношению к шинодержателям. Произведя расчет в этом предположении согласно раздела III, мы можем обнаружить, имеется ли какая-либо опасность для данной конструкции шин. Если никакой опасности не имеется, то расчет на этом заканчивается.

2. Если предположение наихудшего из возможных случаев согласно предыдущему приводит к недопустимым величинам усилий и напряжений, то следует произвести расчет с учетом действительных условий.

Для шинной конструкции, не имеющей специальных элементов (шинодержателей, компенсаторов), для уменьшения температурных усилий, можно производить вычисление усилий и напряжений, имеющих место до наступления продольного изгиба, как указано в разделах I и IV, согласно которым построены освобождающие от утомительных вычислений диаграммы № 2 для медных шин и № 4 для алюминиевых шин.

Если найденные в результате указанного расчета усилия и напряжения допустимы, то расчет на этом заканчивается. В противном случае следует прибегнуть к специальным мерам:

а) применение опорных конструкций, имеющих малую механическую жесткость²⁾;

в) применение специальных шинодержателей, обеспечивающих протирание шины при определенном усилии, которое, очевидно, является предельным значением усилия, передаваемого от шин к опорному изолятору³⁾;

с) применение компенсаторов, обеспечивающих возможность беспрепятственного перемещения концов участка шин, ограниченного двумя смежными компенсаторами или свободным концом шины и компенсатором. Меняя количество устанавливаемых компенсаторов, можно по желанию изменять расчетное количество пролетов шинной конструкции.

Необходимость в применении тех или иных из этих мер выясняется путем расчета, который следует повторять каждый раз с изменениями, соответствующими новым конструктивным характеристикам шинной конструкции. При этом проще всего пользоваться диаграммами № 2 и 4, а при протирании шин в шинодержателях — разделом III.

Принятые в тексте буквенные обозначения

$\lambda_{ш}^t$ — удлинение свободно лежащих шин вследствие изменения температуры;

$\lambda_{ш}^м$ — удлинение шин вследствие механического растяжения или сжатия при неизменной температуре;

$\lambda_{б}^t$ — удлинение основания, на котором закреплены опорные изоляторы, вследствие изменения температуры;

P — усилие, возникающее в шинах при температурных изменениях;

f_{max} — наибольшая стрела изгиба шин;

S — жесткость опорного изолятора в kg/cm , т. е. усилие, которое нужно приложить к точке закрепления шин на изоляторе, чтобы эта точка отклонилась на 1 см в предположении, что деформация все время остается пропорциональной усилию;

²⁾ Согласно опытов лаборатории высокого напряжения им. проф. А. Н. Смуrow в стандартные опорные изоляторы, укрепленные на жестком основании, имеют следующие значения жесткости: S-изоляторы типа ОВ-10 имеют $S = 2800 \div 3500 kg/cm$ и типа, ОД-10 $S = 3000 \div 4000 kg/cm$.

³⁾ Усилие $P_{ш}$, при котором наступает протирание в шинодержателях, равно согласно предварительным результатам опытов в Э.С.С. Ленэнерго следующим величинам:

$P_{ш} = 140 kg$ — для медных шин 2 (60 × 6), на ребро в шинодержателях ВЭО с 2 болтами $d = 5/16"$;

$P_{ш} = 300 kg$ — для алюминиевых шин 100 × 10, плашмя в шинодержателях Э.С.С. Ленэнерго с 2 болтами $d = 1/2"$ с зачищенными

¹⁾ Автор считает своим долгом выразить благодарность М. М. Щепачеву и другим лицам, принявшим участие в составлении диаграмм и в проверке.

- a — отклонение точки закрепления шин на шинодержателе в направлении оси шин (отклонение опорного изолятора);
- l — длина пролета шин между двумя смежными изоляторами;
- ω — сечение шин;
- α — температурный коэффициент расширения;
- E — модуль упругости;
- t — температура;
- W — момент сопротивления шин по оси наименьшей жесткости;
- $b = IS/\omega E$ — отвлеченное число (параметр), характеризующее механическую конструкцию данного шинного устройства;
- J — момент инерции шин по оси наименьшей жесткости.

закрепления шин вследствие отклонения изоляторов под влиянием усилия, возникающего со стороны шин и вследствие температурного расширения строительной части, служащей основанием для укрепления опорных изоляторов. Поэтому мы можем составить следующее равенство:

$$\lambda_{ш}^t - \lambda_{ш}^* = 2a + \lambda_{\delta}^t = 2 \frac{P_1}{S} + \lambda_{\delta}^t, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{ш}^t = \alpha_m l (t_m - t_0) = \alpha_m l \theta_m,$$

$$\lambda_{\delta}^t = \alpha_{\delta} l \theta_{\delta}, \quad \lambda_{ш}^* = \frac{P_1 l}{\omega E}.$$

Из уравнения (1) мы легко можем найти, что усилие сжимающее шины,

$$P_1 = \frac{a l S}{2 + b} \theta, \quad (2)$$

1. Сжатие и растяжение одно- и двухпролетных прямолинейных шин при отсутствии смещения шин в шинодержателях

А. Для однопролетных шин. Рассматривая деформацию сжатия и расширение шин при изменении их температуры, мы можем заметить, что общее удлинение шин, закрепленных шарнирно на изоляторах, будет равно увеличению расстояния между крайними точками

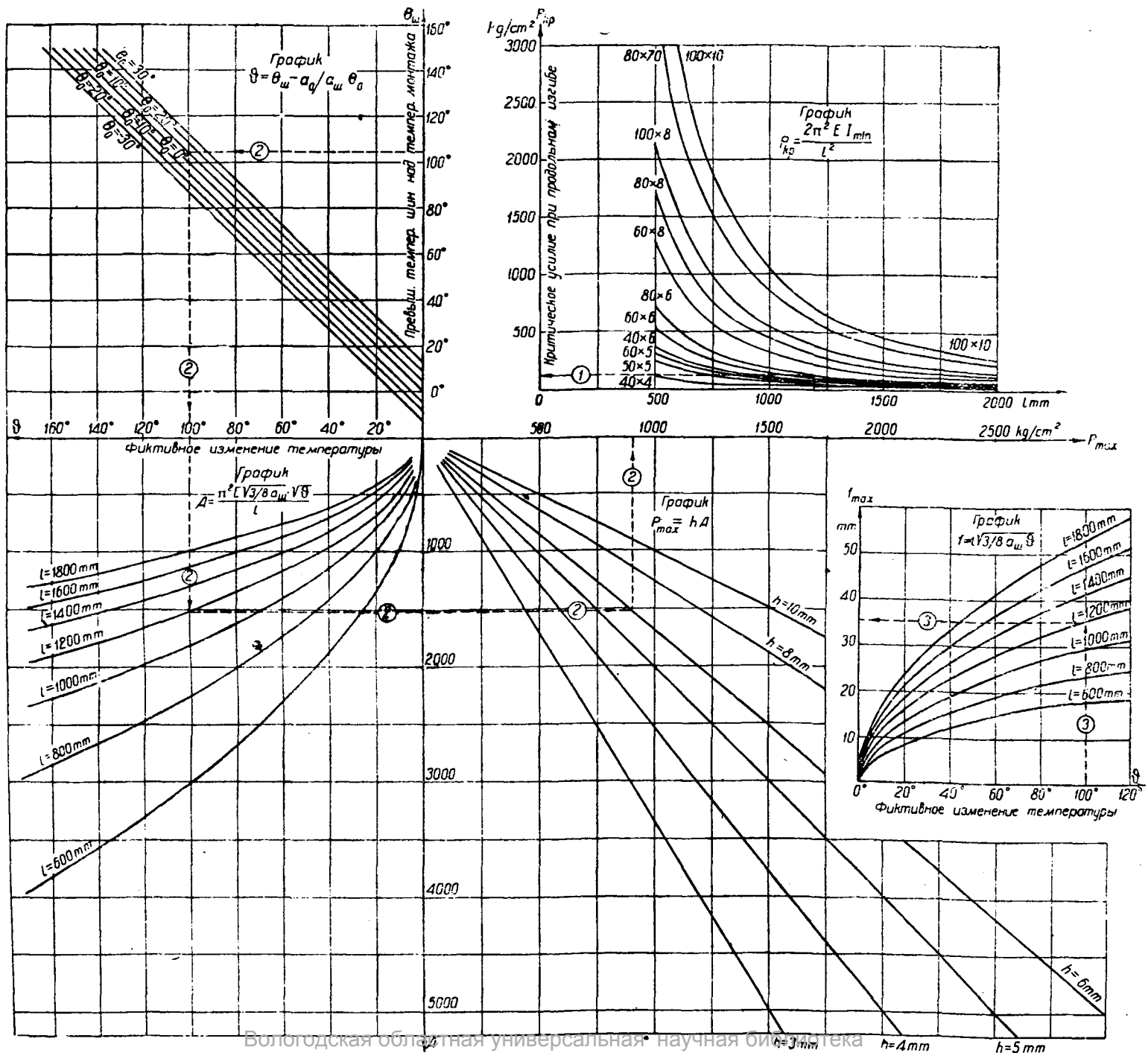
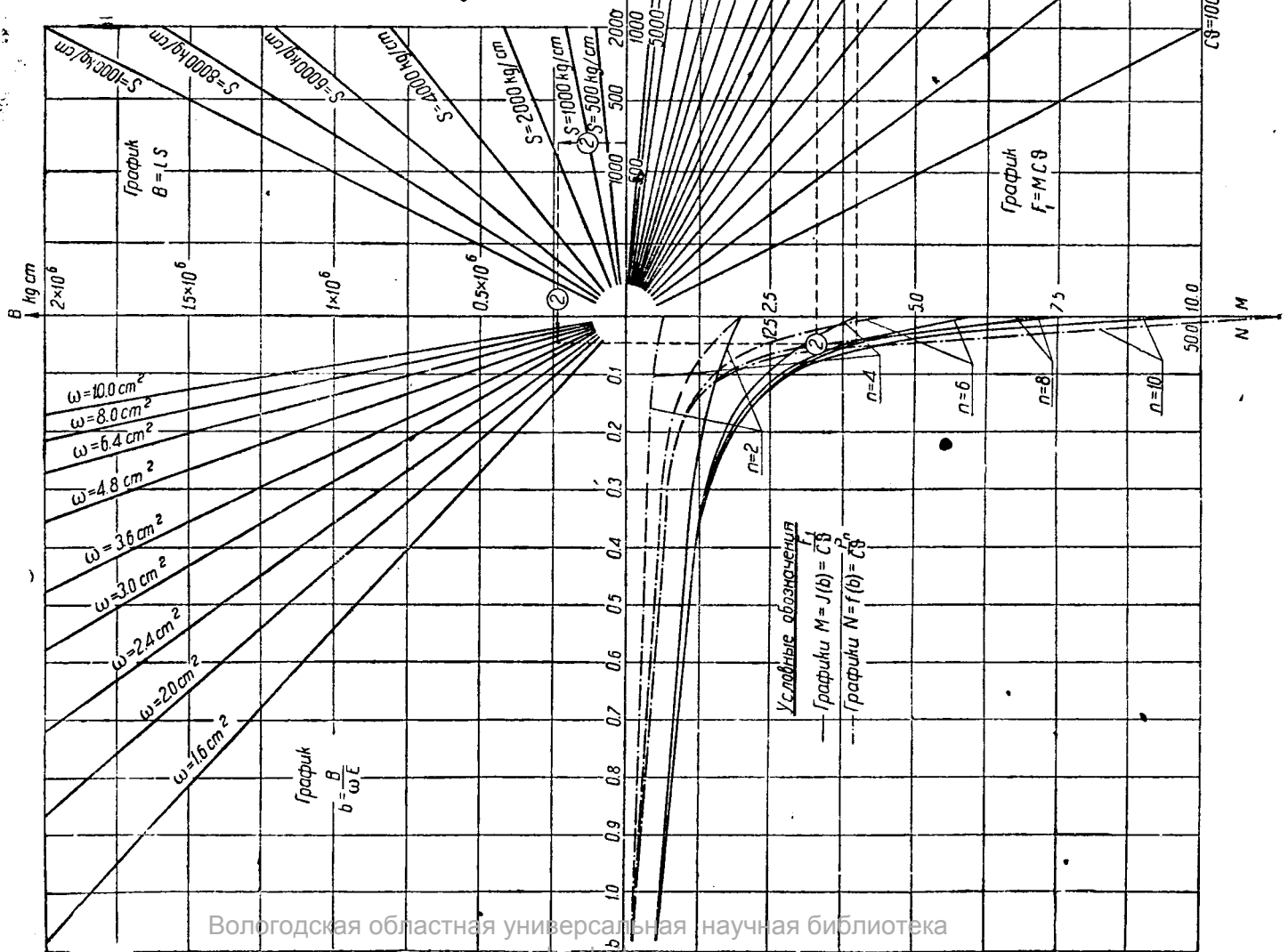
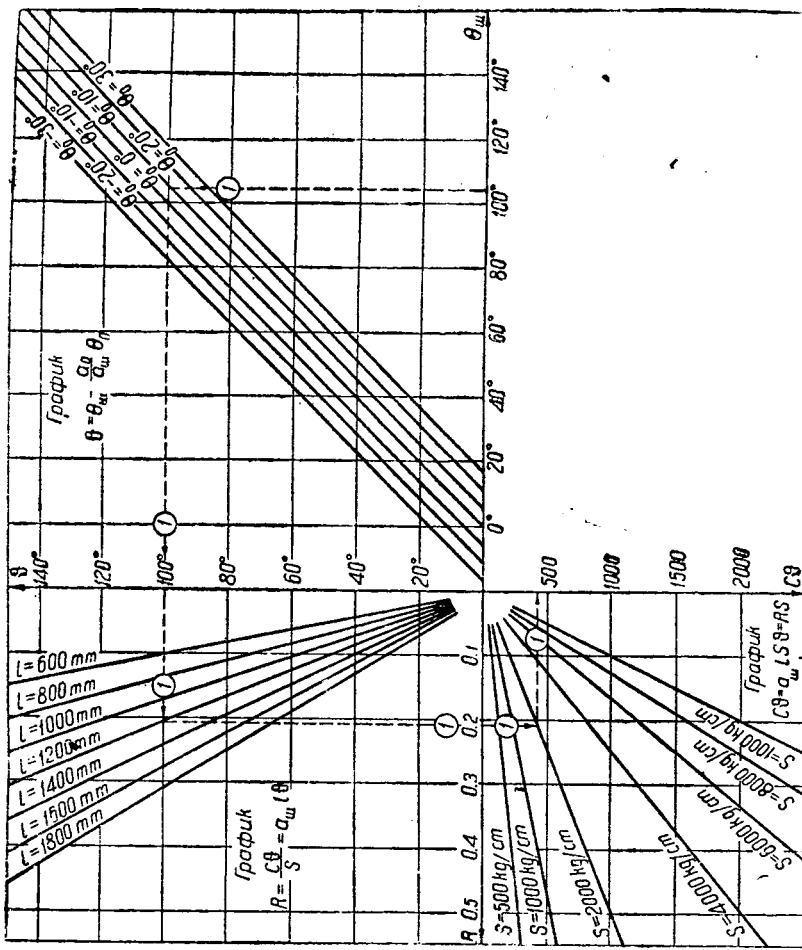


Диаграмма № 2. Определение наибольшего усилия на опорный изолятор в многопролетной конструкции прямолинейных медных шин



$$b = \frac{IS}{\omega E}$$

$$\vartheta = (t_{ш} - t_1) - \frac{\alpha \sigma}{\alpha_{ш}} (t_0 - t_0) = \vartheta_{ш} - \frac{\alpha \sigma}{\alpha_{ш}} \vartheta_0$$

В частности, при жесткости изоляторов $S = \infty$, т. е. когда усилие в шинах полностью компенсирует их температурные деформации, мы получаем

$$P_1 = \omega E \alpha_{ш} \vartheta = P_{комп.} \quad (3)$$

Для двухпролетных шин. Деля равенство (1) на 2 и рассуждая подобно случаю однопролетных шин, мы получаем следующее выражение:

$$\frac{\lambda_{ш}^I}{2} - \frac{\lambda_{ш}^{II}}{2} = a + \frac{\lambda_0}{2}$$

где, однако,

$$\lambda_{ш}^I = 2 \alpha_{ш} l \vartheta_{ш} \text{ и т. д.}$$

Следовательно,

$$P_2 = \frac{a IS}{1+b} \vartheta$$

В частности, при жесткости изоляторов $S = \infty$ мы получаем

$$P_2 = \omega E \alpha_{ш} \vartheta = P_{комп.}$$

т. е. то же, что и в уравнении (3).

Как и в случае однопролетных шин, найденная таким образом величина усилия P имеет физический смысл лишь в том случае, если

$$P < P_{кр}$$

где $P_{кр}$ — усилие, при котором наступает продольный изгиб шин. Если последнее неравенство справедливо, то напряжение в шинах равно

$$p = \frac{P}{\omega}$$

Если это неравенство не имеет места в действительности, то необходимо рассчитать шины на продольный изгиб согласно разделу II.

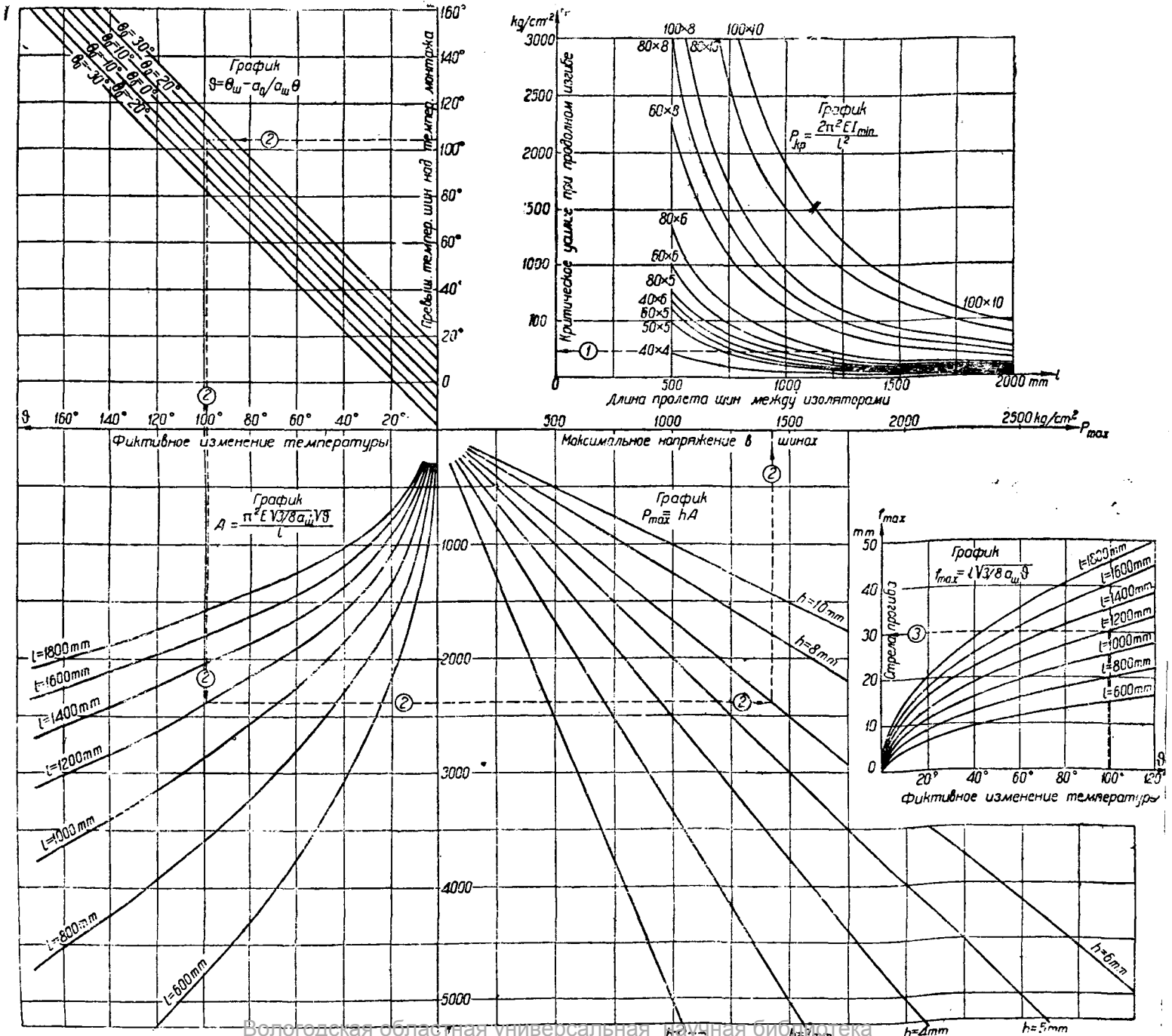
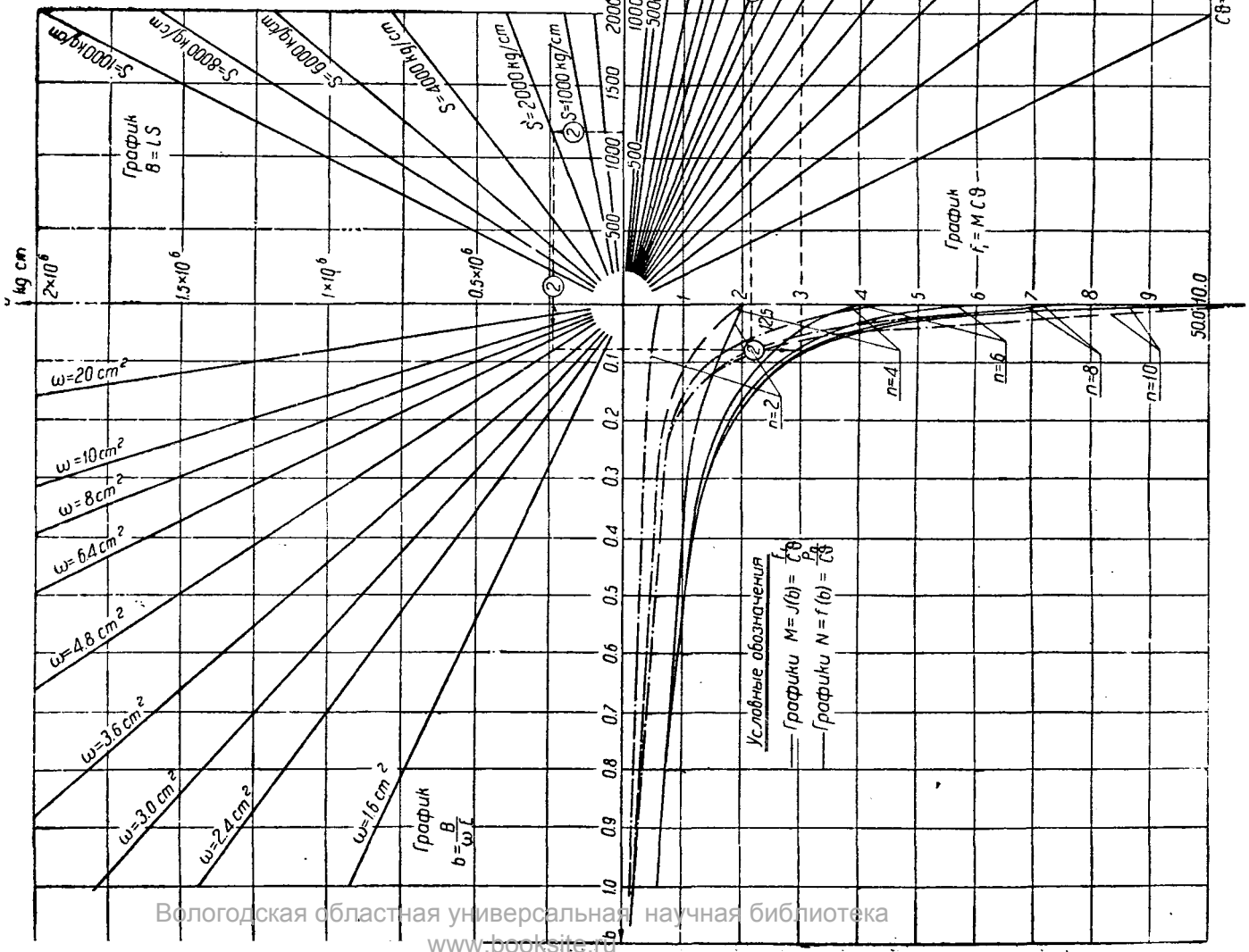
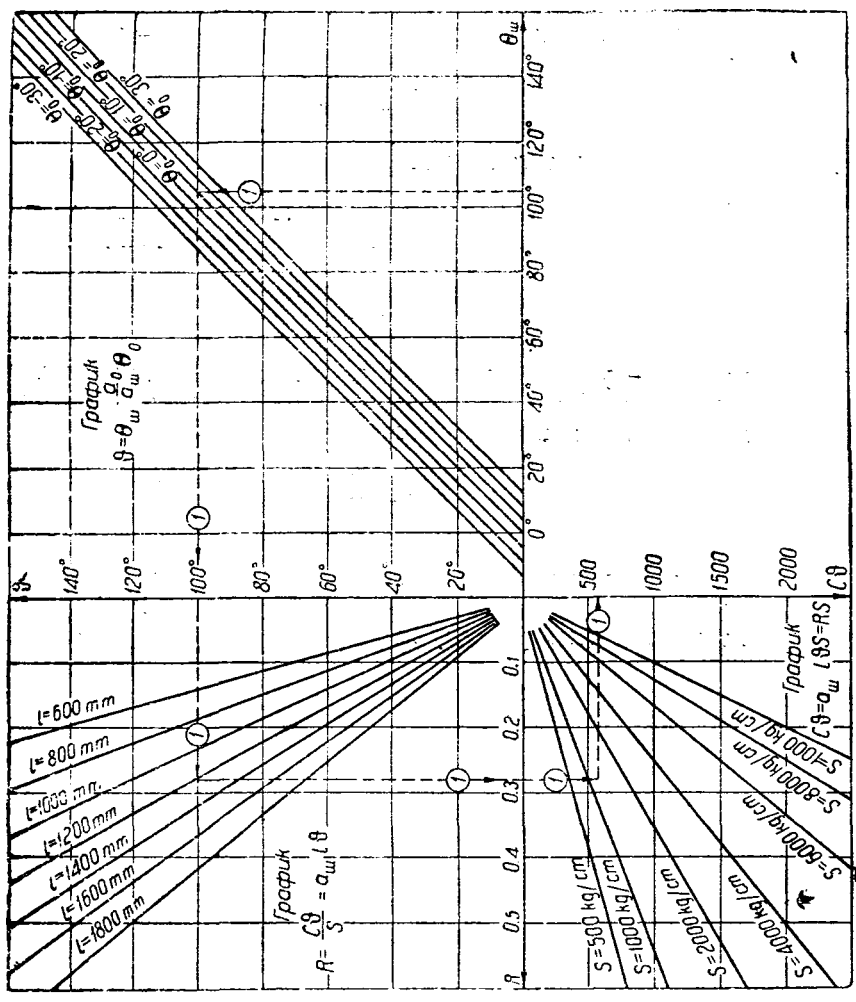


Диаграмма № 4. Определение наибольшего усилия на опорный изолятор в многопролетной конструкции прямолнейных алюминиевых шин



II. Продольный изгиб шин при отсутствии смещения шин в шинодержателях

Длина подвешенной гибкой нити может быть выражена общеизвестным равенством:

$$L = l \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f_{\max}^2}{l^2} \right), \quad (5)$$

где f_{\max} — стрела провеса гибкой нити. Принимаем, что при удлинении шин на величину $\lambda_{ш}$ шина принимает форму согласно уравнению (5). Тогда для худшего случая, когда изоляторы на концах пролета остаются неподвижными, мы получим равенство

$$L = l + \lambda_{ш} = l \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f_{\max}^2}{l^2} \right). \quad (6)$$

Пренебрегая частичной деформацией — сокращением оси шин вследствие механических усилий, т. е. полагая, что $\lambda_{ш} = \lambda_{ш}^t$, получаем:

$$l + \lambda_{ш}^t = l(1 + \alpha_{ш} \vartheta) = l \left(1 + \frac{8}{3} \frac{f_{\max}^2}{l^2} \right)$$

или

$$\alpha_{ш} \vartheta = \frac{8}{3} \frac{f_{\max}^2}{l^2}.$$

Следовательно, стрела прогиба шин

$$f_{\max} = l \sqrt{\frac{3}{8} \alpha_{ш} \vartheta}. \quad (7)$$

Зная деформацию шины, мы можем определить напряжение в материале шин по формуле:

$$P_{\max} = \frac{P_{кр} f_{\max}}{W}, \quad (8)$$

где $P_{кр} = k \frac{n^2 E J}{l^2}$, причем коэффициент k зависит от способа закрепления концов шины.

III. Сжатие и растяжение прямолинейных шин при смещении их в шинодержателях

Для каждого типа конструкции шинодержателя, удерживающего шины силой трения, можно теоретическим или экспериментальным путем выявить определенное усилие $P_{ш}$, при котором шины протираются, т. е. как-либо иначе смещаются по длине в направлении оси шин в шинодержателе. Очевидно, наибольшее усилие на опорный изолятор со стороны шин не может превзойти при наличии таких шинодержателей величины.

Усилие в самых шинах зависит от числа шинодержателей, установленных на опорных изоляторах и находящихся между данным пролетом шины и концом шинной конструкции.

Для шин в пролете, отстоящем от конца шинной конструкции за n опорными изоляторами (шинодержателями), усилие равно

$$P_n = n P_{ш}. \quad (9)$$

Следовательно, напряжения в шинах на n -ом пролете равно

$$p_n = \frac{P_n}{W} = n \frac{P_{ш}}{W}.$$

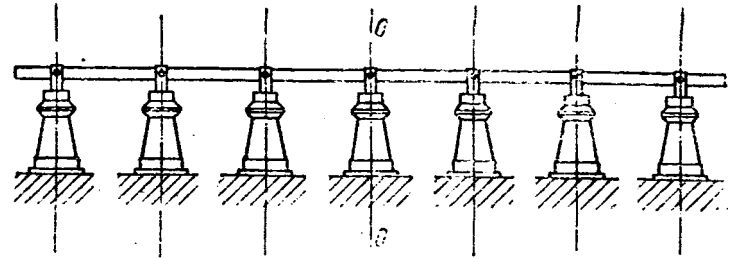


Рис. 1

IV. Сжатие и растяжение многопролетных прямолинейных шин при отсутствии смещения шин в шинодержателях

Мы будем рассматривать прямолинейную конструкцию шин, укрепленную на опорных изоляторах, как это видно на рис. 1. При этом мы будем полагать, что шины закреплены на изоляторах шарнирно и вследствие расширения от нагрева шины претерпевают сжатие в направлении их оси. При этом шины отклоняют в наружную сторону изоляторы, препятствующие их расширению. Средняя точка шин вследствие симметрии остается неподвижной. Для упрощения изложения мы будем говорить только о нагреве шин выше температуры, бывшей при их монтаже. Как это легко может быть проверено, все выводы будут справедливы и для случаев сокращения длины шин вследствие их охлаждения ниже начальной температуры при монтаже.

Рассмотрим частный случай, когда крайние изоляторы абсолютно жесткие. В этом случае усилия в конструкции должны полностью компенсировать термическое расширение шин по отношению к основанию, на которой укреплены опорные изоляторы, согласно равенству

$$\lambda_{ш}^t - \lambda_{ш}^* = \lambda_{\sigma}^t. \quad (11)$$

Следовательно, усилие в шинах равно

$$P = \omega E \alpha_{ш} \vartheta = P_{комп}.$$

Напряжение в материале шин в этом случае

$$p = \frac{P}{\omega} = E \alpha_{ш} \vartheta = p_{комп}, \quad (12)$$

где $p_{комп}$ — напряжение в шинах, компенсирующее термические деформации и ϑ — фиктивное изменение температуры шин; причем

$$\vartheta = (t_{ш} - t_0) - \frac{\alpha_{\sigma}}{\alpha_{ш}} (t_{\sigma} - t_0)$$

или

$$\vartheta = \Theta_{ш} - \frac{\alpha_{\sigma}}{\alpha_{ш}} \Theta_{\sigma}.$$

При Θ_{σ} получаем $\vartheta = \Theta_{ш}$, что имеет место, когда температура основания равна температуре начальной, при монтаже. При этом уравнение (11) принимает наиболее простой вид:

$$\lambda_{ш}^t - \lambda_{ш}^* = 0. \quad (11')$$

Отсюда находим

$$p = \frac{P}{\omega} = E \alpha_{ш} \vartheta = p_{комп}. \quad (12')$$

Сравнивая формулы (12 и (12'), мы видим, что случай, когда $\theta_0 \neq 0$ может быть приравнен случаю, когда $\theta_0 = 0$, если вместо действительного изменения температуры шин θ_u принять фиктивное, равное θ .

В дальнейшем мы все рассуждения будем вести, принимая в расчет фиктивное изменение температуры шин, что весьма упрощает учет изменения температуры основания.

Перейдем к рассмотрению случая, когда все опорные изоляторы обладают определенной гибкостью. Общее удлинение многопролетных шин λ_u состоит из отдельных частных удлинений на каждом пролете шин.

Если λ_1, λ_2 и т. д. обозначают частные удлинения на каждом из N пролетов многопролетной конструкции, то общее удлинение шин равно

$$\lambda_u = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k + \dots + \lambda_N = 2a + \lambda_0 = 2 \frac{F_1}{S} + \lambda_0. \quad (13)$$

При переходе от пролета к пролету изменяется величина усилия, снижающего шины в данном пролете. Обратимся к определению этих усилий, полагая, что величины усилий на всех изоляторах F_1, F_2, \dots, F_N нам известны.

В целях упрощения изложения ограничимся в дальнейшем рассмотрением конструкции, имеющей четное число пролетов $N=2$. Первый от края пролет сжимается силой $P_1 = F_1$. Второй от края пролет сжимается силой $P_2 = F_1 + F_2$ и т. д. Следовательно,

$$P_k = \sum_{m=1}^{m=k} F_m. \quad (14)$$

Подставляя в равенство (13) значения для удлинений в отдельных пролетах шин, мы получаем следующее выражение:

$$n\lambda_u \theta - \frac{l}{\omega E} [nF_1 + (n-1)F_2 + \dots + F_n] = \frac{F_1}{S}.$$

Следовательно, искомое усилие на крайний изолятор в шинной конструкции с $N=2n$ пролетами

$$F_1^n = n\alpha_u l S \theta - \frac{lS}{\omega E} [nF_1^n + (n-1)F_2^n + \dots + F_n^n]. \quad (15)$$

Это выражение может быть приведено к уравнению с одним неизвестным, если все усилия на опорные изоляторы выразить через усилие на крайний изолятор. Отклонение крайнего изолятора на величину приращенной длины первого от края пролета шин, т. е.

$$a_1 - a_2 = \lambda_1 = \alpha_u l \theta - \frac{F_1 l}{\omega E}.$$

Разница в отклонениях второго и третьего изоляторов выражается аналогично:

$$a_2 - a_3 = \lambda_2 = \alpha_u l \theta - \frac{(F_1 + F_2)l}{\omega E}$$

и т. д. В общем виде для k -го и $(k-1)$ -го изоляторов разница в отклонениях

$$a_{k-1} - a_k = \lambda_{k-1} = \alpha_u l \theta - \frac{l \sum_{m=1}^{m=k-1} F_m}{\omega E}.$$

В эти равенства введем взамен величин деформации опорных изоляторов a_1, a_2 и т. д. величины усилий F_1, F_2 и т. д., вызывающих эти деформации. Получаем следующее равенство:

$$F_1 - F_2 = \alpha_u l S \theta - \frac{lS}{\omega E} F_1 = \alpha_u l S \theta - b F_1,$$

$$F_2 - F_3 = \alpha_u l S \theta - b (F_1 + F_2),$$

$$F_{k-1} - F_k = \alpha_u l S \theta - b \sum_{m=1}^{m=k-1} F_m,$$

откуда

$$F_2 = (1+b)F_1 - \alpha_u l S \theta,$$

$$F_3 = (1+b)F_2 + bF_1 - \alpha_u l S \theta,$$

$$F_n = (1+b)F_{k-1} + b \sum_{m=1}^{m=k-2} F_m - \alpha_u l S \theta. \quad (16)$$

Если усилия F_2, F_3 и т. д. выразить непосредственно в зависимости от усилия F_1 , то получим

$$F_2 = (1+b)F_1 - \alpha_u l S \theta,$$

$$F_3 = (1+b)[(1+b)F_1 - \alpha_u l S \theta] + bF_1 - \alpha_u l S \theta,$$

или

$$F_3 = (1+3b+b^2)F_1 - (2+b)\alpha_u l S \theta = \\ = 1 + K_1^k b + K_2^k b^2 F_1 - (2 + C_1^k b) \alpha_u l S \theta$$

и т. д. В общем виде усилие для k -го изолятора в шинной конструкции с $N=2n$ пролетам может быть выражено в следующем виде:

$$F_k^n = (1 + K_1^k b + K_2^k b^2 + \dots + K_{k-1}^k b^{k-1}) F_1^n - \\ - [(k-1) + C_1^k b + C_2^k b^2 + \dots + C_{k-2}^k b^{k-2}] \alpha_u l S \theta, \quad (17)$$

где коэффициенты K и C имеют определенное значение, вывод коих приведен в приложении 1. Численные значения этих коэффициентов для различного числа пролетов шинной конструкции приведены в приложении 2.

Многочлены, взятые в скобки, в последнем выражении представляют собой отвлеченные числа, зависящие исключительно от параметра b и от значения k . Обозначая их через A_b^k и B_b^k , получаем более простой вид предыдущего выражения:

$$F_k^n = A_b^k F_1^n - B_b^k \alpha_u l S \theta. \quad (17')$$

Для того чтобы найти значение усилия F_1^n , действующее на крайний изолятор, нам нужно подставить в выражение (15) вместо величин F_2^n, F_3^n и т. д. их значения, выраженные в зависимости от величины F_1^n . Таким путем получаем следующее равенство:

$$F_1^n = n\alpha l S \theta - b \{ nF_1^n + (n-1)[(1+K^2b)F_1^n - \alpha_u l S \theta] + \\ + (n-2)[(1+K^3b+K^3b^2)F_1^n - (2+C^3b)\alpha l S \theta] + \dots + \\ + (1+K_1^n b + K_2^n b^2 + \dots + K_{n-1}^n b^{n-1}) F_1 - \\ - [(n-1) + C_1^n b + C_2^n b^2 + \dots + C_{n-2}^n b^{n-2}] \alpha l S \theta \}.$$

Преобразуя это уравнение, получаем

$$F_1 \{ 1 + b(1+2+\dots+n) + b^2[(n-1) + (n-2)K_1^3 + \dots + K_1^n] + \\ + \dots + K_{n-1}^n b^n \} = \alpha_u l S \theta \{ n + b[(n-1) + (n-2)2 + \dots + \\ + (n-1) \cdot 1] + b^2[(n-2) + (n-3)C_1^4 + \dots + 1 \cdot C_1^n] + \dots + b^{n-1} \}.$$

Сравним коэффициенты при различных степенях параметра b с выражениями для коэффициентов K и C , вы-

веденными в приложении 1. Последние выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} K_1^k &= 1 + 2 + \dots + (k-1) \\ K_2^k &= (k-2) \cdot 1 + (k-3) K_1^2 + \dots + 1 \cdot K_1^{k-1} \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ K_m^k &= (k-m) \cdot 1 + (k-m-1) K_{m-1}^{m+1} + \dots + K_{m-1}^{k-1} \\ C_1^k &= (k-2) \cdot 1 + (k-3) \cdot 2 + \dots + 1 \cdot (k-2) \\ C_2^k &= (k-3) \cdot 1 + (k-4) C_1^4 + \dots + 1 \cdot C_1^{k-2} \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ C_m^k &= (k-m-1) \cdot 1 + (k-m-2) \cdot 2 + \dots + 1 \cdot C_{m-1}^{k-1} \end{aligned} \right\} (1)$$

Индекс k в этих выражениях указывает номер пролета, считая от края конструкции шин, а индекс m — номер коэффициента, совпадающий с показателем степени соответствующего сомножителя — степени параметра b , перед которой данный коэффициент стоит.

Вводя соответствующие коэффициенты в предшествующее уравнение, получаем новое выражение для усилия на крайний изолятор многопролетной шинной конструкции, имеющей четное число пролетов $N = 2n$:

$$F_1^n = \frac{W + bC_1^{n+1} + b^2C_2^{n+1} + \dots + b^{n-1}C_{n-1}^{n+1}}{1 + bK_1^{n+1} + b^2K_2^{n+1} + \dots + b^nK_n^{n+1}} \alpha_{ш} l S \vartheta = C_b^n \alpha_{ш} l S \vartheta. \quad (18)$$

В частном случае при жестких крайних изоляторах, т. е. когда $S = \infty$, равенство (18) преобразуется в более простой вид. Если сомножитель $\alpha l S$ в равенстве (18) разделить на S , а другой сомножитель этого равенства C_b^n умножить на S и затем разделить числитель и знаменатель дроби, представляющей последний сомножитель, на величину S^n , то, подставляя значение $S = \infty$, получаем

$$F_1^n = \frac{C_{n-1}^{n+1}}{I K_n^{n+1}} \alpha_{ш} l \vartheta = \omega E \alpha \vartheta = P_{комп.}$$

Определив, как указано выше, усилие для крайнего изолятора многопролетной конструкции с гибкими изоляторами, мы тем самым разрешили задачу по определению усилий для всех прочих изоляторов в той же конструкции, которые могут быть подсчитаны при помощи уравнений (18) и (17').

Переходя к определению усилия в шине на k -ом пролете, мы находим согласно предыдущего, что

$$P_k = \sum_{k=1}^{k=m} F_k.$$

Следовательно, используя для F_k выражение (17), получаем:

$$\begin{aligned} P_k^n &= F_1^n [K + b(K_1' + K_1^2 + \dots + K_1^k) + b^2(K_2' + K_2^2 + \dots + K_2^k) + \dots + \\ &+ b^{k-1}(K_{k-1}' + K_{k-1}^2 + \dots + K_{k-1}^k)] - \alpha_{ш} l S \vartheta [(1 + 2 + \dots + k - 1) + \\ &+ b(C_1' + C_1^2 + \dots + C_1^k) + b^2(C_2' + C_2^2 + \dots + C_2^k) + \dots + \\ &+ b^{k-2}(C_{k-2}' + C_{k-2}^2 + \dots + C_{k-2}^k). \end{aligned}$$

Коэффициенты при различных степенях параметра b могут быть выражены согласно выводам, приведенным в приложении 1, значительно проще. Действительно, на основании общих выражений

$$C_m^k = K_m^{k-1} + K_m^{k-2} + \dots + K_m'$$

находим, что интересующие нас коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} K_1' + K_1^2 + \dots + K_1^k &= C_1^{k+1} \text{ и т. д.,} \\ C_1' + C_1^2 + \dots + C_1^k &= K_2^k \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Кроме того, из выражений (1) следует, что $1 + 2 + \dots + k - 1 = K_1^k$.

Произведя подстановку, получаем, что наибольшее усилие в шинах для среднего пролета равно:

$$P_n^n = \left[\frac{(n + bC_1^{n+1} + b^2C_2^{n+1} + \dots + b^{n-1}C_{n-1}^{n+1})^2}{1 + bK_1^{n+1} + b^2K_2^{n+1} + \dots + b^nK_n^{n+1}} - (K_1^n + bK_2^n + b^2K_3^n + \dots + b^{n-2}K_{n-1}^n) \right] \alpha_{ш} l S \vartheta. \quad (19)$$

Для конструкции с нечетным числом пролетов можно, идя тем же путем, вывести аналогичные формулы. Однако практически проще определить приближенно искомые усилия путем интерполирования соответствующих величин для многопролетных конструкций, имеющих на один пролет больше и на один пролет меньше.

Приложение 1

Вывод формул для вычисления значений коэффициентов K и C

Согласно уравнению (16) усилие на k -й, считая от края шинной конструкции, изолятор равно

$$F_k = (1 + b) F_{k-1} + b \sum_{m=1}^{m=k-2} F_m - \alpha l S \vartheta.$$

Следовательно, усилие для второго изолятора

$$F_2 = (1 + b) F_1 - \alpha l S \vartheta.$$

Вводя буквенные обозначения для коэффициентов перед параметром b , получаем

$$F_2 = (1 + K_1^2 b) F_1 - \alpha l S \vartheta,$$

где

$$K_1^2 = 1.$$

Усилие для третьего изолятора

$$F_3 = (1 + b) F_2 + b F_1 - \alpha l S \vartheta.$$

Подставляя значение для F_2 , получаем:

$$\begin{aligned} F_3 &= (1 + b) [(1 + b) F_1 - \alpha l S \vartheta] + b F_1 - \alpha l S \vartheta = \\ &= [1 + (1 + 1 + 1) b + 1 \cdot b^2] F_1 - [(1 + 1) + b] \alpha l S \vartheta = \\ &= (1 + b) [(1 + K_1^2 b) F_1 - \alpha l S \vartheta] + b F_1 - \alpha l S \vartheta = \\ &= \{1 + [K_1^2 + (1 + 1)] b + K_1^2 b^2\} F_1 - [(1 + 1) + 1 \cdot b] \alpha l S \vartheta = \\ &= [1 + K_1^2 b + K_2^2 b^2] F_1 - [2 + C_1^2 b] \alpha l S \vartheta, \end{aligned}$$

где

$$K_1^3 = K_1^2 + 2 = 1 + 2 = 3;$$

$$K_2^2 = K_1^2 = 1;$$

Для четвертого изолятора:

$$F_4 = (1+b)F_3 + b(F_1 + F_2) - \alpha IS^3.$$

Подставляя значения F_2 и F_3 , получаем:

$$\begin{aligned} F_4 &= (1+b) \{ [1 + (1+2)b + 1 \cdot b^2] F_1 - (2+1 \cdot b) \alpha IS^3 \} + \\ &+ bF_1 + b[(1+b)F_1 - \alpha IS^3] - \alpha IS^3 = \\ &= \{ 1 + [(1+2) + (1+1+1)]b + [(1+2) + (1+1) \cdot 1]b^2 + 1 \cdot b^3 \} F_1 - \\ &- \{ 3 + [1+2+1]b + 1 \cdot b^2 \} \alpha IS^3 = \\ &= \{ 1 + [K_1^4 + 3]b + [K_1^4 + 2]b^2 + K_2^4 b^3 \} F_1 - \\ &- \{ 3 + [C_1^4 + 1 + 2]b + C_1^4 b^2 \} \alpha IS^3 = \\ &= [1 + K_1^4 b + K_2^4 b^2 + K_3^4 b^3] F_1 - [3 + C_1^4 b + C_2^4 b^2] \alpha IS^3. \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} K_1^4 &= K_1^3 + 3 = 1 + 2 + 3 = 6, \\ K_2^4 &= K_1^3 + 2 = 1 + 2 + 2 = 5, \\ K_3^4 &= K_2^3 = K_1^2 = 1, \\ C_1^4 &= C_1^3 + 1 + 2(4-3) = 1(4-2) + 2(4-3), \\ C_2^4 &= C_1^3 = 1. \end{aligned}$$

Для пятого изолятора:

$$F_5 = (1+b)F_4 + b(F_1 + F_2 + F_3) - \alpha IS^3.$$

Аналогично предыдущим выражениям, получаем:

$$\begin{aligned} F_5 &= \{ 1 + [(1+2+3) + 4]b + [(1+2+3) + 2(1+2) + 3 \cdot 1]b^2 + \\ &+ [(1+2+2) + 2 \cdot 1]b^3 + 1 \cdot b^4 \} F_1 - \\ &- \{ 4 + [1 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1]b + [1 \cdot 4 + 2 \cdot 1]b^2 + 1 \cdot b^3 \} \alpha IS^3 = \\ &= [1 + K_1^5 b + K_2^5 b^2 + K_3^5 b^3 + K_4^5 b^4] F_1 - [4 + C_1^5 b + C_2^5 b^2 + \\ &+ C_3^5 b^3] \alpha IS^3, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} K_1^5 &= 1 + 2 + 3 + 4 = 10; \\ K_2^5 &= 1 \cdot K_1^4 + 2K_1^3 + 3K_1^2 = 1 \cdot 6 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 1 = 15; \\ K_3^5 &= 1 \cdot K_2^4 + 2K_2^3 = 1 \cdot 5 + 2 \cdot 1 = 7; \\ K_4^5 &= K_3^4 = K_2^3 = K_1^2 = 1; \\ C_1^5 &= 1(5-2) + 2(5-3) + 3(5-4) = 10; \\ C_2^5 &= 1 \cdot C_1^4 + 2C_1^3 = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 3; \\ C_3^5 &= C_2^4 = C_1^3 = 1. \end{aligned}$$

Следовательно, переходя к выражениям для коэффициентов в общем виде, получаем:

$$\left. \begin{aligned} K_1^k &= 1 + 2 + 3 + \dots + (k-1) \\ K_2^k &= (k-2) \cdot 1 + (k-3)K_1^3 + \dots + 1 \cdot K_1^{k-1} \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ K_m^k &= (k-m) \cdot 1 + (k-m-1)K_{m-1}^{m+1} + \dots + K_{m-1}^{k-1} \\ C_1^k &= (k-2) \cdot 1 + (k-3) \cdot 2 + \dots + 1 \cdot (k-2) \\ C_2^k &= (k-3) \cdot 1 + (k-4)C_1^4 + \dots + 1 \cdot C_1^{k-1} \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ C_m^k &= (k-m-1) \cdot 1 + (k-m-2) \cdot 2 + \dots + 1 \cdot C_{m-1}^{k-1} \end{aligned} \right\} (1)$$

Эти выражения могут быть преобразованы в более простой вид. Действительно,

$$C_1^k = 1(k-2) + 2(k-3) + \dots + (k-2) \cdot 1 = [1+2+\dots+(k-2)] + [1+2+\dots+(k-3)] + \dots + 1.$$

Следовательно,

$$C_1^k = K_1^{k-1} + K_1^{k-2} + \dots + 1.$$

Аналогично получаем:

$$K_2^k = C_1^k + C_1^{k-1} + \dots + 1, \quad C_2^k = K_2^{k-1} + K_2^{k-2} + \dots + 1,$$

В общем виде:

$$K_m^k = C_{m-1}^k + C_{m-1}^{k-1} + \dots + 1, \quad C_m^k = K_2^{k-1} + K_2^{k-2} + \dots + 1, \quad (II)$$

или

$$K_m^k = C_{m-1}^k + K_m^{k-1}, \quad C_m^k = K_m^{k-1} + C_m^{k-1}, \quad (III)$$

где k — номер изолятора, считая от конца шин, для которого определяется усилие F_k ,

m — число, совпадающее по своему значению с показателем степени, перед которой стоят коэффициенты K_m^k и C_m^k .

ТАБЛИЦА

значений коэффициентов C и K для числа пролетов до 20

$n = \frac{N}{2}$	$\frac{C_1}{K_1}$	$\frac{C_2}{K_2}$	$\frac{C_3}{K_3}$	$\frac{C_4}{K_4}$	$\frac{C_5}{K_5}$	$\frac{C_6}{K_6}$	$\frac{C_7}{K_7}$	$\frac{C_8}{K_8}$	$\frac{C_9}{K_9}$
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	1	—	—	—	—	—	—	—
3	1	—	1	—	—	—	—	—	—
4	4	1	—	—	—	—	—	—	—
5	10	6	1	—	—	—	—	—	—
6	20	21	8	1	—	—	—	—	—
7	35	56	36	10	1	—	—	—	—
8	56	126	120	55	12	1	—	—	—
9	84	252	330	220	78	14	1	—	—
10	120	462	792	715	364	105	16	1	—

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Повысительная подстанция на 380 kV

Инж. Л. Н. Грузов, инж. В. А. Романов

Ленинград

При разработке схематического проекта Камышинской гЭС производился выбор напряжения линий передачи между 220 и 380 kV. Если о системах передачи энергии рабочим напряжением 220 kV можно сказать, что они прочно вошли в эксплуатацию, что аппаратура для них является достаточно полно разработанной и что в мировой практике мы уже имели примеры достаточного количества выполненных и надежно работающих установок, то вопрос о системах передачи энергии на напряжение 380 kV находится лишь в стадии разработки. Установок на 380 kV, не считая одной-двух, построенных для исследовательских целей, пока не имеется.

Вопросы постройки трансформаторов, масляных выключателей и разъединителей на 380 kV стоят сейчас перед научно-исследовательскими институтами и заводами как нашей страны, так и заграницы. Из этого не следует делать вывод о целесообразности для проектирующих организаций заниматься вопросами применения напряжения 380 kV, так как совместное сотрудничество научно-исследовательских институтов и заводов с этими организациями должно дать плодотворные результаты в смысле решения целого ряда поставленных вопросов.

Одной из основных проблем передачи энергии при напряжении 380 kV является осуществление повысительных трансформаторов. Дискуссия по этому вопросу развернулась по выбору возможного типа трансформатора. Рассмотрению подвергались типы:

- а) трехфазный трансформатор;
- б) группа однофазных трансформаторов;
- в) каскадные соединения.

Громоздкие габариты, требующие сборки трансформатора на месте постройки, а также трудные условия осуществления достаточно надежной изоляции заставляют отказаться от трехфазного трансформатора. Сравнение остальных двух типов трансформаторов сводится к следующему:

В группе однофазных трансформаторов будет несколько труднее осуществить достаточно надежную изоляцию, кроме того, однофазные трансформаторы будут подвержены большей опасности от резонансных перенапряжений благодаря малой междувитковой емкости. Однако, если предусмотреть для однофазных трансформаторов устройство нерезонирующих обмоток и специальную защиту, то работу следует признать вполне надежной. Габаритные размеры однофазных трансформаторов будут значительно меньшими, чем при каскаде.

В случае каскада значительно легче добиться хорошей изоляции. Однако процессы, протекающие в каскадах, являются еще мало изученными. Кроме того, каскад имеет значительно большее реактивное сопротивление. Площадь, необходимая для установки каскада, получается значительно большей, чем для группы однофазных трансформаторов. Установка каскада в некоторых случаях, например, на гидростанции, вызвала бы большое удорожание сооружения. Установка каскада на подстанции потребовала бы введения промежуточной трансформации, так как передать электроэнергию на подстанцию от гидростанции генераторным напряжением

Введение же промежуточной трансформации делает всю установку менее надежной и нерентабельной в экономическом отношении.

На основании всех вышеуказанных соображений считаем, что в нашем случае следует принять для проектирования подстанции на 380 kV группу однофазных трансформаторов. На рис. 1 в виде примера приведен выполненный однофазный автотрансформатор на 380 kV.

Следующим основным вопросом является выбор выключателя на 380 kV. В литературе имеются данные по следующим возможным типам выключателей:

- а) масляный выключатель (экстраполюционный тип фирмы Metropolitan Vickers);
- б) выключатель расширительного типа¹⁾;
- в) последовательное соединение двух масляных выключателей на 220 kV или трех выключателей на 110 kV.

По варианту „а“ мы получаем габаритные размеры выключателей чрезвычайно большими. Кроме того, если можно с уверенностью идти по пути экстраполяции основных размеров выключателя в части изоляции и механических конструкций, то вопрос о экстраполяции разрыва дуги не может считаться решенным и требует специальных исследований. Согласно консультации акад. А. А. Чернышева наиболее вероятным типом выключателя на 380 kV следует считать масляный выключатель с железобетонным, выложенным внутри железом, утопленным в землю баком и с бронированной крышкой, снабженной проходными изоляторами. Площадь, зани-

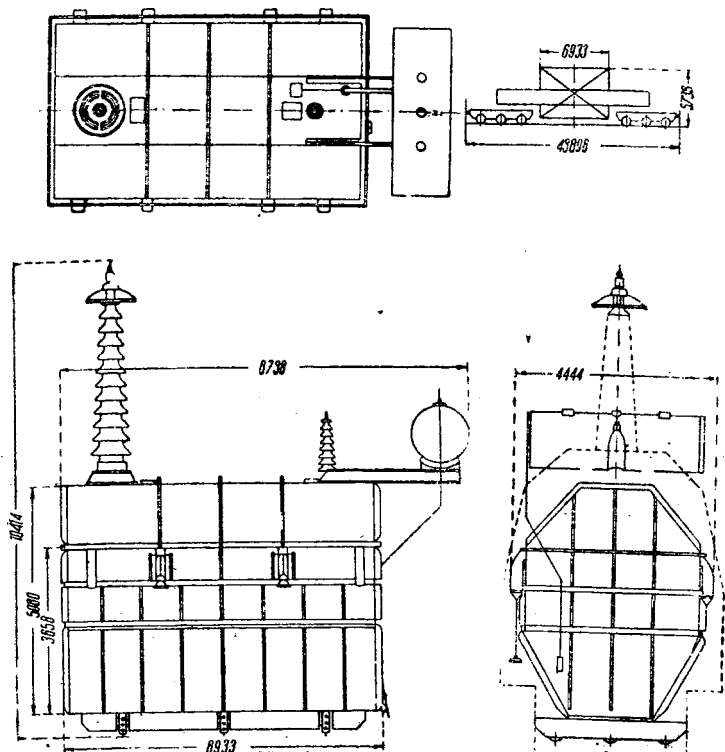


Рис. 1

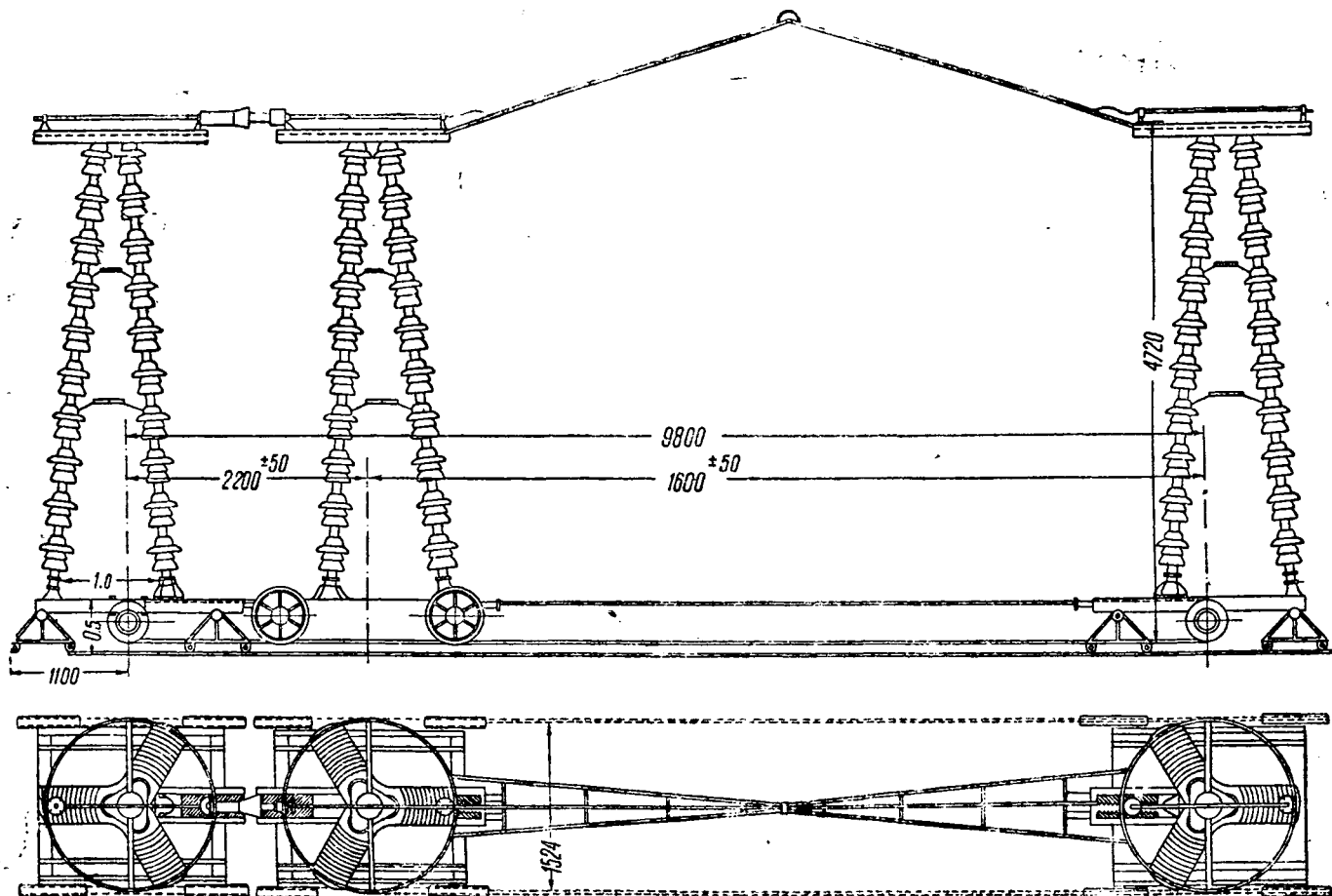


Рис. 2

маемая таким выключателем, следует ожидать близкой к выключателю экстраполяционного типа, высота же его будет значительно меньшей. Однако это не повлияет на конструкцию подстанции, так как высота опор определяется в данном случае габаритными размерами шин, а не выключателей.

По пункту „b“ следует сказать, что возможность применения расширительного выключателя на 380 kV следует считать пока сомнительной.

Две последние системы выключателей (пункт „с“) вряд ли найдут когда-либо себе применение вследствие трудности изготовления траверс, гарантирующих одновременность размыкания. Кроме того, остается невыясненным вопрос о распределении напряжения между отдельными точками разрыва дуги. Все перечисленные системы выключателей дают одинаковые размеры подстанции, так как в них габариты выключателей по длине одинаковы, а габариты подстанции в ширину обуславливаются расстоянием между фазами, принятым 6 м. На основании всего вышесказанного при проектировании подстанции были приняты габаритные размеры масляного выключателя экстраполяционного типа.

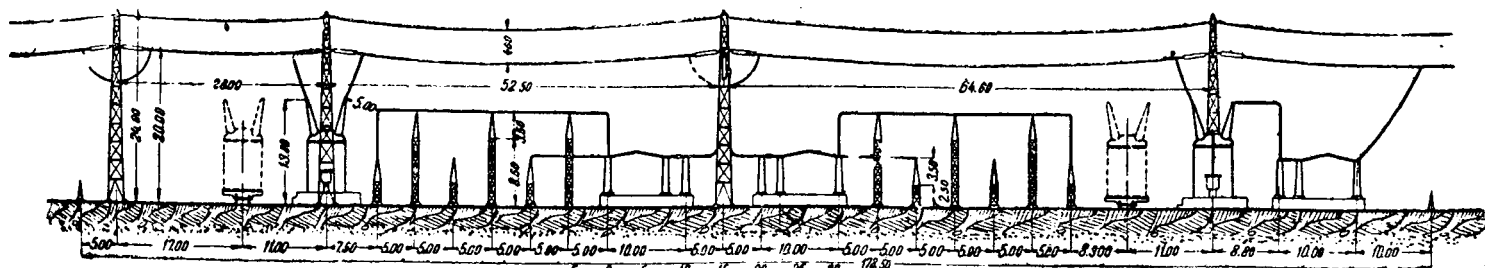
Разъединители приняты по данным предварительной разработки их типа заводом „Электроаппарат“ с моторным приводом (рис. 2).

Далее конструкция подстанции будет определяться системой подвески шин. Здесь намечаются значительные изменения существующих систем подвески в связи с значительным расстоянием между фазами при напряжении 380 kV. Возможны следующие варианты:

- подвеска шин на натяжных гирляндах;
- крепление шин на опорных изоляторах с расположением их в одной плоскости;
- то же с расположением шин по вершинам неравностороннего треугольника.

От подвески шин на натяжных гирляндах приходится сразу отказаться из-за необходимости сооружать тяжелые шинные траверсы, в соответствии с чем получается увеличение площади, занимаемой шинным устройством. Следует отметить, что при напряжении 220 kV подвесная конструкция шин получается более дорогой, чем жесткая конструкция с укреплением шин на опорных изоляторах.

При плоском расположении шин на опорных изоляторах разъединители приходится устанавливать вне шинного устройства, вследствие чего при соединении шин с разъединителями получаются пролеты подводящих проводов свыше 18 м, что недопустимо по условиям прогиба шин. Чтобы избежать больших прогибов в этом варианте, пришлось предусмотреть промежуточные опор-



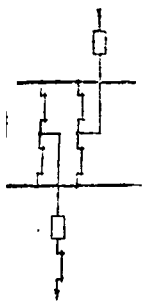


Рис. 3б

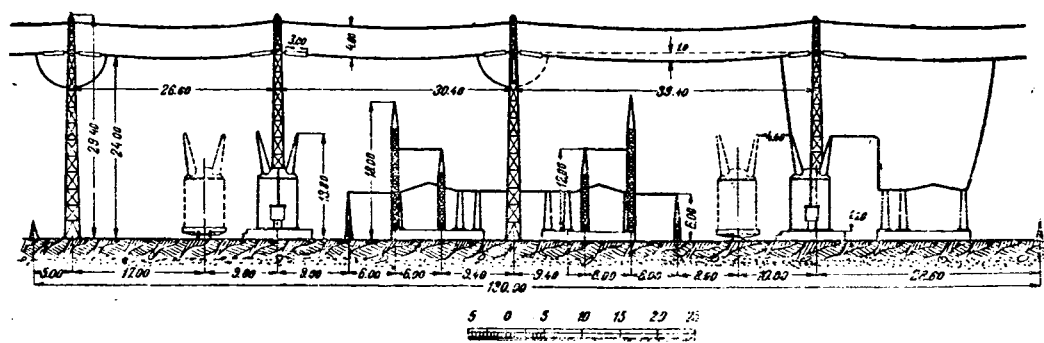


Рис. 4а

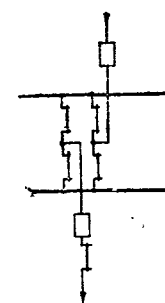


Рис. 4б

ные изоляторы, поддерживающие трубы, соединяющие шины с разъединителями. Последнее обстоятельство в свою очередь влечет за собой необходимость увеличить расстояние между шинами до 10 м. В результате получается значительное увеличение площади, занимаемой подстанцией. Конструкция и схема подходящей и отходящей ячейки подстанции варианта б дана на рис. 3 а и 3 б. Вариант „б“ имеет шины расположенными по вершинам неравностороннего треугольника, причем является возможность расположить разъединители под шинами.

Вследствие больших габаритных размеров разъединителей точка разрыва дуги получается вне шинного устройства на расстоянии не менее 7 м от ближайшей шины. Подобное размещение шин и разъединителей дает минимальные габаритные размеры подстанции и сокращает до минимума длину соединительных труб между шинами и разъединителями. Некоторым недостатком системы является необходимость поднимать среднюю шину на значительную высоту. Несмотря на это, вес металлических конструкций в этом варианте получается меньше, чем во всех остальных. Конструкция и схема подходящей и отходящей ячейки подстанции по варианту „с“ дана на рис. 4 а и б. Вследствие разбора достоинств последней системы шин и того обстоятельства, что при проектировании подстанции Кгэс проектировщики были ограничены размерами предназначенного для подстанции искусственного островка, был

принят вариант „с“ конструкции шин подстанции на 380 кВ.

На подстанции принята простая двойная система шин, так как выполнение резервной системы в виде буквы п увеличивает ширину подстанции и рентабельно лишь при большом числе отходящих и подходящих фидеров.

В нашем случае число подходящих фидеров равно 6, число отходящих 3. Таким образом удлинение подстанции при простой двойной системе шин незначительно, а ширина подстанции остается минимально возможной.

Шины крепятся на опорных изоляторах высотой 3,5 м и выполнены из железных труб диаметром 100 мм, покрытых слоем меди. Возможно также выполнение шин из железных оцинкованных труб. Расстояние между жестко закрепленными шинами принято 6 м; между подвешенными воздушными проводами 8 м.

Разъединители устанавливаются на отдельных железобетонных фундаментах облегченной конструкции. Высота фундаментов принята 1,2 м. Измерительные трансформаторы напряжения приняты каскадного типа. Трансформаторы тока предположено выполнять во втулках трансформаторов и выключателей.

Для защиты подстанции от прямых ударов молнии предусмотрены тросы марки СА-150 по три на каждые две соседних цепи. Минимальный диаметр воздушных проводов по условиям короны получается 42 мм. Для всех шинных устройств был произведен электрический и механический расчет.

25 XII 1933 г.

Производственная сигнализация на центральных электростанциях

Инж. М. Н. Карнеев и инж. В. И. Демидов
Москва, М. О. „Связьмонтаж“

От редакции

„Вопросы автоматизации производственных процессов на Цэс получили за последние годы широкое развитие. Бесперебойность работы электроцентралей сейчас в значительной степени зависит от степени этой автоматизации. Статьей гг. Карнеева и Демидова, посвященной вопросам автоматизации производственных процессов Цэс с точки зрения систем и методов сигнализации, редакция открывает обсуждение этих вопросов на страницах журнала и приглашает читателей высказаться по затронутым вопросам.“

Во второй пятилетке поставлена одна из главнейших задач — овладение новейшей техникой. Под этим следует понимать не только освоение техники орудий труда, но и освоение техники управления производством.

Так как электрификация орудий труда и является новейшей техникой, дающей повышение их эффективности, то применение электрификации в области управления производством также в значительной мере скажется в поднятии эффективности данного производства. Примерами электрификации управления и является производственная электросигнализация, которая в настоящее время получила широкое применение на наиболее ответственных участках управления: железные дороги, шахты, электростанции, заводы, гостиницы, больницы и т. д.

Под электрической производственной сигнализацией понимается способ передачи различных сведений с помощью оптических и акустических сигналов, приводимых в действие электрическим током. Электрическая сигнализация является наиболее простым и удобным видом связи между различными участками производства на предприятиях. Ее преимущества заключаются в скорости и точности передаваемых сведений, простоте подачи и приема сигналов, простоте оборудования и обслуживания сигнализации, наличии полного контроля за передачей сигнала и получением обратных извещений.

По сравнению с телефонной связью сигнализация позволяет на производствах значительно увеличить скорость передачи часто повторяющихся однородных сведений с одного рабочего

места на другое, позволяет быстро и своевременно предупреждать руководителей о неполадках и авариях, а все это позволяет увеличивать производительность труда и использование оборудования. Электрические станции в своевременном своем развитии при сложности устройства и территориальной разбросанности оборудования, тесно связанного в работе, без сигнализации работать не могут. Поэтому сигнализация автоматическая о положении различных машин и аппаратов как дополнение к контрольно-измерительным приборам на электростанциях всегда применялась. Но современные электростанции для осуществления централизованного руководства, для ускорения различных манипуляций с пуском в ход и остановкой машин и агрегатов, для предупреждения и быстрой ликвидации аварий и улучшения технического руководства работой требуют еще особой оперативной, аварийной и вызывной сигнализации. Такая сигнализация разработана нами по заданию I Мгэс.

По своему назначению она делится на следующие виды: 1) оперативную, 2) сигнализацию вызова ответственных дежурных, 3) аварийную по отделам и общую.

Принципиальная схема производственной сигнализации с указанием сигнального щита, сигнальных табло и аварийно-вызывных кнопок дана на рис. 1.

1. Оперативная сигнализация

Оперативная сигнализация служит для целей передачи со щита управления в машинные залы или котельные распоряжений о пуске или остановке какой-либо машины, о принятии нагрузки, об оставлении вращающейся машины без нагрузки и др. Сигнализация производится нажатием кнопок на щите управления и загоранием в цехе световых окон на табло с соответствующими надписями и звучанием sireны. При этом предусмотрена возможность подачи из цеха на щит управления обратного сигнала, уведомляющего, что сигнал в цехе принят. Обратный сигнал закладывается в нажатии ответной кнопки в цехе и погашении на щите управления соответствующей лампы, которая была включена при подаче сигнала со щита.

Принципиальная электрическая схема оперативной сигнализации представлена на рис. 2. Каждому отдельному сигналу на щите управления принадлежит одна из кнопок K_1, K_2, K_3 , одно из реле P_1, P_2, P_3 и ответная лампочка L_1, L_2, L_3 . В цехе для каждого сигнала имеется реле одно из P_4, P_5, P_7 , сигнальная лампа L_4, L_5, L_7 , и один общий сигнал sireны.

При нажатии на щите управления кнопки K_1 ток от +Б через пружины кнопки идет с одной стороны в реле P_6 , которое притягивает якорь и включает sireну, с другой стороны ток от кнопки пойдет в реле P_1 и в реле P_4 , а параллельно в лампы L_1, L_4 . Реле P_1 притягивает якорь и получает питание от +Б помимо кнопки K_1 , которая теперь может быть опущена. При прекращении нажатия кнопки K_1 sireна выключается, но лампы будут гореть до тех пор, пока не будет нажата кнопка K_0 , которая выключит питание цепей сигналов, реле P_1 отпустит якорь, и сигналы погаснут, о чем дежурный на щите управления узнает по погашению ответной лампы L_1 . Включение реле sireны производится параллельно от всех кнопок, соответствующих данному цеху.

Для этой сигнализации применены простые шестипружинные кнопки (телефонные джеки) без арретира.

Питание цепей сигнализации производится постоянным током напряжением 50 В. Сигнальные лампы взяты мощностью 50 и 25 В железнодорожного вагонного типа с патроном Сван. Световые табло выполняются двухсторонними. В машинном зале световое табло располагается в арке между первым и вторым машинными залами. В котельной № 1 световое табло подвешивается под переходным мостиком посредине котельной, а в котельной № 2 подвешивается под существующим указателем нагрузки. Слово „срочно“ и „внимание“ будет нанесено ярким цветом на красном стекле,

остальные слова—черным цветом на матовом стекле. Ответные кнопки располагаются под табло внизу на столе.

2. Вызывная сигнализация

Вызывная сигнализация подается со щита управления в котельные, машинный зал и распределительные устройства с целью вызова к телефону дежурного инженера электрика или ответственных дежурных по котельному и машинному отделам. Сигнализация инженеру и электрику подается сразу параллельно в обе котельные и в машинные залы нажатием одной кнопки в особой кнопкой в распределительные устройства. Сигнализация вызова дежурных по отделам дается только в тот отдел, дежурного которого вызывают.

Принципиальная электрическая схема сигнализации изображена на рис. 3. При вызове дежурного инженера нажимается кнопка K_1 . При этом ток от +Б через кнопку идет параллельно в реле P_1, P_5, P_6 и т. п., которые притягивают якорь, включают по цехам лампы в световых окнах на табло и блокируются, т. е. получают питание от +Б непосредственно через свои контакты помимо кнопки K_1 . Через другие две пары пружины кнопки K_1 ток пройдет в реле, включающие в отделах sireны оперативной сигнализации.

До тех пор, пока кнопка K_1 будет нажата, реле P_4, P_5, P_6 будут удерживать в притянутом положении свои якоря, и sireны будут гудеть. При отпускании кнопки sireны перестанут работать, но лампы в световых окнах будут продолжать гореть до тех пор, пока в отделах не будут нажаты ответные кнопки K_5, K_6, K_7 . Тогда реле лишится питания, отпустит якоря, и сигналы погаснут. Вызов дежурного электротехника производится совершенно так же, как и инженера. Вызов ответственных дежурных по отделам отличается от вызова инженера и электротехника только тем, что здесь сигнал подается только в один отдел.

Световые окна с надписями «дежурный инженер», «дежурный электротехник» и «щит управления» (для вызова ответственного дежурного по данному отделу) помещаются на том же табло, где и сигналы оперативной сигнализации.

3. Аварийная сигнализация местная и общая

А) Местная аварийная сигнализация. Эти два рода сигнализации изображены на общей принципиальной электрической схеме рис. 4. Местная аварийная сигнализация как по машинному отделу, так и котельным имеет целью вызов ответственного дежурного по отделу из разных мест отдела в случае каких-либо аварийных неполадок в данном месте не общестанционного характера. Подача сигнала производится нажатием специальной кнопки на месте аварии, вследствие чего загорается на табло у дежурного по отделу световое окно с надписью, указывающей место, откуда подается сигнал, и звучит аварийная sireна. Sireна прекращает звучать, как только кнопка на месте аварии будет опущена, световые же табло горят до тех пор, пока дежурный персонал не погасит их ответными кнопками, теми же, которые употребляются и в прочих видах сигнализации. Световые табло являются общими с сигнализациями оперативной и вызывной.

Аварийные кнопки устанавливаются на видном месте: в насосной, у турбин, у конденсаторов, у экономайзеров, у водоочистителей и в котельной по этажам.

Б) Общая аварийная сигнализация. Общая аварийная сигнализация имеет целью сообщать дежурному, а в дневное время и административно-техническому персоналу станции о происшедшей аварии и указывать отдел и место аварии. Такой сигнал дается только в том случае, если авария общестанционного характера или если срочно требуется довести о ней до сведения дежурного инженера. Подаваться общеаварийный сигнал, как правило, должен только ответственным дежурным по отделу и только в исключительных случаях, когда серьезность аварии очевидна, местный

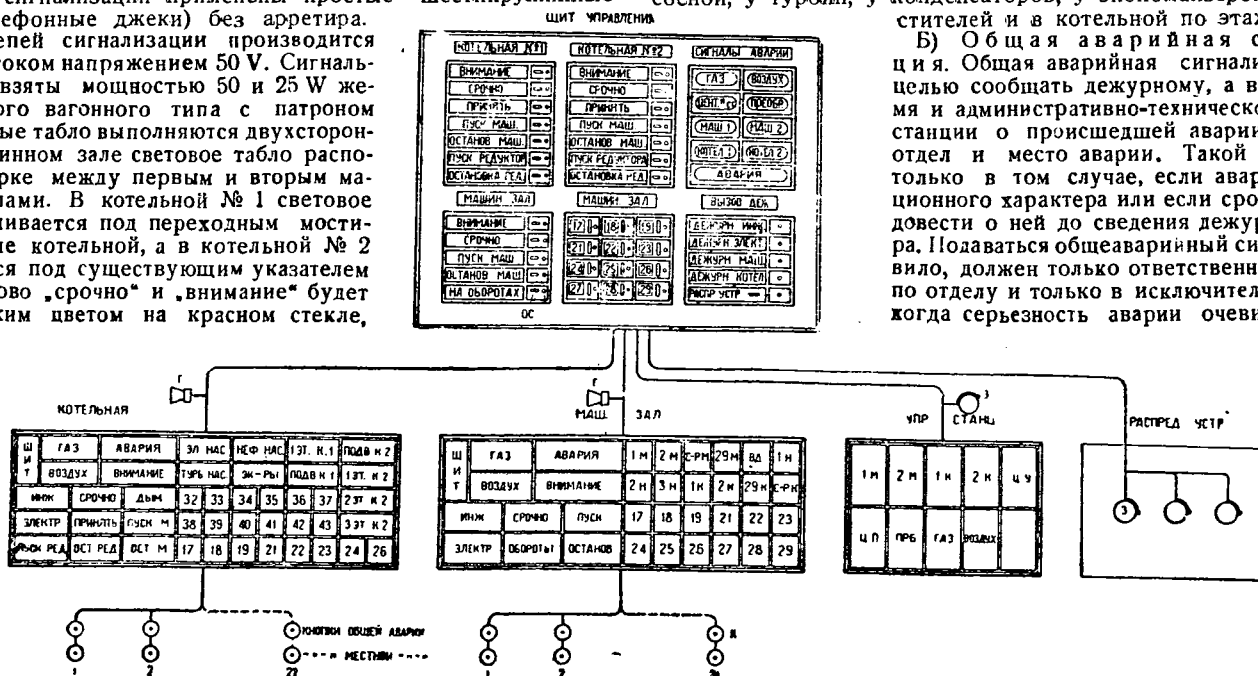


Рис. 1. Кнопка, дающая ответный сигнал. Звонящая кнопка, лампочка, sireна

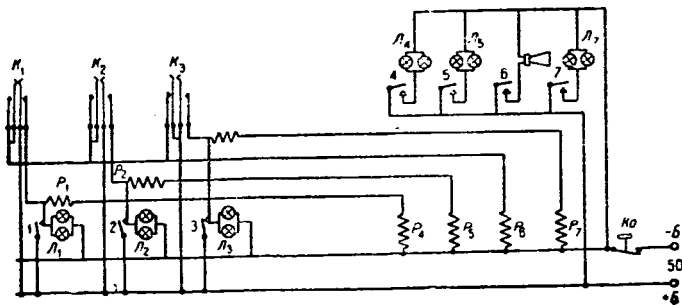


Рис. 2. Принципиальная схема оперативной сигнализации

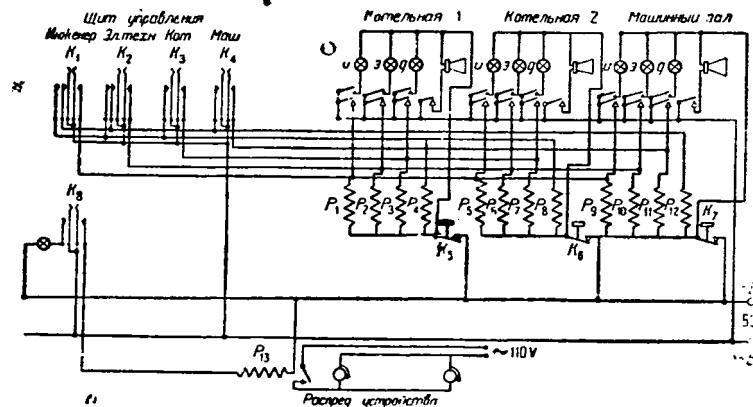


Рис. 3. Принципиальная схема сигнализации вызова ответственных дежурных от щита управления

же аварийный сигнал может быть дан местным дежурным персоналом.

Для подачи общеаварийного сигнала в котельных и машинном зале во всех пунктах, где установлены местные аварийные кнопки, устанавливаются еще особые кнопки. При подаче общеаварийного сигнала на световом табло того отдела, откуда сигнал подан, загорается окно с надписью места аварии в данном отделе; на щите управления и в управлении станции загорается табло с надписью отдела, откуда подан сигнал аварии, а по всем остальным отделам загораются поля с надписью «авария».

Кроме световых сигналов во всех местах авария отмечается также особым тоном сиреной, а в управлении станции, распределительных устройствах, местах помощника котельного и машинного мастеров — звонками. Сирена и звонок звучат только пока нажата кнопка, а световые поля будут гореть, пока их не погасит местный дежурный персонал нажатием ответной кнопки. Кнопка для гашения табло щита управления и управления станции устанавливается на щите управления. Световые табло аварийной сигнализации на щите управления будут иметь следующие надписи: 1) Котельная № ..., 2) Машинный зал № ..., 3) Преобразователи, 4) Центральная подстанция.

В коридоре управления станции кроме таких же табло будет еще табло с надписью «щит управления», загорающееся в том случае, если общеаварийный сигнал от дан со щита управления.

Таким образом если дежурный инженер и прочий административно-технический персонал станции в момент аварии находился в управлении или у щита управления, то, получив аварийный звонок, он сейчас же по световому табло может определить отдел станции, где произошла авария, а придя в этот отдел, по местному аварийному табло для ответственного дежурного определить и место отдела, откуда аварийный сигнал дан. В случае, если авария застанет дежурного инженера в котельной или в машинном зале, то, услышав аварийную сирену, он так же, как и в первом случае, по аварийному табло для дежурного по отделу может определить место, откуда сигнал подан. Если же в данном отделе ни одно из местных аварийных окон на табло не горит, это значит, что аварийный сигнал дан из другого отдела или со щита управления и, таким образом, дежурный инженер может быстро определить место, куда ему следует направиться.

Как видно из схемы, в местах подачи аварийных сигналов имеется по две кнопки — одна общей аварии и вторая местной. При нажатии кнопки местной аварии, допустим, № 1 в машинном зале, ток от +Б пойдет через кнопку 1 в реле P_2 и параллельно в реле P_4 машинного зала, реле притянут якоря и включат сигнальные лампы и сирену. Кроме того, реле P_2 заблокируется, отчего лампа будет гореть и по прекращении нажатия кнопки. Выключается лампа нажатием ответной кнопки K_0 вследствие прекращения питания реле P_2 .

Линия сигналов местной аварии подключена параллельно к общеаварийным кнопкам, так что при нажатии последних в данном отделе загораются сигналы, указывающие место аварии. По этажам котельной кнопки местной и общей аварии уста-

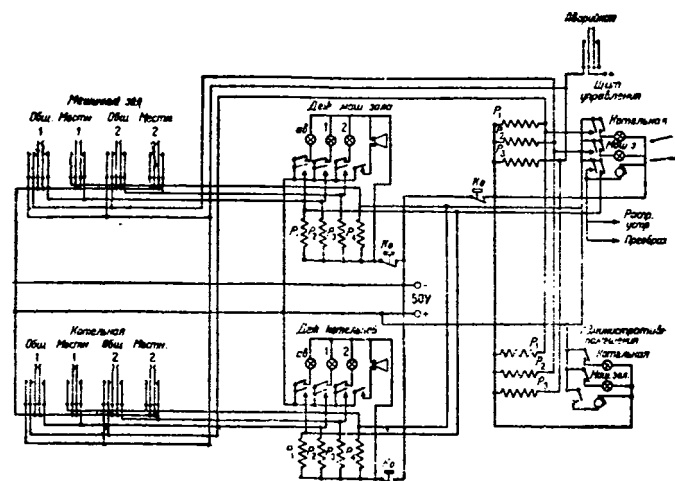


Рис. 4. Принципиальная схема аварийной сигнализации общей аварии и по отделам

навливаются у каждого котла, так что при нажатии местной кнопки на табло у дежурного по котельной загорается сигнал, указывающий этаж и номер котла, т. е. линия сигнала этажа должна быть присоединена параллельно ко всем кнопкам данного этажа. При нажатии общей аварийной кнопки в котельной получается тот же сигнал, что и от местной кнопки, а на щите управления и по всей станции общий сигнал аварии.

На экономайзерах аварийные кнопки устанавливаются из расчета, что одна кнопка обслуживает несколько котлов (3—4) и при ее нажатии на табло котельной загорается надпись «экономайзеры» и номера котлов, к которым кнопка относится. Все общеаварийные кнопки данного отдела приключены параллельно к линии сигнала аварии, идущей из отдела на щит управления, и если в каком-либо месте данного отдела будет нажата кнопка общей аварии, то на щите управления и в управлении станции реле включает лампы светового окна с надписью данного отдела, а второе реле P_2 включает звонок, а также цепь общего аварийного сигнала (сирена и окно с надписью «авария») во всех отделах станции. Реле общей аварии на щите управления и в отделах, включающие световые табло после притягивания якоря, заблокировываются и отпускают якоря только при нажатии ответной кнопки в данном отделе. Реле аварийного звонка на щите управления держит в притянутом положении якорь только до тех пор, пока нажата кнопка в месте подачи сигнала аварии.

Сигнал общей аварии может быть дан и со щита управления, для чего там имеется специальная аварийная кнопка. Эта кнопка дает питание в цепь реле аварийного звонка щита управления, и сигнал общей аварии дается по всем отделам в обычном порядке, начиная от щита управления.

4. Технические детали устройства сигнализации

Для включения ламп световых табло применяются реле типа АТС с мощными контактами. Для сигнализации оперативной применяются реле АТС с контактной системой, рассчитанной на пропускание тока 3,2 А. Для сигнализации аварийной и вызывной применяется реле с двойной контактной системой мощной на 2 А и нормальной телефонного типа. Реле для включения на щите управления контрольных сигналов оперативной сигнализации применены нормального телефонного типа.

Для включения аварийных сирен применены сильноточные реле типа Р-3.

Звонки применяются тирольские на напряжение 50 В. Питание реле и сигнальных ламп осуществляется постоянным током напряжением 50 В, для чего используются стационарные аккумуляторные батареи. Сигнальные табло выполняются в деревянных ящиках с открывающейся лицевой стороной. Все реле в каждом отделе монтируются в специальных ящиках. Аварийные, вызывные и ответные кнопки в местах подачи сигналов монтируются в специальных деревянных ящиках. На щите управления все кнопки и световые табло располагаются на пульте управления.

В качестве линий для соединения между собой сигнальных приборов в отделах и цехах, а также и со щитом управления применяются телефонные оцинкованные кабели марки ТРК разных емкостей с диаметром жил 0,4 мм. Для устройства разветвлений кабелей в качестве распределительных устройств применяются распределительные полосы со штифтами, которые помещаются в закрытых железных ящиках, укрепляемых на стенах. Кабели прокладываются по стенам, в кабельных каналах и шахтах.

В качестве питательных проводов применяются кабели СРГН сечением $2 \times 4 \text{ мм}^2$.

Максимальный расход, необходимый для работы сигнализации в течение суток, составит не более 40 Ач. Устройство вычислительной электрической сигнализации — около 16 000 руб.

Электрооборудование на нефтеналивных судах

(По поводу статьи инж. Шкамерда В. И. «Электрооборудование на бензино-нефтеналивных судах»).

Инж. Н. М. Ковалев

г Николаев, УССР

1. Согласно правил классификационных обществ за границей (Английского, Германского и др. лloydов), а также регистра Союза ССР на нефтеналивных судах допускаются следующие предельные напряжения электрического тока и системы распределения:

а) на судах, перевозящих нефтепродукты с температурой вспышки паров ниже 65°C при атмосферном давлении в 760 мм, напряжение на зажимах генераторов постоянного тока, питающих силовую сеть, не должно быть выше 230 В, а осветительную сеть выше 115 В;

б) на судах, перевозящих нефтепродукты с температурой вспышки паров ниже 65°C при атмосферном давлении в 760 мм, напряжение как для силовой, так и осветительной сети не должно быть выше 230 В;

в) на всех нефтеналивных судах при применении переменного тока напряжение как для силовой, так и осветительной сети не должно быть выше 120 В;

г) система распределения тока для всех нефтеналивных судов должна быть двухпроводная, причем одножильным оцинкованным или одножильным оцинкованным и бронированным кабелем на судах, перевозящих нефтепродукты с температурой вспышки паров ниже 28°C при атмосферном давлении в 760 мм и двухжильным оцинкованным или оцинкованным и бронированным кабелем на всех остальных нефтеналивных судах.

Опытные данные приводят к тому заключению, что для нефтеналивных судов возможна унификация напряжения 230 В для всей вспомогательной электроустановки (силовая и осветительная), которая не представляет особой опасности, вследствие наличия такой конструкции арматуры, как подпалубная лампа судового образца в герметическом исполнении. Дальнейшее увеличение напряжения считается нецелесообразным, поскольку защита аппаратуры и арматуры вызывает уже значительные дополнительные расходы и затрудняет обслуживание. На наших судах последней серии будет применено напряжение 220/110 В — первое для силовой сети, второе — для осветительной.

Для гребных же электроустановок возможно увеличение напряжения до 500—1000 В и выше, поскольку вся электроустановка расположена в машинном помещении.

Система распределения тока на нефтеналивных судах должна быть двухпроводная для вспомогательных электроустановок. Что касается конструкции кабеля, то для всех нефтеналивных судов можно было бы для освещения применить двухжильный кабель оцинкованный и бронированный, как более отвечающий судовым условиям. Применяемый на наших судах одножильный оцинкованный кабель имеет те недостатки, что подвергается частым повреждениям при прокладке во время монтажа, а также и во время его службы на судне (появление трещин).

В отношении прокладки кабеля в тех же Правилах указывается, что все помещения на нефтеналивных судах разделяются на три категории:

- первая категория — нефтеналивные трюмы (танки) и коффердамы;
- вторая категория — насосные отделения, помещения для грузовых нефтеперекачивающих насосов, а также помещения, непосредственно примыкающие к наливным трюмам (танкам);
- третья категория — все остальные помещения.

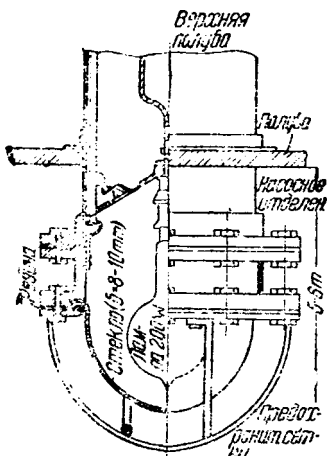


Рис. 1. Герметический фонарь для освещения насосного отделения (теплоходы «Эмбанефть»).

Для помещений первой категории совершенно запрещается электропроводка и установка какой-либо арматуры. Для освещения могут быть допущены только специальные аккумуляторные переносные фонари, разрешенные для производства работ в помещениях, опасных по отношению к взрыву.

Для помещений второй категории допускается электропроводка в железных газовых трубах и установка арматуры (только ламп) в герметическом исполнении при условии, что эти помещения имеют искусственную и естественную вентиляции. В случае отсутствия последней допускается освещение только наружное через специально сделанные герметические люки; подводка кабелей и вся арматура должны находиться вне этих помещений (эскизы арматуры такой конструкции представлены на рис. 1 и 2, на которую инж. Шкамерда и ссылается).

Для помещений третьей категории допускается прокладка кабелей в открытом исполнении. В жилых помещениях допускается применение проводов без оцинкованной оболочки.

Для освещения грузовых палуб допускаются исключительно постоянные герметические фонари с лампами мощностью 200—500 Вт, расположенные не ниже 5 м от палубы; штепсельные соединения совершенно не допускаются. Для сигнальных и отличительных огней разрешается применять штепсели такой конструкции, которая не допускала бы выключения и включения вилок под током.

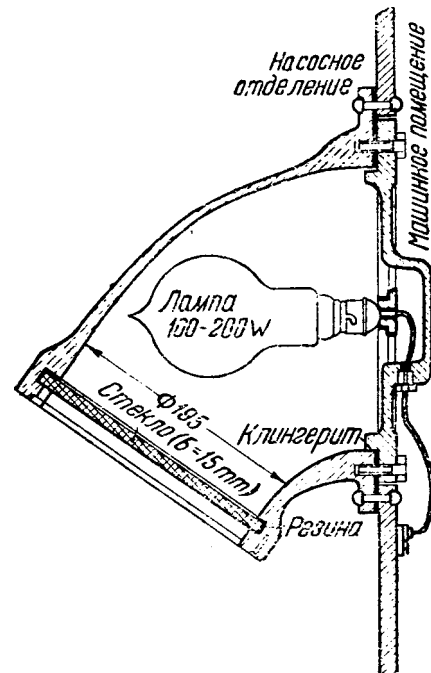


Рис. 2. Герметический фонарь для освещения насосного отделения (теплоходы «Нефтесиндикат» и «Советская нефть».)

На находящихся в эксплуатации судах прокладка кабелей для освещения насосных отделений произведена в тех же помещениях в железных трубах и установлены подпалубные лампы в герметическом исполнении. Замена ламп производится в этих помещениях при выключенной цепи. Выключение производится двухполюсным выключателем, расположенным на переборке насосного отделения при входе с грузовой палубы на высоте 2 м от последней. Такой способ применен на всех нефтеналивных судах постройки южных судостроительных заводов за исключением нефтевоза «Эмбанефть» и нефтевозов «Советская нефть» и «Нефтесиндикат» (последние два — заграничной постройки). Арматура типа, указанного на рис. 1, была установлена на теплоходе «Эмбанефть», эксплуатация которого дала неудовлетворительные результаты из-за постоянного присутствия воды в трубах, в которых помещалась лампа. Выполнение отличается сложностью, громоздкостью и дороговизной. Напротив, арматура, изображенная на рис. 2, установленная на теплоходе «Нефтесиндикат», более проста.

Применение подпалубных ламп в герметическом исполнении для освещения насосных помещений считается вполне допустимым и не представляет большой опасности при условии тщательности монтажа и установки и, кроме того, установки ее на высоте не менее 3 м от палубы, на которой расположены

грузовые насосы. Выключатели устанавливаются вне этих помещений, и питание для этой цепи необходимо иметь от распределительного щитка судового освещения от отдельных предохранителей для каждого помещения (на судне два таких помещения).

Такой способ прокладки кабелей в железных трубах и установка осветительной арматуры проводятся на всех нефтеналивных судах, эксплуатация которых уже в течение четырех лет выявила полную безопасность, что дает основание признать его допустимостью для освещения насосных отделений.

Прокладка кабелей в помещениях, непосредственно примыкающих к наливным трюмам, проводится на судах в открытом исполнении, и установка арматуры подпалубных ламп в герметическом выполнении. Выключатели устанавливаются на наружных переборках на высоте около 2 м от грузовой палубы. Помещения эти имеют назначение для хранения запасных частей к механизмам и шлангов.

Для освещения грузовой палубы применялись фонари берегового типа из-за отсутствия специальной герметической арматуры, и только на последних судах начали устанавливать арматуру, более соответствующую этим условиям, с лампами мощностью 200—300 W (500-W лампы нельзя установить из-за габаритов фонаря), устанавливаемую на мачтах на высоте от 5 до 8 м над грузовой палубой. Штепсельные соединения для переносных ламп и сигнальных огней устанавливаются также на мачтах, но на высоте 3—4 м над грузовой палубой.

Такое выполнение электропроводки и установки осветительной арматуры в помещениях второй категории считается нормальным и в практике не встречает каких-либо возражений даже со стороны иностранных классификационных ллойдов. Все нефтеналивные суда имеют заграничные сертификаты и свободно заходят в Гамбургский порт, в котором такие суда подвергаются особенно строгому техническому осмотру.

Прокладка кабелей под ходовым мостиком на нефтеналивных судах заслуживает большого внимания, поскольку по данным эксплуатации и в результате ряда осмотров выяснилось, что вследствие вибраций на судне наблюдаются повреждения свинцовой оболочки кабелей (трещины). Способ, который указывается инж. Шкамердой, прокладка кабелей в трубах, вследствие дороговизны и невозможности обслуживания не получил широкого распространения и был заменен открытым способом с защитными железными кожухами, удобным для обслуживания и контроля.

Открытый способ заключается в том, что кабель свободно прокладывается на панелях с менее частым креплением скобами

и защищается железными кожухами. В местах, наиболее подверженных вибрациям, кабель прокладывается волнообразно (с компенсаторами). Такой способ монтажа кабелей следовало бы распространить и на наших судах, так как он представляет собой лучшее разрешение вопроса в отношении числа поврежденных — свинцовой оболочки кабелей.

Для судовых условий освинцованный кабель должен быть заменен более надежной конструкцией, каковой является кабель освинцованный и бронированный. Более высокая первоначальная стоимость такого кабеля окупается надежностью и продолжительностью службы.

Наиболее рациональным решением вопроса была бы разработка новой конструкции кабеля без применения свинцовой оболочки. Такая конструкция дала бы возможность сэкономить большое количество дефицитного металла.

По имеющимся сведениям из иностранной литературы кабели без свинцовой оболочки были уже применены на некоторых судах, и служба их на борту подтвердила удовлетворительные результаты, полученные длительными испытаниями в лабораторных условиях.

2. Групповые коробки освещения на судах последнего выпуска применяются защищенного типа с предохранителями без указателя состояния плавкой вставки, что является также недостатком наших пробковых предохранителей. Такая конструкция коробок, вместо применяемой в герметическом исполнении, более целесообразна и соответствует судовым условиям.

Вот те основные вопросы, которые были затронуты инж. Шкамердой по электрооборудованию нефтеналивных судов и которые должны быть разрешены нашей электропромышленностью.

В дополнение еще отмечу, что отсутствие у нас литературы по затронутым вопросам лишает возможности дать исчерпывающие материалы, проверенные и изученные уже на практике. Вопросам электрооборудования судов мало уделяется внимания не только в литературе, но и в промышленности. За границей же в этом отношении проявляется значительно больший интерес. Имеются даже специальные электромеханические заводы, которые занимаются исключительно разработкой судового электрооборудования и изучением разных конструкций как с точки зрения надежности, так и экономичности их в судовых условиях.

В СССР вопросом электрификации водного транспорта также должно быть уделено больше внимания, поскольку наш морской и речной флот ширится из года в год и который должен стать и станет очень скоро самым мощным и технически совершенным.

20/VII 1933 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

К вопросу об измерениях по ваттметрам, включенным по схеме Арона

Инж. Р. А. Воронов

Томск

При включении двух ваттметров по схеме Арона в трехпроводную цепь трехфазного тока алгебраическая сумма их показаний дает полную мощность всех трех фаз. При этом остается неизвестным, одинаковы ли нагрузки этих фаз и как они отличаются друг от друга, на практике же иногда приходится сталкиваться с необходимостью решения такого вопроса.

В настоящей статье приводится способ, дающий возможность, используя только эти два ваттметра, без каких-либо изменений в схеме найти распределение по фазам мощностей, подводимых из сети (мощности фаз сети), а также токи в отдельных проводах и их углы сдвига по отношению к фазовым и линейным напряжениям сети. Способ этот очень прост, но действителен только для симметричных напряжений сети, т. е. для равных линейных напряжений.

В конце статьи как следствие дан простой способ для определения правильности включения ваттметров и определения знака отсчета по ваттметру с меньшим показанием.

Примем для равных линейных напряжений U_{31} , U_{12} и U_{23} равные же фазовые напряжения сети U_1 , U_2 и U_3

и располагая их векторы так, как это сделано на рис. 1, получаем для последних следующие комплексные выражения через фазовое напряжение U :

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= U_1' + jU_1'' = U; \\ \bar{U}_2 &= U_2' + jU_2'' = \bar{U}_1 a^2 = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}U; \\ \bar{U}_3 &= U_3' + jU_3'' = \bar{U}_1 a = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}U. \end{aligned} \right\} (1)$$

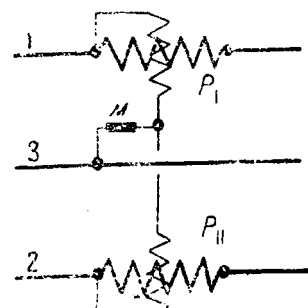
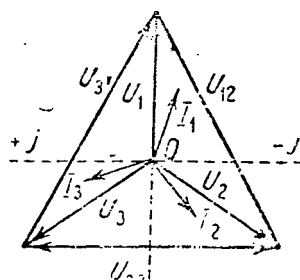


Рис. 2

Токи отдельных фаз представим также в виде комплексов:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_1 &= I_1' + jI_1''; \\ \bar{I}_2 &= I_2' + jI_2''; \\ \bar{I}_3 &= I_3' + jI_3'' \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Мощности, подводимые отдельными фазами сети, представляются через эти комплексы в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 \cos(\bar{U}_1, \bar{I}_1) = U_1' I_1' + U_1'' I_1'' = U I_1'; \\ P_2 &= U_2 I_2 \cos(\bar{U}_2, \bar{I}_2) = U_2' I_2' + U_2'' I_2'' = -\frac{1}{2} U I_3' - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_2'' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При включении двух ваттметров по схеме Арона в первую и вторую фазы (рис. 2) их показания выразятся через те же комплексы

$$\begin{aligned} P_I &= U_{31} I_1 \cos(\bar{U}_{31}, \bar{I}_1) = U_{31}' I_1' + U_{31}'' I_1'', \\ P_{II} &= U_{32} I_2 \cos(\bar{U}_{32}, \bar{I}_2) = U_{32}' I_2' + U_{32}'' I_2''. \end{aligned}$$

Так как напряжения на вольтметровых обмотках будут равны

$$\bar{U}_{31} = \bar{U}_1 - \bar{U}_3 = \frac{3}{2} U - j \frac{\sqrt{3}}{2} U$$

$$\bar{U}_{32} = \bar{U}_2 - \bar{U}_3 = -j \sqrt{3} U,$$

то показания приборов выразятся в виде

$$\left. \begin{aligned} P_I &= \frac{3}{2} U I_1' - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'' = \frac{3}{2} P_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1''; \\ P_{II} &= -\sqrt{3} U I_2'', \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где мощность P_1 введена согласно уравнению (3).

Если теперь отключить вольтметровые обмотки приборов от третьей фазы, оставив их соединенными между собой и разомкнув вставленный в схему рубильник M (рис. 2) или просто отключив проводник, то показания ваттметров изменятся из-за изменения напряжения на их зажимах. Так как обычно сопротивления обмоток обоих приборов выбираются равными друг другу, то напряжение на каждом из них будет равно половине линейного напряжения U_{13} . В этом случае новые показания выразятся через комплексы в виде

$$\begin{aligned} P_I' &= -\frac{1}{2} U_{12} I_1 \cos(\bar{U}_{12}, \bar{I}_1) = -\frac{1}{2} (U_{12}' I_1' + U_{12}'' I_1''), \\ P_{II}' &= \frac{1}{2} U_{12} I_2 \cos(\bar{U}_{12}, \bar{I}_2) = \frac{1}{2} (U_{12}' I_2' + U_{12}'' I_2'') \end{aligned}$$

или, так как согласно уравнениям (1)

$$\bar{U}_{12} = \bar{U}_2 - \bar{U}_1 = -\frac{3}{2} U - j \frac{\sqrt{3}}{2} U,$$

они получают выражения

$$\left. \begin{aligned} 2P_I' &= \frac{3}{2} U I_1' + \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'' = \frac{3}{2} P_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'', \\ 2P_{II}' &= -\frac{3}{2} U I_2' - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_2'' = 3P_2 + \sqrt{3} U I_2''. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Складывая попарно уравнения (4) и (5), находим

$$\begin{aligned} P_I + 2P_{II}' &= 3P_I, \\ P_{II} + 2P_{II}' &= 3P_{II}, \end{aligned}$$

откуда и получаем выражения для определения мощностей двух первых фаз сети

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{3} (P_I + 2P_{II}'), \\ P_2 &= \frac{1}{3} (P_{II} + 2P_{II}'). \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

Для третьей фазы получаем уравнение, исходя из общей мощности

$$P_3 = (P_I + P_{II}) - (P_I - P_2) = \frac{2}{3} (P_I + P_{II} - P_I' - P_{II}'). \quad (6b)$$

Имея отсчеты по ваттметрам при замкнутом рубильнике M (нормальная схема) и после размыкания его, легко вычислить, пользуясь этими уравнениями, мощности каждой из фаз сети по отдельности.

Вследствие несимметрии падений напряжений в фазах нагрузки нулевая точка таковой будет иметь потенциал, отличный от потенциала нулевой точки сети. Из-за несимметрии этих напряжений мощности, потребляемые этими нагрузками, будут отличаться от найденных мощностей. Ввиду неопределенности задачи найти таковые без дополнительных измерений невозможно (различным нагрузкам фаз могут соответствовать одни и те же линейные точки и мощности фаз сети).

Несмотря на это, неравенство значений P_1 , P_2 и P_3 полностью решает вопрос о несимметрии нагрузок фаз сети, указывая, какая из них загружена больше и какая меньше.

Используя уравнения (4) и (5), найдем выражения для составляющих токов первой и второй фаз

$$\left. \begin{aligned} I_1' &= \frac{P_I + 2P_{II}'}{3U}, \\ I_1'' &= \frac{2P_{II}' - P_I}{\sqrt{3}U}, \\ I_2' &= \frac{P_{II} - 4P_{II}'}{3U}, \\ I_2'' &= \frac{P_{II}}{\sqrt{3}U}. \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

Для третьей фазы составляющие найдем из уравнений

$$I_1' + I_2' + I_3' = 0 \quad \text{и} \quad I_1'' + I_2'' + I_3'' = 0,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} I_3' &= -\frac{P_I + P_{II} + 2P_{II}' - 4P_{II}'}{3U}, \\ I_3'' &= \frac{P_I + P_{II} - 2P_{II}'}{\sqrt{3}U}. \end{aligned} \right\} \quad (7b)$$

Уравнения (7a) и (7b) совместно с уравнениями (2) дают возможность найти точки в виде комплексов, по которым нетрудно найти и самые значения токов; деля эти комплексы на комплексы соответствующих напряжений, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\bar{I}_1}{\bar{U}_1} &= \frac{P_I + 2P_{II}'}{3U^2} + j \frac{2P_{II}' - P_I}{\sqrt{3}U^2}, \\ \frac{\bar{I}_2}{\bar{U}_2} &= \frac{P_{II} + 2P_{II}'}{3U^2} + j \frac{P_{II} - 2P_{II}'}{\sqrt{3}U^2}, \\ \frac{\bar{I}_3}{\bar{U}_3} &= \frac{2(P_I + P_{II} - P_I' - P_{II}')}{3U^2} + j \frac{2(P_{II}' - P_I')}{\sqrt{3}U^2}. \end{aligned}$$

Из этих уравнений, деля вторые члены на первые, получаем выражения для тангенсов углов сдвига фаз между токами и напряжениями

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \sqrt{3} \frac{2P_{II}' - P_I}{P_I + 2P_{II}'}, \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= \sqrt{3} \frac{P_{II} - 2P_{II}'}{P_{II} + 2P_{II}'}, \\ \operatorname{tg} \varphi_3 &= \sqrt{3} \frac{P_{II}' - P_I'}{P_I + P_{II} - P_I' - P_{II}'}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

по которым легко уже найти и самые углы и соответствующие им коэффициенты мощности, т. е. их косинусы. Эти углы сдвига и коэффициенты мощности, конечно, также относятся к фазам источника тока, а не нагрузки.

Найдя последние, можно получить значения токов по обычным уравнениям

$$I_n = \frac{P_n}{U \cos \varphi_n}.$$

В случае неравенства сопротивлений обмоток ваттметров необходимо вводить поправку, беря во всех уравнениях вместо показаний P_I' и P_{II}' их исправленные значения $\frac{r_1+r_2}{2r_1}P_I'$ и $\frac{r_1+r_2}{2r_1}P_{II}'$, где r_1 и r_2 — сопротивления обмоток.

Рассмотрим еще случай симметрии нагрузки, при которой одинаковы все токи, все мощности и углы сдвига во всех фазах. В этом случае ток второй фазы может быть выражен через ток первой фазы

$$\bar{I}_2 = I_2' + j I_2'' = \bar{I}_1 \bar{a} = \left(-\frac{1}{2} I_1' + \frac{\sqrt{3}}{2} I_1'' \right) + j \left(-\frac{1}{2} I_1'' + \frac{\sqrt{3}}{2} I_1' \right).$$

что дает для мощности значения

$$P_I = \frac{3}{2} U I_1' - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'',$$

$$2P_I' = \frac{3}{2} U I_1' + \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'',$$

$$P_{II} = \frac{3}{2} U I_1' + \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1'',$$

$$2P_{II}' = \frac{3}{2} U I_1' - \frac{\sqrt{3}}{2} U I_1''.$$

Сравнивая их друг с другом, находим

$$\left. \begin{aligned} P_I &= 2P_{II}', \\ P_{II} &= 2P_I', \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

т. е. при симметрии нагрузок показания ваттметров при размыкании рубильника M меняются местами и уменьшаются вдвое против имевшихся при нормальной схеме. Для тангенсов углов сдвига во всех фазах получается одно и то же выражение

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_{II} - P_I}{P_{II} + P_I},$$

представляющее общеизвестное уравнение для схемы Арона.

Соотношения (9) хорошо используются для проверки правильности включения приборов. Так как в обычных условиях нагрузки отдельных фаз мало отличаются друг от друга, то при размыкании в точке M показания приборов должны, уменьшившись приблизительно вдвое, поменяться местами. Если этого не происходит, то схема включена неверно и ее надлежит исправить. Эти же соотношения относятся и к проверке включения двух однофазных счетчиков (по скорости и направлению их вращения), а также и для трехфазных ваттметров и счетчиков (уменьшение показаний примерно вдвое без изменения направления).

Исходя из этих соотношений, легко получить также правило для определения знака отсчета по прибору с меньшим показанием. Нетрудно видеть, что если при размыкании в точке M его показание остается положительным, то отсчет по нему нужно брать с плюсом, если же показание меняется на противоположное, то с минусом.

17/XII 1933 г.

Простая формула для определения коэффициента мощности асинхронных двигателей

Инж. И. С. Брук
Харьков, ХЭМЗШ

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) асинхронного двигателя определяется его относительной реактивностью, т. е. отношением реактивной мощности P_r к полной мощности P (в киловольтамперах). Обе величины измеряются у зажимов двигателя. Относительная реактивность численно равна $\sin \varphi$.

$$\sin \varphi = \frac{P_r}{P}$$

и

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{P_r}{P} \right)^2}.$$

Реактивная мощность P_r зависит от энергии магнитных полей двигателя. Магнитное поле, в действительности непрерывное, можно мысленно представить разложенным на поле в воздушном зазоре и поле рассеяния.

Магнитный поток в воздушном зазоре убывает по мере роста нагрузки двигателя, потоки рассеяния, наоборот, возрастают.

Вообще говоря, разложение магнитного поля вполне произвольно. Приведенное выше разделение на „рабочий“ поток и поток рассеяния наиболее распространенное.

Изменение „рабочего“ потока от холостого хода до номинальной нагрузки незначительно. Реактивная мощность, соответствующая рабочему потоку, почти равна реактивной мощности холостого хода. Пренебрегая ак-

для относительной реактивной мощности рабочего потока.

$$\frac{P_{r0}}{P} = \frac{i_0}{i} = \mu, \quad (1)$$

где i_0 — ток холостого хода, i — ток для рассматриваемой нагрузки.

Относительная реактивная мощность от потоков рассеяния выражается приближенно формулой

$$\frac{P_{rx}}{P} \cong \frac{i}{i_{kt}} = x, \quad (2)$$

где i_{kt} — так называемый идеальный ток короткого замыкания.

Для данного тока нагрузки i относительная реактивность или $\sin \varphi$ выражается, следовательно, формулой

$$\sin \varphi = \mu + x$$

и

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} \cong 1 - \frac{(\mu + x)^2}{2}, \quad (3)$$

если ограничиться только двумя членами ряда. Например, если двигатель имеет ток холостого хода в 30% от номинального и идеальный ток короткого замыкания, равный 7-кратному номинальному, то

$$\mu = 0,3$$

$$x = \frac{1}{7} = 0,143$$

и при номинальной нагрузке (100%) коэффициент мощности равен

$$\cos \varphi_{100} = 1 - \frac{(0,3 + 0,143)^2}{2} = 0,902$$

для нагрузки в 80% от номинальной

$$\mu = \frac{0,3}{0,8} = 0,375;$$

и

$$x = 0,143 \cdot 0,8 = 0,1145$$

$$\cos \varphi_{80} = 1 - \frac{(0,375 + 0,1145)^2}{2} = 0,88$$

Следовало бы еще учесть влияние омического сопротивления обмотки статора и изменение насыщения путей для потоков рассеяния. Несмотря на это приближенная формула (3) дает очень хорошее совпадение с опытом, если для x вводить значение действительного тока короткого замыкания при номинальном напряжении (для двигателей с короткозамкнутым ротором без вытеснения тока). Соотношение между действительным и идеальным током короткого замыкания в современных двигателях таково, что этим учитывается изменение насыщения

$$\cos \varphi = \max,$$

когда

$$\mu + x = \min.$$

При этом имеем добавочное условие:

$$\mu x = \text{const.}$$

Для приведенного выше примера $\mu x = 0,043$ и $\cos \varphi = 1 - \frac{0,30}{0,207} = 1,45$ от номинального, принятого за единицу,

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{0,414^2}{2} = 0,915.$$

Выведенное выше условие для максимального $\cos \varphi$ может быть сформулировано следующим образом: максимальный коэффициент мощности имеет место при такой нагрузке, при которой реактивная мощность от потоков рассеяния становится равной реактивной мощности холостого хода.

Аналогичное условие равенства постоянных и переменных потерь определяет максимальное значение к. п. д.

Выведенная выше из элементарных рассуждений формула дает хорошее совпадение с опытом и чрезвычайно удобна при всяких расчетах.

21 II 1934 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

„К вопросу об условности математической трактовки физических явлений“

(По поводу статьи проф. Д. Б. Гогоберидзе)

Акад. В. Ф. Миткевич
Ленинград

1. В № 1 журнала «Электричество» за текущий год помещена статья проф. Д. Б. Гогоберидзе под вышеуказанным заглавием, представляющая собой попытку критики некоторых моих взглядов по вопросу о природе электромагнитных явлений. Я с большим удовлетворением прочел эту статью, так как она весьма убедительно доказывает, что довольно трудно подыскать хорошо аргументированные возражения против точки зрения, которая представляется мне единственно правильной в области основных физических представлений. Со многими соображениями и суждениями проф. Д. Б. Гогоберидзе я, конечно, не могу никак согласиться. Остановлюсь на главнейшем.

2. Проф. Д. Б. Гогоберидзе совершенно правильно понял мое определение того, чем должна быть физическая теория. Но он ошибается, требуя от современных систем физических представлений полной законченности и полного приближения к идеалу, к которому мы должны стремиться по мере развития наших физических знаний. До настоящего времени общей физической теории еще не существует в законченном виде. На это я совершенно определенно указываю в заключительной части своей речи «Основные воззрения современной физики»¹⁾. Ввиду сказанного в каждом частном случае речь может идти только о степени приближения некоторой системы физических представлений к стоящему перед нами пока еще отдаленному идеалу и с этой точки зрения данное мной определение необходимо рассматривать как критерий при сравнительной оценке различных современных теоретических построений.

3. Проф. Д. Б. Гогоберидзе не прав, говоря о моей теории электромагнитного поля. О подобной теории я ничего не слышал. Мне можно приписать только упорную защиту системы основных физических представлений, разработанной Фарадеем и развитой далее Максвеллом, а также указание на некоторые логически вытекающие отсюда следствия. Что касается моих разногласий с Дж. Дж. Томсоном по вопросу о том, что же является основной реальностью — магнитные линии или трубки электрического смещения, то необходимо отметить следующие мотивы моей позиции. В последних сериях своих исследований (3-й том «Experimental Researches in Electricity») Фарадей дает обстоятельный анализ всего, известного ему из области электромагнитных явлений, и неоднократно подчеркивает особо важную роль той стороны этих явлений, которую мы воспринимаем в качестве элементов магнитного поля. Таким образом в своем стремлении опираться на представление о магнитных линиях как на исходное, я лишь делаю попытку возможно ближе подойти к общему ходу мыслей Фарадея.

4. Искусство чтения чужих мыслей, несомненно, представляет большой интерес, но едва ли оно может найти целесообразное применение в научной дискуссии о природе физических явлений. Дело в том, что при этом можно впасть в ошибку, как это и случилось с проф. Д. Б. Гогоберидзе. Он приписал мне целый ряд представлений о мировом эфире, которых никогда не было в моих мыслях. Основываясь только на предположениях, он пишет: «...однако можно думать, что согласно фарадеевой идее он (Миткевич) рассматривает мировой эфир как одну из разновидностей обычной материи, имеющую очень малую массу, но чрезвычайно большую упругость...». И дальше проф. Д. Б. Гогоберидзе, без труда разбирает эти устарелые представ-

¹⁾ Речь, читанная в торжественном годовом собрании АН СССР 2 февраля 1933 г. См. сборник „Карлу Марксу Академия наук СССР“ и введение к 3-му изданию курса „Физические основы электротехники“ (1933).

ления, которые, кстати сказать, ни в коем случае не должны быть ассоциируемы с именем Фарадея. Как известно, Фарадей с очень большой осторожностью и при том в немногих лишь случаях прибегал к идее о мировом эфире и никаких соображений касательно его основных свойств сам не высказывал. Совершенно несомненно, что в связи с общей эволюцией наших физических представлений вопрос об эфире должен получить новое освещение, и многое из того, что говорилось раньше об этой субстанции, необходимо отбросить. В вышецитированной своей речи—«Основные воззрения современной физики» — я указываю, что в настоящее время мы не располагаем достаточными материалами для построения физической теории эфира. В этом отношении придется еще много поработать. Но все же говорить о мировом эфире необходимо. Без этого основного представления не может развиваться физическая мысль, стремящаяся связать разрозненные факты в стройное целое.

5. Совершенно непонятно, где в моих работах проф. Д. Б. Гогоберидзе усмотрел утверждение, «что фазовые волны имеют место в нашем трехмерном пространстве на фоне физической первоматерии». Приписывая мне подобное утверждение, он во второй раз делает ошибку на почве неудачной попытки чтения моих мыслей. Всем хорошо, конечно, известно, что многомерное конфигурационное пространство никак нельзя отождествлять с физическим трехмерным пространством. Но также хорошо известно и то, что в простейшем случае о деленного, например, электрона этот последний может рассматриваться как пакет максвелловских волн в нашем трехмерном пространстве, т. е. в этом простейшем случае представления квантовой теории волн приобретают весьма простой физический смысл. Таким образом мы приходим к некоторой конкретной схеме строения отдельного электрона или протона, вполне подтверждаемой известными опытами с дифракцией материальных лучей. Не может быть, однако, чтобы природа этих физических реальностей претерпевала принципиальное изменение в случаях, более сложных, когда мы имеем дело с совокупностями электронов и протонов. Правда, математический аппарат квантовой теории волн пока еще оперирует в этих случаях с фазовыми волнами в многомерных, абстрактно-математических, пространствах и мы еще не умеем осмыслить физическое значение этих операций. Но из этого, повторяю, не следует, чтобы представление о физической природе данных объективных реальностей должно было коренным образом изменяться только потому, что эти реальности входят в состав некоторой их совокупности. Наоборот, надо надеяться, что дальнейшее развитие квантовой теории волн, этой весьма молодой отрасли теоретической физики, даст еще не мало материала для физического понимания ее выводов. Обо всем этом я также говорю вполне ясно и определенно в п. 12 своей речи «Основные воззрения современной физики». Итак, возражения проф. Д. Б. Гогоберидзе по данному поводу необходимо признать не имеющими какого-либо серьезного значения.

6. Упрекая меня в грубо механистических концепциях в отношении электромагнитного поля, проф. Д. Б. Гогоберидзе, к сожалению, не дает четких указаний, в каких именно моих утверждениях выявляется по его мнению грубый механицизм. Ввиду этого есть полное основание считать его упрек совершенно бездоказательным. С гораздо большим правом можно усмотреть в суждениях проф. Д. Б. Гогоберидзе элементы тонко-идеалистических тенденций. Дело в том, что он решительно возражает против попыток представить себе те механические движения, которые обязательно должны иметь место в эфире, в связи с электромагнитными

полям. Он, между прочим, говорит: «Не стоит перечислять всех неудачных и противоречивых попыток дать, исходя из механических моделей эфира, картину явлений, происходящих в электромагнитном поле...» Проф. Д. Б. Гогоберидзе возражает не против неправильного использования механических моделей эфира при рассмотрении процессов, происходящих в электромагнитном поле, а против самого оперирования с подобными моделями. Таким образом он игнорирует то обстоятельство, что всякое движение (в общепринятом смысле слова), всякий физический процесс, обязательно включает в себе некоторое механическое движение, которое хотя и не исчерпывает собой природу соответствующего процесса, но совершенно неотделимо от него.

Сущность механистической точки зрения в области физических представлений состоит не в признании обязательного наличия механического движения, т. е. пространственного перемещения, во всяком движении вообще, во всяком физическом процессе, а в ошибочном предположении, что новые качественные характеристики, которыми всегда обладает любая сложная комбинация каких-либо элементарных движений, могут быть разложены на простейшие свойства этих элементарных движений, и, в частности, в попытках сведения специфических особенностей всякого физического процесса к чисто механическим движениям. Признание эфира, в котором могут иметь место механические движения, само по себе еще не является свидетельством в механистической точке зрения, подобно тому, как и оперирование, например, с «идеальной» жидкостью Гельмгольца вовсе не должно быть рассматриваемо в качестве признака идеалистической установки. Нельзя рассуждать с точки зрения филологических признаков. Суть дела не в словах, а в содержании слов.

Само собой разумеется, что, если механическое движение содержится как совершенно неотъемлемая часть во всяком движении вообще, во всяком физическом процессе, то стремление познать это механическое движение вполне правильно и целесообразно. Желательно по мере возможности составить себе, наконец вероятную картину механических движений, присущих каждому физическому процессу, но надо только помнить, что этим ни в коем случае еще не исчерпывается задача изучения и понимания данного процесса. Таким образом попытки классической физики дать некоторую общую схему механических движений, происходящих в электромагнитном поле, не являются сами по себе чем-то заслуживающим безусловного осуждения. В исторической перспективе их надо рассматривать в качестве совершенно законных, хотя до сих пор и не удачных попыток сделать то, что в конце концов должно быть сделано. Все эти пока безрезультатные попытки представляют собой, однако, весьма ценный материал для будущих исследователей.

Итак, представление о каком-либо физическом процессе вообще или об электромагнитном процессе в частности вне обязательной связи их с какими-то элементарными механическими движениями — принципиально ошибочно, совершенно подобно тому, как будет принципиально ошибочно представление о материи самой по себе. Все это представляет собой явный признак физического идеализма, который, несомненно, является коренной причиной многих патологических уклонов современной физической мысли. Указанная ошибочная точка зрения в отношении электромагнитного поля чрезвычайно распространена в настоящее время. С этим связаны обычно и все возражения против представления о мировом эфире, как о физической субстанции — объемные элементы которой могут претерпевать какие-

либо пространственные перемещения, т. е. находиться в состоянии механического движения»²).

Как известно, идею о «немеханическом» эфире, т. е. о таком «эфире», к которому нельзя применять понятие механического движения, высказал еще Эйнштейн. Но подобный «эфир» является чем-то физически бессодержательным, и термин этот в Эйнштейновском смысле представляет собой в действительности не что иное, как лишь своеобразный синоним термина «абсолютная пустота». Сторонники «немеханического» эфира, таким образом, отрываются от физической действительности, возражая против «механистических моделей» эфира, против «механического» или «полумеханического» эфира.

7. В заключение я скажу несколько слов по поводу основной темы статьи проф. Д. Б. Гогоберидзе — условности математической трактовки физических явлений, — лишь мимоходом затронув той и, по существу им совершенно неосвещенной. Возражая мне в связи с опубликованием мной статьи на ту же тему («Электричество» № 12, 1933, стр. 1), он коснулся только вопроса о квантовании тока, между тем как я связываю это с общим вопросом о квантовании в области электромагнитных явлений и указываю, между прочим, что даже при отсутствии каких-либо иных указаний на квантование тока мы должны были бы это признать, исходя из квантования э. д. с. Таким образом спорный и пока еще весьма темный вопрос о квантовании пространства не играет в данном отношении решающего значения. Ведь я в своей статье совершенно определенно говорю, что суть дела не в квантовании пространства, а в том, что в этой парадоксальной идее, повидимому, содержится зерно истины, состоящее в признании квантования скоростей электронов. Почему проф. Д. Б. Гогоберидзе не привел подлинных строк из моей статьи, а остановился на некоторых лишь словах без необходимого контекста, — это мне непонятно.

В конце концов не ясно, признает ли проф. Д. Б. Гогоберидзе правильной и своевременной постановку общего вопроса о квантовании в области электромагнитных процессов или же он принципиально возражает против этого.

Наконец, нельзя не выразить сожаления, что проф. Д. Б. Гогоберидзе совершенно умолчал о приведенном мной наиболее ярком примере условности математической трактовки физических явлений. Я имею в виду вопрос о «физическом» действии на расстоянии. Ведя борьбу против господства этой псевдофизической идеи, я сформулировал следующий вопрос³):

Могут ли две какие-либо физические системы, находящиеся на некотором расстоянии одна от другой, взаимодействовать так, чтобы при этом в слое, со всех сторон окружающем одну из этих систем, не произошло какого бы то ни было физического процесса?

Вопрос этот имеет весьма существенное значение при рассмотрении природы физических явлений. Я отвечаю на него самым категорическим «нет». Опыт ряда лет показывает, что возражающие против защищаемых мной общих физических представлений обычно почему-то обходят этот вопрос. Все возражения, которые выдвигает против меня проф. Д. Б. Гогоберидзе, несомненно, приобретут большую определенность и четкость, если он не откажется продолжить начатую им дискуссию со мной и при этом ясно укажет, считает ли он необходимым ответить на поставленный мной вопрос так же, как и я, т. е. «нет», или же он присоединяется к проф. Я. Н. Шпильрейну и проф. Я. И. Френкелю, которые защищают точку зрения «физического» действия на расстоянии и потому вынуждены ответить на мой вопрос «да».

2/III 1934 г.

Операционное исчисление Хевисайда

Проф. А. И. Дрожжин и инж. Г. М. Айнгорн
Харбин, Политехнический институт

Операционное исчисление Хевисайда применяется в электротехнике, главным образом, для решения следующих задач:

1. Дана электрическая цепь с неизменными постоянными, в которой до момента $t = 0$ нет э. д. с. (так же, как и нет свободных зарядов в конденсаторах и свободных токов в катушках самоиндукции), а начиная с момента $t = 0$ появляется одна или несколько э. д. с.; требуется определить величину устанавливающегося тока (или токов) в цепи.

2. Дана электрическая цепь с неизменными постоянными, в которой до момента $t = 0$, имелся установившийся режим под влиянием действующих в цепи постоянных или переменных э. д. с., а начиная с момента $t = 0$ произошло изменение в одной или нескольких э. д. с.; требуется определить величину устанавливающегося тока (или токов) в цепи, начиная с момента $t = 0$. Ток, протекающий в любом месте цепи после момента $t = 0$, можно рассматривать как алгебраическую сумму тока установившегося режима, существовавшего до момента $t = 0$, и тока, вызванного в цепи изменением э. д. с. Так как ток установившегося режима, существовавший до момента $t = 0$, на основании теории установившегося режима электрических цепей можно считать известным, то решение задачи сводится, очевидно, к нахождению тока в цепи, устанавливающегося под влиянием дополнительного (положительного или отрицательного) приращения э. д. с. после момента $t = 0$, т. е. к решению задачи типа задачи 1.

3. Дана электрическая цепь, в которой до момента $t = 0$ имелся некоторый установившийся режим под влиянием действующих в цепи э. д. с., а начиная с момента $t = 0$, произошло изменение режима вследствие внезапного изменения постоянных цепи; требуется определить ток (или токи) в цепи, начиная с момента $t = 0$. В этом

случае задачу можно разрешить, вводя в цепь фиктивную дополнительную э. д. с., которая вызывала бы в цепи такой же эффект, как указанное изменение постоянных цепи. В результате задача сводится к задаче типа 2, а следовательно, в конечном итоге, опять к задаче 1.

Помимо этих задач метод Хевисайда применим в электротехнике вообще во всех случаях, когда в цепи происходит нарушение той или иной формы электрического равновесия цепи и к-гда хотят найти изменение во времени одной величины в зависимости от другой величины (например, изменение напряжения на зажимах какой-либо части цепи в зависимости от напряжения, приложенного к цепи, изменение тока в каком-либо разветвлении цепи в зависимости от полного тока, поступающего в цепь, или изменение заряда, накапливающегося в конденсаторе в какой-либо части цепи, в зависимости от напряжения на зажимах цепи). При этом предполагается, что во всех случаях речь идет об обычных электрических цепях с положительным омическим сопротивлением, т. е. исключаются некоторые специальные виды цепей, которые можно рассматривать как цепи с отрицательным омическим сопротивлением (в последних цепях амплитуда свободных колебаний, возникших по той или другой причине в цепи, вместо того чтобы убывать, возрастает).

Необходимо заметить, что все указанные выше задачи, вообще говоря, могут быть разрешены обычным путем, именно путем решения соответствующих дифференциальных уравнений. Однако, как известно, в этом случае для получения окончательного решения необходимо отыскать постоянные интегрирования, отвечающие заданным пограничным условиям, в чем и лежат главные трудности классического метода. Преимущество метода Хевисайда заключается в том, что он дает готовое решение вопроса, если только известна некоторая определенная характеристика цепи (так называемая устанавливающаяся проводимость цепи $A(t)$; см. ниже § 2).

²) См., например, И. Е. Тамм, Под знаменем марксизма № 2, 1933, стр. 225—227; Э. Кольман, Под знаменем марксизма № 4, 1933, стр. 230. М. Л. Ширвиндт, Сборник Ленинградского электромеханического института (ЛЭМИ) № 2, 1933, стр. 9; Ю. П. Шейн, ЛЭМИ № 2, 1933, стр. 11.

³) См. „Электричество“ № 12, 1933, стр. 3 и 1934 № 1, стр. 15—19.

„Социалистическая научная библиотека и наука“ № 4, 1933, стр. 47—49.

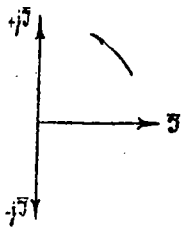


Рис. 1

Часть 1. Основы операционного исчисления и приложение его к цепям с сосредоточенными постоянными).

§ 1. Понятие об операторах в приложении к электрическим цепям

Наиболее знакомыми для электриков являются операторы, действующие на векторы тока и напряжения. Таковым в первую очередь является оператор $\pm j$, эффект которого на вектор тока или напряжения тот, что, не изменяя величины, вектор поворачивается на 90° в сторону положительного или отрицательного вращения векторов, в результате чего получается новый вектор тока или напряжения (рис. 1 для случая действия $\pm j$ на вектор тока \bar{i}). Далее, все виды сопротивлений и проводимостей, написанные в комплексной форме, представляют собой также операторы. Так, например, индуктивное сопротивление $j\omega L$ представляет собой оператор, эффект которого на вектор тока \bar{i} тот, что величина вектора \bar{i} возрастает в ωL раз, а направление меняется на 90° в сторону положительного вращения векторов, в результате чего получается новый вектор, именно вектор напряжения $\bar{U} = j\omega L\bar{i}$. Равным образом эффект оператора $R + j\omega L$ на вектор тока \bar{i} тот, что получается новый вектор $\bar{U} = (R + j\omega L)\bar{i}$, по величине равный $I\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ и по направлению отличающийся от направления вектора \bar{i} на угол $\arctg \frac{\omega L}{R}$.

Обращаясь к случаю неразветвленной цепи из R, L и C с действующей в ней синусоидальной э. д. с. \bar{E} , имеем

$$\bar{E} = R\bar{i} + j\omega L\bar{i} + \frac{1}{j\omega C}\bar{i}. \quad (1)$$

Поскольку j является оператором, мы можем в выражении (1) не только величины $j\omega L$ и $\frac{1}{j\omega C}$, но и величины $j\omega$ и $\frac{1}{j\omega}$ также считать операторами. Эффект оператора $j\omega$ на какой-либо вектор тот, что вектор по величине возрастает в ω раз и поворачивается в сторону положительного вращения векторов на 90° ; эффект оператора $\frac{1}{j\omega}$ на какой-либо вектор тот, что вектор увеличивается в $\frac{1}{\omega}$ раз и поворачивается в сторону отрицательного вращения векторов на 90° (так как $\frac{1}{j\omega} = -j\frac{1}{\omega}$).

Принимая за основной оператор $j\omega$ (что касается оператора $\frac{1}{j\omega}$, то он выражается через оператор $j\omega$), перепишем равенство (1) в виде

$$\bar{E} = R\bar{i} + L(j\omega)\bar{i} + \frac{1}{C(j\omega)}\bar{i}. \quad (1a)$$

Разделив обе части равенства (1a) на \bar{i} , приходим к выражению полного сопротивления цепи Z , написанному в операционной форме в функции от оператора $j\omega$:

$$Z(j\omega) = R + L(j\omega) + \frac{1}{C(j\omega)}. \quad (2)$$

При этом сама величина $Z(j\omega)$ является также оператором, эффект которого на вектор тока \bar{i} тот, что в результате действия $Z(j\omega)$ на \bar{i} получается новый вектор, именно вектор \bar{E} , представляемый выражением (1).

Переходя к мгновенным значениям тока и напряжения для любого режима в неразветвленной цепи из R, L и C , имеем

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt. \quad (3)$$

Расширяя понятие об операторе в том смысле, что оператор может действовать не только на вектор тока или напряжения, но и на мгновенные значения тока и напряжения, мы можем выражению (3) также придать операционную форму. Именно можно считать, что производная от тока по времени $\frac{di}{dt}$ представляет собой ток i , на который действовал некоторый оператор p , т. е. писать в операционной форме, что

$$\frac{di}{dt} = pi.$$

При этом букве p мы не придаем никакого определенного значения, а понимаем ее как символ (символ дифференцирования).

Поскольку интегрирование представляет собой действие, обратное дифференцированию, можно считать, что $\int idt$ представляет собой ток i , на который воздействовал оператор $\frac{1}{p}$, т. е. писать в операционной форме:

$$\int idt = \frac{1}{p} i.$$

Так как воздействие оператором p равносильно дифференцированию, а воздействие оператором $\frac{1}{p}$ равносильно интегрированию то будем называть оператор p дифференциальным оператором, а оператор $\frac{1}{p}$ или p^{-1} интегральным оператором.

Пользуясь в качестве основного оператора дифференциальным оператором p (интегральный оператор $\frac{1}{p}$ выражается через оператор p), мы можем придать выражению (3) следующую форму:

$$e = Ri + Lpi + \frac{1}{C} \frac{1}{p} i. \quad (3a)$$

Разделив обе части равенства (3a) на ток i , приходим к выражению импеданса или полного сопротивления цепи для мгновенных значений тока

$$Z(p) = R + Lp + \frac{1}{Cp}. \quad (4)$$

Сравнивая последнее выражение с выражением (2), мы видим, что формула для $Z(p)$ может быть получена из формулы для $Z(j\omega)$ заменой оператора $j\omega$ на оператор p . При этом подобно величине $Z(j\omega)$ величина $Z(p)$ представляет собой также оператор: именно воздействие $Z(p)$ на мгновенное значение тока i дает мгновенное значение напряжения e

$$e = Z(p)i. \quad (5)$$

Нетрудно убедиться также в том, что в случае разветвленной цепи выражение $Z(p)$ для мгновенных значений тока имеет такой же вид, как и выражение $Z(j\omega)$ для такой же цепи при установившемся режиме переменного тока. Так, например, в случае параллельного соединения из R и L , находящегося под действием э. д. с. e , для мгновенного значения тока i в неразветвленной части цепи имеем выражение

$$\begin{aligned} i &= i_R + i_L, \\ &= \frac{e}{R} + \int \frac{e}{L} dt, \\ &= \frac{e}{R} + \frac{1}{p} \frac{e}{L}, \\ &= e \frac{R + Lp}{RLp}, \end{aligned}$$

откуда

$$Z(p) = \frac{e}{i} = \frac{RLp}{R + Lp}. \quad (6)$$

тогда как $Z(j\omega)$ для той же цепи при установившемся режиме переменного тока имеет вид

$$Z(j\omega) = \frac{\bar{E}}{\bar{i}} = \frac{Rj\omega L}{R + j\omega L}. \quad (7)$$

Вообще можно высказать следующее положение: в случае какой угодно цепи выражение оператора $Z(p)$ для этой цепи может быть получено из выражения оператора $Z(j\omega)$ для той же цепи путем замены $j\omega$ на p .

В результате, так как $Z(j\omega)$ можно считать известным, мы всегда можем написать в операционной форме выражение для $Z(p)$ и, следовательно, выражение для мгновенного значения полного тока i , поступающего в цепь от источника тока с э. д. с. e :

$$i = e \frac{1}{Z(p)}, \quad (8)$$

где оператор $\frac{1}{Z(p)}$ представляет собой величину, обратную оператору $Z(p)$, именно оператор проводимости цепи для мгновенных значений тока.

Точно так же в случае, если вопрос идет о нахождении не полного мгновенного тока, отдаваемого источником тока, а тока в какой-либо части сложной цепи, можно сначала найти выражение для вектора тока I_n в этой части цепи при установившемся режиме переменного тока в функции от э. д. с. \bar{E} (включенной в сложную цепь там же, где включена э. д. с. e) и от некоторого выражения $\frac{1}{Z_j(j\omega)}$

1) Часть I статьи написана проф. А. И. Дрожжиным; II — проф. А. И. Дрожжиным при участии аспиранта и ж. Г. М. Айнгорна.

2) Подробнее об операторах, действующих на векторы тока и напряжения см., например, в курсе Alternating currents and Transients Treated by the Rotating Vector Method, P. M. Colebrook, pp. 4—22

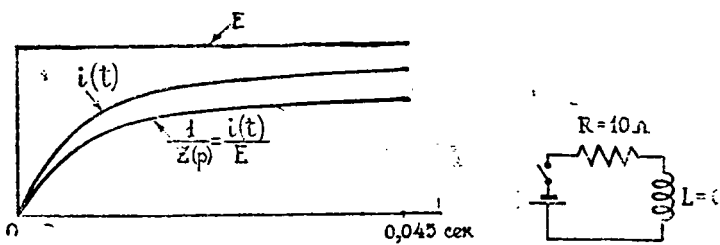


Рис. 2

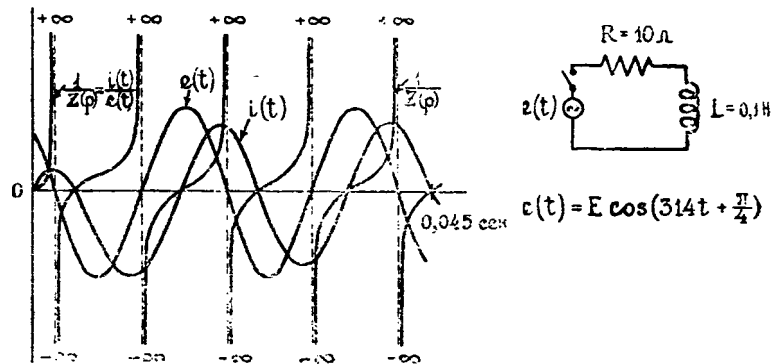


Рис. 3

связывающего \bar{I}_n и \bar{E} , а затем, заменив \bar{I}_n на $i_n \bar{E}$ на e и $\frac{1}{Z(j\omega)}$ на $\frac{1}{Z(p)}$, перейти к соответствующему операционному выражению искомого мгновенного тока i_n . При этом получающаяся в конечном итоге формула, связывающая i_n и e , подобна формуле (8) с той разницей, что в рассматриваемом случае $\frac{1}{Z(p)}$ представляет собой не проводимость всей сложной цепи в целом для источника тока с э. д. с. e , а некоторую так называемую проводимость переноса (transfer admittance), которая связывает ячейку сложной цепи с включенной в ней э. д. с. e с ячейкой, где протекают искомый ток i_n . В еще более общем случае, когда в сложной цепи действует не одна, а несколько э. д. с., включенных в различных частях цепи, вопрос о нахождении мгновенного значения тока в какой-либо части цепи может быть разрешен на основании принципа суперпозиции. Для этого необходимо найти выражение тока в данной части цепи от каждой из данных э. д. с. в отдельности, а затем полученные выражения сложить алгебраически; результат и будет представлять выражение искомого тока. Таким образом в этом случае вопрос сводится к многократному (по числу приложенных э. д. с.) применению формулы, подобной формуле (8).

Из изложенного выше следует, что во всех случаях выражение для оператора $\frac{1}{Z(p)}$, связывающего ток i с э. д. с. e , имеет той же вид, как и соответствующее выражение $\frac{1}{Z(j\omega)}$, связывающее вектор тока \bar{I} с вектором э. д. с. \bar{E} . В этом сходство между операторами $\frac{1}{Z(p)}$ и $\frac{1}{Z(j\omega)}$ [равным образом, конечно, как и между операторами $Z(p)$ и $Z(j\omega)$].

Различие же между ними следующее:

Величина $\frac{1}{Z(j\omega)}$ при данном ω в цепи с неизменными постоянными есть величина постоянная, не зависящая от времени, и определение численного значения (модуля) $\frac{1}{Z(j\omega)}$ по известным формулам теории переменного тока не представляет затруднений.

Величина же $\frac{1}{Z(p)}$, во-первых, изменяется во времени и, во-вторых, для данной цепи с неизменными постоянными R , L и C не есть величина определенная, а зависит от закона изменения приложенного напряжения во времени. Для иллюстрации на рис. 2 и 3 приведены кривые $\frac{1}{Z(p)}$ для одной и той же цепи, состоящей из последовательного соединения R и L : на рис. 2 для случая внезапного приложения постоянной э. д. с. и на рис. 3 для случая внезапного приложения переменной э. д. с. изменяющейся, начиная с момента $t = 0$, по закону $E \cos(\omega t + \frac{\pi}{4})$. Как видно из рис.

2 и 3, изменение во времени проводимости $\frac{1}{Z(p)}$ для различных видов приложенного напряжения получается различным³⁾. Таким образом выражение оператора $\frac{1}{Z(p)}$, взятое само по себе (т. е. не применительно к какому-либо данному приложенному напряжению), не имеет определенного значения, и мы можем рассматривать его только как символ, равным образом как мы рассматриваем как символ оператор p , входящий в состав операционного выражения $\frac{1}{Z(p)}$.

³⁾ При этом, как видно из рис. 3, в случае приложения к цепи э. д. с. переменной и по величине и по знаку, положение усложняется еще тем, что в отдельные моменты, когда $e(t) = 0$, проводимость цепи для мгновенных значений тока равна бесконечности.

§ 2. Сущность метода Хевисайда

Из формулы (8) следует, что если бы был известен характер изменения во времени величины $\frac{1}{Z(p)}$, то вопрос о нахождении выражения для тока i , отвечающего приложенному напряжению e , можно было бы считать разрешенным. Однако, как указано в конце предыдущего параграфа, характер изменения $\frac{1}{Z(p)}$ во времени зависит от закона изменения приложенного напряжения во времени, так что, если искать величину тока i , пользуясь только формулой (8), необходимо было бы для каждого приложенного напряжения e знать соответствующую кривую изменения $\frac{1}{Z(p)}$ во времени.

Задача нахождения изменения во времени тсва i , отвечающего заданному внезапно приложенному напряжению e , была разрешена Хевисайдом другим путем. Он сводит все возможные виды э. д. с. к сочетанию простейших составляющих одной и той же формы, именно к внезапно прилагаемым к данной цепи постоянным э. д. с.

Следуя Хевисайду, рассмотрим сначала случай, когда в некоторой цепи, свободной от зарядок в конденсаторах и от токов в катушках самоиндукции, в момент $t = 0$ начинает действовать постоянная э. д. с. по величине равная единице. Аналитически такую э. д. с. можно представить в виде функции времени, которая в моменты $t < 0$ тождественно равна 0, в момент $t = 0$ внезапно возрастает до величины, равной 1, и в любой момент $t > 0$ равна 1 (рис. 4). Условимся вместе с Хевисайдом называть такую функцию времени „единичной функцией“ времени и будем обозначать ее знаком 1 .

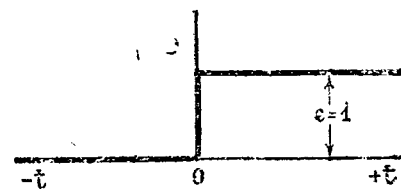


Рис. 4

Таким образом, если э. д. с., действующая в цепи, представляет собой единичную функцию времени, то $e = 1$. Подставляя последнее значение e в формулу (8), имеем

$$i(t) = \frac{1}{Z(p)} 1, \quad (9)$$

причем по самому смыслу входящей в состав правой части равенства единичной функции равенство (9) автоматически заключает в себе то условие, что до момента $t = 0$ ток $i(t) = 0$.

Так как рассматриваемая внезапно приложенная к цепи э. д. с. постоянна во времени и по величине равна единице, то очевидно, что устанавливающийся в цепи ток $i(t)$ в каждый момент численно равен проводимости цепи. Назовем эту изменяющуюся во времени проводимость устанавливающейся проводимостью цепи и обозначим ее через $A(t)$. В таком случае условно можно написать

$$A(t) = \frac{1}{Z(p)} 1, \quad (10)$$

где правая часть представляет собой устанавливающийся ток, а левая — численно равную этому току устанавливающуюся проводимость цепи.

Так как вопрос идет о совершенно определенной форме приложенного напряжения, то функция $A(t)$ зависит только от постоянной цепи и ее можно рассматривать, как некоторый показатель или индекс, характеризующий заданную цепь. Отсюда и название, да-

ное для $A(t)$ уже после Хевисайда Карсоном, — «индексная проводимость» (indicial admittance)⁴). В настоящей статье мы будем придерживаться для $A(t)$ термина «устанавливающаяся проводимость». Знак единичной функции в выражении (10), определяющем $A(t)$, можно было бы и не писать (как это делает, например, Карсон); тогда мы имели бы в левой части равенства устанавливающуюся проводимость цепи в функции от времени, а в правой части выражение той же проводимости в операционном виде. Однако в этом случае необходимо было бы всегда помнить, что вопрос идет о проводимости при внезапном приложении к цепи постоянной э. д. с. (по величине равной единице или вообще какой-либо постоянной э. д. с., так как для всех постоянных э. д. с., прилагаемых в момент $t=0$, устанавливающаяся проводимость данной цепи та же, что и в случае приложения единичной э. д. с.). Для того чтобы подчеркнуть, что вопрос идет именно об указанной проводимости, а не о какой иной, мы сохраним для $A(t)$ приведенное выше условное обозначение (10) через ток, устанавливающийся в цепи при внезапном приложении единичной э. д. с.

Совершенно очевидно (как это только что упоминалось выше), что для всех постоянных э. д. с., прилагаемых к цепи в момент $t=0$, отношение $\frac{i(t)}{E}$, т. е. устанавливающаяся проводимость цепи, независимо от величины E одна и та же и, следовательно, та же, что и в случае $E=1$, именно равна $A(t)$. Также, очевидно, что если постоянная э. д. с. внезапно приложена к цепи не в момент $t=0$, а в какой-либо момент $t=\tau$, то устанавливающаяся проводимость цепи для такой э. д. с. может быть представлена в виде $A(t-\tau)$, где выражение $A(t-\tau)$ получается из выражения $A(t)$ подстановкой $t-\tau$ вместо t .

Изложенного достаточно для того, чтобы, пользуясь величиной $A(t)$, написать в общем виде выражение для устанавливающегося тока при любой форме приложенного к цепи напряжения.

В случае приложения к цепи с устанавливающейся проводимостью $A(t)$ постоянной э. д. с. E величина устанавливающегося тока представляется формулой

$$i(t) = E \cdot A(t). \quad (11)$$

В случае если внезапно приложенная к цепи э. д. с. изменяется по некоторому закону $e(t)$, ее можно представить себе состоящей из ряда наложенных друг на друга постоянных э. д. с., сдвинутых во времени, на равные промежутки времени $\Delta\tau$ (рис. 5). Ток, выз-

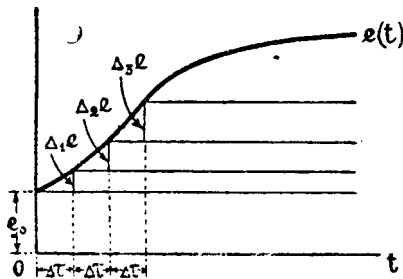


Рис. 5

ванный составляющей e_0 , вступающей в действие в момент $t=0$, согласно формуле (11) равен $e_0 A(t)$. Ток, вызванный всякой другой составляющей э. д. с. $\Delta_k e$, начинающей действовать в момент $t=\tau = k \Delta\tau$, выразится в виде $\Delta_k e A(t-\tau)$. На основании принципа суперпозиции полный ток в некоторый момент $t = n \Delta\tau$ от всех составляющих э. д. с. может быть представлен в виде

$$i(t) = e_0 A(t) + \sum_{k=1}^{n} \Delta_k e A(t-\tau). \quad (12)$$

В пределе при бесконечно малых промежутках времени $\Delta\tau$ величина постоянной э. д. с. $\Delta_k e$, входящей в действие в момент $t = k \Delta\tau$, превращается в $\frac{d}{d\tau} e(\tau) d\tau = e'(\tau) d\tau$, и сумма в правой части равенства (12) должна быть заменена интегралом; в результате для искомого тока получаем выражение

$$i(t) = e_0 A(t) + \int_0^t A(t-\tau) e'(\tau) d\tau, \quad (13)$$

где $A(t)$ — устанавливающаяся проводимость данной цепи, $A(t-\tau)$ получается из $A(t)$ подстановкой $t-\tau$ вместо t , $e'(\tau)$ — первая производная по времени от приложенной к цепи переменной э. д. с. $e(t)$ и e_0 — значение приложенной к цепи э. д. с. в первоначальный момент (в моментах $t=0$).

Интеграл в правой части равенства (13) представляет собой одно из видоизменений так называемого интеграла Дюамеля.

Ряд других видоизменений выражения (13), получающихся одно из другого по правилам интегрального исчисления, приведен ниже:

$$i(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t A(t-\tau) e(\tau) d\tau \quad (13a)$$

$$= \frac{d}{dt} \int_0^t e(t-\tau) A(\tau) d\tau, \quad (13b)$$

а также

$$i(t) = A_0 e(t) + \int_0^t A'(t-\tau) e(\tau) d\tau \quad (13c)$$

$$= A_0 e(t) + \int_0^t A'(\tau) e(t-\tau) d\tau, \quad (13d)$$

где $A'(t-\tau)$ и $A'(\tau)$ обозначают соответственно производные по времени от $A(t-\tau)$ и от $A(\tau)$, а A_0 — значение устанавливающейся проводимости $A(t)$ в момент $t=0$.

Способ интеграла Дюамеля является самым общим способом нахождения тока $i(t)$ для случая внезапного приложения к цепи переменной э. д. с. Однако решение интеграла Дюамеля часто затруднительно, в таких случаях, если это возможно, предпочитают идти другим путем. Именно стараются заменить действие переменной э. д. с. действием постоянной э. д. с., одновременно изменяя проводимость цепи так, чтобы ток, протекающий в цепи, остался бы без изменения. Для этого $f(t)$ в выражении переменной э. д. с. рассматривают как величину, подобную $A(t)$ при постоянной э. д. с., и способами, описанными ниже (например, подстановкой $f(t)$ в интеграл Карсона), находят оператор, отвечающий данной функции $f(t)$. Сочетание

найденного оператора с оператором $\frac{1}{Z(p)}$ данной цепи можно рассматривать как некоторый новый оператор, воздействие которого на постоянную э. д. с. дает искомый ток. В качестве примера рассмотрим случай внезапного приложения к цепи переменной э. д. с., изменяющейся с момента $t=0$ по закону $e = E \sin \omega t$. Подстановкой в интеграл Карсона (см. ниже § 3) найдено, что

$$\sin \omega t = \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} 1.$$

Таким образом переменную э. д. с. $E \sin \omega t$ можно заменить постоянной э. д. с. E с воздействующим на нее оператором проводимости $\frac{p\omega}{p^2 + \omega^2}$. В результате, если собственная проводимость цепи в операционном виде есть $\frac{1}{Z(p)}$, то ток, который потечет в цепи, может быть представлен выражением

$$i(t) = \frac{1}{Z(p)} \cdot \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} 1 E, \quad (14)$$

т. е. формула для $i(t)$ принципиально приводится к формуле (11), так как выражение перед E в правой части равенства (14) условно можно рассматривать как некоторую устанавливающуюся проводимость $A(t)$ (неравную действительной устанавливающейся проводимости данной цепи).

В случае если внезапно приложенная к цепи переменная э. д. с. имеет вид $e = E e_n^{\gamma t}$, для преобразования ее в постоянную э. д. с.

можно воспользоваться или заменой $e_n^{\gamma t}$ с.ответствующим оператором, как в описанном выше случае синусоидальной э. д. с., или же применить формулу перестановки (см. ниже § 5, формула. (46):

$$i(t) = e_n^{\gamma t} \frac{1}{Z(p+\gamma)} 1 E, \quad (15)$$

где оператор $\frac{1}{Z(p+\gamma)}$ получается из оператора проводимости данной цепи $\frac{1}{Z(p)}$ заменой p на $p+\gamma$.

В предыдущем изложении вопрос всегда шел об отделении тока, устанавливающегося в цепи под действием внезапно приложенной э. д. с. Однако принципиально таким же путем, как изложено выше, можно было бы найти, например, изменение во времени напряжения в какой-либо части цепи в зависимости от э. д. с., приложенной к цепи, или изменение во времени тока в каком-либо разветвлении цепи в зависимости от полного тока, поступающего в цепь, и т. д. При этом во всех случаях окончательное выражение, связывающее некоторую функцию $F_2(t)$ с функцией $F_1(t)$, имеет такой же общий вид, что и выражение (8), связывающее ток $i(t)$, устанавливающийся в цепи, с э. д. с. $e(t)$, вызывающей этот ток, именно

⁴ См. I. R. Garson, Theory of the Transient Oscillations of Electrical Networks and Transmission Systems, Proceedings of the AIEE, 1910, стр. 403.

$$F_2(t) = \frac{1}{H(p)} F_1(t), \quad (16)$$

где $\frac{1}{H(p)}$ — некоторый оператор, представляющий собой функцию постоянных цепи и оператора p .

Введя величину

$$h(t) = \frac{1}{H(p)} 1, \quad (17)$$

мы можем для определения $F_2(t)$ по заданной $F_1(t)$ применить все те формулы, которые приведены выше для определения $i(t)$ по заданной э. д. с. $e(t)$, подставив в них $F_1(t)$ вместо $e(t)$, $h(t)$ вместо $A(t)$ и $F_2(t)$ вместо $i(t)$. Величину $h(t)$, как величину аналогичную $A(t)$, можно назвать обобщенной устанавливающейся проводимостью или условной устанавливающейся проводимостью, хотя по своему физическому смыслу величина $h(t)$ (так же как и оператор $\frac{1}{H(p)}$) в общем случае может и не быть проводимостью.

Формулы с применением условной устанавливающейся проводимости $h(t)$ и оператора $\frac{1}{H(p)}$ явились бы более общими. Однако мы будем продолжать и впредь применять в рассуждении, главным образом, величину действительной устанавливающейся проводимости $A(t)$ и оператор $\frac{1}{Z(p)}$, так как в большинстве случаев функцией $F_2(t)$ является ток $i(t)$, устанавливающийся в цепи под влиянием приложенной э. д. с. $e(t)$.

В заключение отметим следующее:

Функция $A(t)$, входящая в состав приведенных выше формул, не известна и подлежит определению тем или другим путем на основании заданного операционного выражения $\frac{1}{Z(p)}$. Однако если известно выражение оператора $\frac{1}{Z(p)}$, то можно сразу написать два значения $A(t)$: одно для момента $t = \infty$ и второе для момента $t = 0$.

При $t = \infty$ (установившийся режим) ток в цепи, находящейся под действием постоянной единичной э. д. с., не изменяется во времени, следовательно, производная от тока по времени равна нулю и дифференциальный оператор p также равен нулю. Поэтому, подставляя $p = 0$ в выражение оператора $\frac{1}{Z(p)}$, мы получаем величину $A(t)$ в момент $t = \infty$:

$$A(\infty) = \frac{1}{Z(0)} \quad (18)$$

(знак единичной функции при $\frac{1}{Z(0)}$ опускаем, так как $\frac{1}{Z(0)}$ представляет собой уже не символическое операционное выражение, а вполне определенную величину). В качестве примера возьмем оператор $\frac{1}{Z(p)} = \frac{1}{R + Lp}$. В этом случае при $t = \infty$ имеем

$A(\infty) = \frac{1}{R + L \cdot 0} = \frac{1}{R}$, что и представляет собой проводимость рассматриваемой цепи при установившемся режиме постоянного тока.

Что касается начального момента $t = 0$, то ток в цепи, находящейся под действием э. д. с., изменяющейся по закону единичной функции, в этот момент (т. е. в момент приложения постоянной единичной э. д. с.), вообще говоря, имеет тенденцию мгновенно достигнуть некоторой величины. Поэтому производная от тока по времени в тот момент равна бесконечности и дифференциальный оператор p также равен бесконечности. В результате соответствующее выражение для начального значения $A(t)$, т. е. для значения $A(0)$, получается подстановкой $p = \infty$ в выражение оператора $\frac{1}{Z(p)}$:

$$A(0) = \frac{1}{Z(\infty)}. \quad (19)$$

В том, что это так, можно убедиться из простейших примеров. В случае цепи, состоящей из последовательного соединения R и C , начальное значение тока при включении цепи на постоянную э. д. с. E равно $\frac{E}{R}$, т. е. проводимость $A(0)$ цепи в момент $t = 0$ равна $\frac{1}{R}$. С другой стороны, подставляя $p = \infty$ в соответствующий оператор, приходим к тому же значению $A(0)$:

$$A(0) = \frac{1}{R + \frac{1}{C \cdot \infty}} = \frac{1}{R}$$

В случае цепи, состоящей из последовательного соединения R и L , катушка самоиндукции при внезапном включении постоянной э. д. с. в момент $t = 0$ оказывает бесконечно большое сопротивление прохождению тока. Поэтому начальное значение тока в такой цепи равно нулю и, следовательно, значение $A(0)$ также равно нулю. Подставляя $p = \infty$ в соответствующий оператор, мы получаем то же значение $A(0)$

$$A(0) = \frac{1}{R + L \cdot \infty} = 0.$$

В справедливости выражения (19) мы убедимся также впоследствии (см. § 4 а, разложение операторов в ряды).

§ 3. Бесконечный интеграл Карсона

Из изложенного выше ясно, что решение вопроса об определении тока i , вызванного внезапно приложенной к цепи постоянной или переменной э. д. с., сводится к нахождению функции времени $A(t)$, отвечающей данному оператору $\frac{1}{Z(p)}$, или, как говорят, к раскрытию оператора $\frac{1}{Z(p)}$.

В обычной математической форме зависимость между $A(t)$ и соответствующим оператором $\frac{1}{Z(p)}$ была дана Карсоном⁵⁾.

Для вывода указанной зависимости Карсон воспользовался тем обстоятельством, что в частном случае внезапного приложения э. д. с., изменяющейся по экспоненциальному закону $e(t) = e_n(\alpha + j\beta)t$, где действительной величине α мы придаем положительное значение, выражение для тока может быть написано и без применения устанавливающейся проводимости $A(t)$. Именно в этом частном случае выражение для $i(t)$ может быть написано в виде⁶⁾

$$i(t) = \frac{e_n(\alpha + j\beta)pt}{Z(\alpha + j\beta)} + y(t). \quad (20)$$

Первый член правой части приведенного равенства представляет собой ток установившегося режима, причем выражение $Z(\alpha + j\beta)$ получается из операционного выражения импеданса $Z(p)$ данной цепи подстановкой $\alpha + j\beta$ вместо p . Второй член $y(t)$ представляет собой разность между устанавливающимся током и установившимся током; при $t = \infty$ этот член превращается в нуль.

Заменяя для упрощения $\alpha + j\beta$ буквой p (причем p пока не рассматриваем как оператор), имеем

$$i(t) = \frac{e_n p t}{Z(p)} + y(t). \quad (20a)$$

С другой стороны, выражение для $i(t)$ на основании формулы (13d) в рассматриваемом случае, т. е. в случае приложения э. д. с. $e(t) = e_n(\alpha + j\beta)t = e_n p t$, может быть написано в виде

$$i(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t e_n p(t-\tau) A(\tau) d\tau = \frac{d}{dt} e_n p t \int_0^t A(\tau) e_n p - \tau d\tau,$$

что после преобразования дает

$$i(t) = p e_n p t \int_0^\infty A(\tau) e_n - p \tau d\tau - p e_n p t \int_0^t A(\tau) e_n - p \tau d\tau + A(t). \quad (21)$$

Приравнявая выражения (20a) и (21) друг другу и деля обе части на $e_n p t$, мы приходим к следующему уравнению:

$$\frac{1}{Z(p)} + y(t) e_n - p t = p \int_0^\infty A \tau e_n - \tau d\tau - p \int_0^t A \tau e_n - p \tau d\tau + A(t) e_n - p t. \quad (22)$$

Полученное уравнение справедливо для всех значений t , в том числе и для $t = \infty$. Поэтому, полагая $t = \infty$ и принимая во внимание, что действительная часть комплекса p положительна, приходим в конечном результате к следующему интегральному уравнению, свя-

⁵⁾ См. курс J. R. Carson, Electric Circuit Theory and the Operational Calculus. Приводимая ниже зависимость (23) была известна также и Хевисайду, но он пришел к ней не строгим математическим путем и не придавал ей того фундаментального значения, которое ей придает Карсон, применяющий зависимость (23) для доказательства правильности предложенных Хевисайдом приемов раскрытия операторов (см. ниже § 4).

⁶⁾ См. J. R. Carson, Physical Review, Sept. 1917, p. 217.

зываются выражения $A(t)$ и $\frac{1}{Z(p)}$:

$$\frac{1}{pZ(p)} = \int_0^{\infty} A(t) e_n^{-pt} dt. \quad (23)$$

Таким образом, заменяя в выражении оператора $\frac{1}{Z(p)}$ символ p комплексом p с положительной действительной частью, мы можем по уравнению (23) найти $A(t)$. Обратное, зная $A(t)$, по уравнению (23) можно найти выражение $\frac{1}{Z(p)}$, которое после мысленной замены в нем комплекса p символом p и будет оператором $\frac{1}{Z(p)}$, отвечающим функции $A(t)$.

В более общей форме интегральное уравнение (23) может быть написано в виде

$$\frac{1}{pH(p)} = \int_0^{\infty} h(t) e_n^{-pt} dt, \quad (23a)$$

где $\frac{1}{H(p)}$ — выражение некоторого оператора, а $h(t)$ — соответствующая условная устанавливающаяся проводимость.

В качестве примера пользования интегральным уравнением Карсона найдем выражение $\frac{1}{H(p)}$, отвечающее функции $h(t) = \sin \omega t$. Подставляя в уравнение (23a) $h(t) = \sin \omega t$, получаем

$$\frac{1}{pH(p)} = \int_0^{\infty} \sin \omega t e_n^{-pt} dt = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}.$$

откуда искомое выражение

$$\frac{1}{H(p)} = \frac{p \omega}{p^2 + \omega^2}.$$

Таким образом, следуя принятому в § 2 обозначению устанавливающейся проводимости $A(t)$ и условной устанавливающейся проводимости $h(t)$ через соответствующий оператор, воздействующий на единичную функцию, в рассматриваемом случае имеем

$$\sin \omega t = \frac{p \omega}{p^2 + \omega^2} 1. \quad (24)$$

Равным образом, пользуясь интегральным уравнением (23), можно найти, что

$$\cos \omega t = \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} 1. \quad (25)$$

Помимо изложенного метода бесконечного интеграла Карсона существуют и другие методы, устанавливающие связь между функцией $A(t)$ и оператором $\frac{1}{Z(p)}$ [или между функцией $h(t)$ и оператором $\frac{1}{H(p)}$] при помощи определенных интегралов, а именно: метод, основанный на применении интегралов Фурье, и метод, пользующийся интегралами по комплексному переменному ⁷⁾. На этих методах в настоящей статье останавливаться не будем.

§ 4. Основные приемы раскрытия операторов, данные Хевисайдом

Приведенное выше интегральное уравнение Карсона устанавливает строгую математическую связь между функцией времени $A(t)$ и выражением оператора $\frac{1}{Z(p)}$. Однако решение интегрального уравнения (23), т. е. определение неизвестной функции $A(t)$, находящейся под знаком интеграла, в большинстве случаев затруднительно^{**)}, и потому при раскрытии операторов пользуются, главным образом, приемами, введенными самим Хевисайдом. Приемы эти были даны Хевисайдом без строгого доказательства, но в настоящее время правильность большинства их может быть подтверждена различными путями, в частности, помощью интегрального уравнения Карсона.

Сущность различных приемов, применяемых Хевисайдом для раскрытия операторов, состоит в том, что посредством алгебраических преобразований данному оператору $\frac{1}{Z(p)}$ придается такой вид, что дальнейшее нахождение функции $A(t)$ не представляет затруднений. Различные виды таких преобразований операторов и составляют, строго говоря, то, что следует понимать под операционным ис-

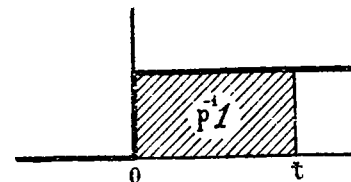


Рис. 6

числением Хевисайда. Существует целый ряд правил и теорем операционного исчисления, которые позволяют производить замену одних операторов другими. На некоторых из этих теорем мы остановимся впоследствии (см. § 5), а в настоящем параграфе рассмотрим два основных приема, применяемых Хевисайдом для раскрытия операторов: разложение операторов в ряды и так называемую теорему разложения Хевисайда. При этом строгого математического вывода указанных двух приемов раскрытия операторов из интегрального уравнения Карсона давать не будем, так как приводимые ниже выводы, хотя и не вполне строгие с точки зрения чистой математики, но достаточно понятны и приемлемы для электриков.

а) Разложение операторов в ряды

В качестве простейшего примера рассмотрим случай нахождения устанавливающейся проводимости $A(t)$ для цепи, состоящей из последовательного соединения R и L . Оператор $\frac{1}{Z(p)}$ для такой цепи имеет вид

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{1}{R + Lp}$$

или

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{\alpha}{R} \frac{1}{p + \alpha},$$

$$\text{где } \alpha = \frac{R}{L}.$$

Разлагая $\frac{1}{p + \alpha}$ по биному Ньютона, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z(p)} &= \frac{\alpha}{R} \left(p^{-1} - \alpha p^{-2} + \alpha^2 p^{-3} - \alpha^3 p^{-4} + \dots \right) \\ &= \frac{1}{R} \left(\alpha p^{-1} - \alpha^2 p^{-2} + \alpha^3 p^{-3} - \alpha^4 p^{-4} + \dots \right). \end{aligned}$$

Поскольку $A(t) = \frac{1}{Z(p)} 1$ нахождение $A(t)$, очевидно, сводится к нахождению результатов воздействия на единичную функцию различных степеней интегрального оператора p^{-1} .

Обращаясь к случаю воздействия на единичную функцию первой степени интегрального оператора, по смыслу определения интегрального оператора p^{-1} и единичной функции 1 имеем

$$p^{-1} 1 = \int_0^t 1 dt = t.$$

Графически величина $p^{-1} 1$ может быть представлена в виде площади, ограниченной кривой единичной функции, осью абсцисс и ординатой единичной функции в момент t (рис. 6).

В случае воздействия на единичную функцию второй степени интегрального оператора имеем

$$p^{-2} 1 = p^{-1} \int_0^t t dt = \frac{t^2}{2}.$$

В случае воздействия на единичную функцию второй степени интегрального оператора имеем

$$p^{-3} 1 = p^{-1} \frac{t^2}{2} = \int_0^t \frac{t^2}{2} dt = \frac{t^3}{2 \cdot 3}$$

и т. д.

Таким образом в случае воздействия на единичную функцию оператора p^{-n} мы можем написать, что

$$p^{-n} 1 = \frac{t^n}{n!}. \quad (26)$$

Пользуясь формулой (26), в рассматриваемом частном случае имеем $A(t) = \frac{1}{Z(p)} 1 = \frac{1}{R} \left(\alpha \frac{t}{1!} - \alpha^2 \frac{t^2}{2!} + \alpha^3 \frac{t^3}{3!} - \alpha^4 \frac{t^4}{4!} + \dots \right)$.

Нетрудно показать, что ряд, приведенный в правой части последнего равенства, дает в сумме выражение $1 - e_n^{-\alpha t}$. Таким образом окончательно имеем

$$A(t) = \frac{1}{R} \left(1 - e_n^{-\alpha t} \right). \quad (27)$$

⁷⁾ См., например, V. B u s h, Operational Circuit Analysis, pp. 148, 187.

^{**)} Гораздо легче обратное, именно: нахождение оператора $\frac{1}{Z(p)}$.

Так как

$$\frac{1}{R+Lp} = \frac{\alpha}{R} \frac{1}{p+\alpha}$$

(где $\alpha = \frac{R}{L}$), то из равенства (27) непосредственно следует, что вообще в случае некоторого оператора $\frac{1}{p+\alpha}$ соответствующая условная устанавливающаяся проводимость представляется выражением

$$\frac{1}{p+\alpha} I = \frac{1}{\alpha} (1 - e_n^{-\alpha t}), \quad (28)$$

а в случае оператора $\frac{p}{p+\alpha}$:

$$\frac{p}{p+\alpha} I = \frac{d}{dt} \frac{1}{p+\alpha} I = e_n^{-\alpha t}. \quad (29)$$

Из изложенного выше видно, что ряд, примененный для разложения заданного оператора, представляет собой ряд отрицательных степеней p . Разложение какого-либо оператора в ряд положительных степеней p , т. е. представление оператора $\frac{1}{Z(p)}$ в виде

$$\frac{1}{Z(p)} = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots,$$

как легко показать, не может привести к раскрытию оператора $\frac{1}{Z(p)}$,

т. е. к нахождению функции $A(t) = \frac{1}{Z(p)} I$. Действительно, в этом случае нахождение $A(t)$ свелось бы к нахождению результатов воздействия на единичную функцию различных степеней дифференциального оператора p . В простейшем случае, именно в случае первой степени оператора p , по смыслу определения дифференциального оператора имеем

$$p I = \frac{d}{dt} I.$$

Из характера изменения единичной функции во времени (рис. 4) следует, что величина pI равна нулю в любой момент $t \geq 0$ и равна бесконечности в момент $t=0$.

Отсюда вытекает, что выражение pI не имеет физического смысла. То же заключение имеет место в отношении выражения $p^n I$.

Таким образом, резюмируя изложенное, можно высказать следующее общее правило для раскрытия операторов по способу разложения в ряды. Необходимо разложить оператор в ряд отрицательных степеней p :

$$\frac{1}{Z(p)} = a_0 + a_1 p^{-1} + a_2 p^{-2} + a_3 p^{-3} + \dots, \quad (30)$$

а затем, умножив каждый член ряда на единичную функцию и применив формулу (26), перейти к ряду

$$A(t) = \frac{1}{Z(p)} I = a_0 + a_1 \frac{t}{1!} + a_2 \frac{t^2}{2!} + a_3 \frac{t^3}{3!} \dots \quad (31)$$

(при этом $a_0 I = a_0$).

Последний ряд во всех физических задачах является обычно рядом сходящимся. Поэтому, пользуясь им, можно построить кривую $A(t)$ в функции от t .

Член a_0 представляет собой, очевидно, значение $A(t)$ в момент $t=0$, т. е.

$$A(0) = a_0.$$

С другой стороны, в предыдущем изложении [см. формулу (19)] отмечалось, что

$$A(0) = \frac{1}{Z(\infty)}.$$

В том, что последнее равенство справедливо, легко убедиться на основании ряда (30), в котором величина $a_0 = A(0)$ является первым членом ряда. Представляя $\frac{1}{Z(p)}$ как $f\left(\frac{1}{p}\right)$, мы на основании стро-

ки Маклорена имеем, что a_0 может быть получено из $f\left(\frac{1}{p}\right)$, подстановкой $\frac{1}{p} = 0$ или, следовательно, из $\frac{1}{Z(p)}$ подстановкой $p = \infty$.

Недостатком описанного способа раскрытия операторов является то, что не всегда можно найти функцию времени, представляющую сумму ряда (31); в последнем же случае ряд (31) практически удобен для нахождения $A(t)$ только при небольших значениях t , так как в таком случае для вычисления $A(t)$ можно ограничиться небольшим числом членов ряда (31). При больших же значениях t даже при малой точности вычисления $A(t)$ для нахождения $A(t)$ может потребоваться чрезвычайно большая затрата времени, так как придется иметь дело с большим числом членов ряда (31).

б) Теорема разложения Хевисайда

Второй весьма важной формой раскрытия операторов, введенной Хевисайдом, является его так называемая „теорема разложения“.

Теорема разложения Хевисайда применима к операторам, представляющим собой рациональную правильную алгебраическую дробь, т. е. дробь вида

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (32)$$

где наивысшая степень p в числителе меньше наивысшей степени p в знаменателе (при этом под обозначениями Y и X следует понимать не полную проводимость и реактанц, а просто некоторые функции постоянных цепи и оператора p). В случае если оператор представляет собой неправильную алгебраическую дробь, то известными алгебраическими приемами из него можно выделить целую часть и прилагать теорему Хевисайда только к дробному остатку; что же касается целой части заданного оператора, то раскрытие ее можно выполнить каким-либо другим приемом раскрытия операторов. При этом в случае, если наибольшие степени p в числителе и знаменателе равны, целая часть оператора равна единице, и в этом случае, как отмечено в изложении ниже, полное выражение для $A(t)$ получается такое же, как и в результате приложения теоремы

разложения непосредственно к оператору $\frac{1}{Z(p)}$. В большинстве

случаев, если $Z(p)$ представляет собой импеданс цепи, выражение $\frac{Y(p)}{X(p)}$ есть правильная алгебраическая дробь (или, по крайней мере, наибольшие степени p в числителе и знаменателе равны), и поэтому

обычно теорема разложения Хевисайда может быть применена к оператору $\frac{1}{Z(p)}$ непосредственно.

Докажем теорему разложения Хевисайда, следуя второму приему доказательства Хевисайда⁸⁾.

В предположении, что заданный оператор $\frac{1}{Z(p)} = \frac{Y(p)}{X(p)}$ представ-

ляет собой правильную алгебраическую дробь, мы можем на основании известной теоремы высшей алгебры⁹⁾ написать выражение $\frac{Y(p)}{X(p)}$ в виде суммы простейших дробей

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{X'(p_k)} \frac{1}{p-p_k}, \quad (33)$$

где p_k ($k=1, 2, \dots$) являются корнями уравнения $X(p)=0$ и где постоянные коэффициенты $\frac{Y(p_k)}{X'(p_k)}$ при членах $\frac{1}{p-p_k}$ получаются пу-

тем подстановки p_k вместо p в выражение $\frac{Y(p)}{X'(p)}$ [где $X'(p)$ есть первая производная от $X(p)$ по p]. При этом формула (33) справедлива при условии, что среди корней p_k нет равных корней и ни один из них не равен нулю.

Из рассмотрения суммы (33) видно, что каждый член суммы состоит из постоянного коэффициента $\frac{Y(p_k)}{X'(p_k)}$ и оператора $\frac{1}{p-p_k}$. Поэтому, поскольку

$$A(t) = \frac{1}{Z(p)} I = \frac{Y(p)}{X(p)} I,$$

то нахождение $A(t)$ сводится к нахождению результатов воздействия на единичную функцию операторов вида $\frac{1}{p-p_k}$. Из предыдущего согласно формуле (28), подставляя в нее $\alpha = -p_k$, имеем

$$\frac{1}{p-p_k} I = \frac{e_n^{p_k t} - 1}{p_k}.$$

⁸⁾ Обычно принято считать, что Хевисайд не дал никакого доказательства своей „теоремы разложения“; однако на самом деле в работах Хевисайда имеются следы двух приемов доказательства указанной теоремы. См. примечание F. F. Smith к статье M. S. Vallart. Heaviside's Proof of His Expansion Theorem. Transactions of the AIEE, 1926, p. 433.

⁹⁾ См. например, П о с с е, Курс дифференциального и интегрального исчисления.

В результате приходим к следующему выражению для $A(t)$:

$$\begin{aligned} A(t) &= \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{X'(p_k)} \frac{1}{p-p_k} I \\ &= \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{X'(p_k)} \frac{e_n^{p_k t} - 1}{p_k} \\ &= \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} e_n^{p_k t} - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Выражению (34) можно придать более простую форму. Именно, подставляя в левую и в правую части равенства (33) вместо p нуль, приходим к следующему равенству:

$$\frac{Y(0)}{X(0)} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{X'(p_k)} \frac{1}{-p_k} = - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)}.$$

Пользуясь последним равенством, получаем следующее окончательное выражение для $A(t)$:

$$A(t) = \frac{Y(p)}{X(p)} I = \frac{Y(0)}{X(0)} + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} e_n^{p_k t}. \quad (35)$$

Выражение (35) и представляет собой теорему разложения Хевисайда.

Выше в начале вывода было отмечено, что теорема разложения Хевисайда применима только к операторам, представляющим правильные алгебраические дроби в случае же операторов, представляющих собой неправильные алгебраические дроби, из выражения заданного оператора необходимо выделить целую часть и прилагать теорему разложения к дробному остатку.

В частном случае неправильной алгебраической дроби, когда наивысшие степени p в числителе и знаменателе равны, имеем

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = 1 + \frac{Y_1(p)}{X(p)},$$

Применив теорему разложения к дробному остатку $\frac{Y_1(p)}{X(p)}$, после соответствующих преобразований нетрудно показать, что результирующее полное выражение для $A(t)$:

$$A(t) = \frac{Y(p)}{X(p)} I = 1 + \frac{Y_1(p)}{X(p)} I$$

получается то же, как если бы приложить теорему разложения Хевисайда непосредственно к заданному оператору $\frac{Y(p)}{X(p)}$. Таким образом формула (35) применима также без всяких изменений и к случаю, когда наивысшие степени p в числителе и знаменателе заданного оператора одинаковы.

Член $\frac{Y(0)}{X(0)}$, входящий в состав выражения (35), имеет совершенно определенный физический смысл. Именно, как отмечалось в § 2 [см. формулу (18)], величина $\frac{1}{Z(0)} = \frac{Y(0)}{X(0)}$ представляет собой величину $A(t)$ в момент $t = \infty$, т. е. при установившемся режиме. Отсюда следует, что входящая в состав выражения (35) сумма

$\sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} e_n^{p_k t}$ при $t = \infty$ должна обращаться в нуль. Так

как при постоянных коэффициентах $\frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)}$ это возможно только

при условии, что члены $e_n^{p_k t}$ при $t = \infty$ обращаются в нуль, то приходим к заключению, что корни p_k в уравнении $X(p) = 0$ должны быть отрицательными или комплексными с отрицательной частью, что и имеет место в действительности у всех операторов $\frac{Y(p)}{X(p)}$, относящихся к обычным цепям с положительным омическим сопротивлением.

В частном случае, когда два из корней уравнения $X(p) = 0$, например, последние по порядку корни p_{n-1} и p_n представляют собой сопряженные комплексные величины: $p_{n-1} = -\alpha + j\beta$ и $p_n = -\alpha - j\beta$, части суммы в выражении (35) можно придать более простой вид. Именно можно показать, что если корни p_{n-1} и p_n представляют собой сопряженные комплексные коэффициенты

$\frac{Y(p_{n-1})}{p_{n-1} X'(p_{n-1})}$ и $\frac{Y(p_n)}{p_n X'(p_n)}$ также представляют собой

ные комплексы. Так, например, если подстановка $p_{n-1} = -\alpha + j\beta$ дает

$$\frac{Y(p_{n-1})}{p_{n-1} X'(p_{n-1})} = a \pm j b = A e_n^{\pm j \delta},$$

то

$$\frac{Y(p_n)}{p_n X'(p_n)} = a \mp j b = A e_n^{\pm j \delta},$$

где $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ и $\delta = \arctan \frac{b}{a}$.

В результате после подстановки и преобразований для суммы двух рассматриваемых членов получаем выражение

$$\begin{aligned} \sum_{k=n-1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} e_n^{p_k t} &= e_n^{p_k t} = 2A e_n^{-\alpha t} \cos(\beta t \pm \delta) \\ &= 2A e_n^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta), \end{aligned}$$

где $\theta = \frac{\pi}{2} \pm \delta$. Формула же (35) для $A(t)$ принимает вид

$$A(t) = \frac{Y(0)}{X(0)} + \sum_{k=1}^{k=n-2} \frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} e_n^{p_k t} + 2A e_n^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta). \quad (36)$$

Как отмечалось в начале вывода, теорема разложения Хевисайда применима при условии, что ни один из корней уравнения $X(p) = 0$ не равен нулю и что все корни различны. В случае если один или несколько корней уравнения $X(p) = 0$ равны нулю, то по правилам действий над многочленами выражение $X(p)$ можно представить в виде

$$X(p) = p^m X_1(p),$$

где m показывает число корней, равных нулю, а $X_1(p)$ — многочлен, который на m степеней ниже, чем $X(p)$, и не содержит ни одного корня, равного нулю.

Оператор $\frac{Y(p)}{X(p)}$ в этом случае примет вид

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = p^{-m} \frac{Y(p)}{X_1(p)}.$$

Прилагая теорему разложения к оператору $\frac{Y(p)}{X_1(p)}$ (если только степень $Y(p)$ не выше степени $X_1(p)$), для искомого $A(t)$ получаем выражение

$$A(t) = p^{-m} \left[\frac{Y(0)}{X(0)} + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Y(p_k)}{p_k X_1'(p_k)} e_n^{p_k t} \right]. \quad (37)$$

Окончательное выражение $A(t)$ можно найти, если принять во внимание, что оператор p^{-m} обозначает m -кратное интегрирование.

В случае, когда несколько корней уравнения $X(p) = 0$ равны друг другу, величина $A(t)$ может быть найдена по формуле Вагнера¹⁰⁾. Однако ввиду сложности формулы Вагнера ею пользуются редко и обычно в случае равных корней выражение $A(t)$ стараются найти каким-либо другим путем. При этом иногда можно воспользоваться косвенно и теоремой разложения Хевисайда. Так, например, в случае двух равных корней сначала принимаю постоянные заданной цепи такими, что корни уравнения $X(p) = 0$ получаются отличающимися друг от друга, и, пользуясь теоремой разложения, находят $A(t)$, а затем, полагая разницу между корнями сколь угодно малой, в пределе получают выражение для $A(t)$ для случая равных корней.

Сравнивая теорему разложения Хевисайда с раскрытием операторов по способу разложения операторов в ряды, можно отметить следующие преимущества теоремы разложения.

1. Нахождение коэффициентов $\frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)}$ в теореме разложения в общем случае проще, чем коэффициентов a_1, a_2, a_3, \dots при разложении операторов в ряды.

2. Число членов в теореме разложения Хевисайда (предполагая, что речь идет о цепях с сосредоточенными постоянными) всегда, конечно, так, что, пользуясь теоремой Хевисайда, теоретически всегда представляется возможным найти точное выражение для $A(t)$, тогда как при разложении операторов в ряды в случае, если неизвестна сумма ряда (31), мы получаем решение для $A(t)$ в виде бесконечно большого числа членов.

3. В каждом частном случае (при условии, что число членов в теореме Хевисайда не слишком велико) теорема Хевисайда без дальнейших преобразований по одному своему виду дает представление о характере функции $A(t)$ и о влиянии величины параметров R, L и C на величину $A(t)$ — преимущество, которым не обладает способ разложения операторов в ряды, если только не получено окончательного выражения суммы ряда (31). Сверх того, что весьма важно, каждый из членов теоремы разложения (в приложении к цепям с сосредоточенными постоянными) имеет вполне определенный физический смысл. О члене $\frac{Y(0)}{X(0)}$ уже указывалось, что он

представляет собой значение $A(t)$, отвечающее установившемуся режиму данной цепи под действием постоянной д. э. с., что касается экспоненциальных членов теоремы разложения, то можно показать, что каждый из этих членов отвечает одному из собственных или свободных колебаний, которые могут иметь место в данной цепи.

К сожалению, практическая ценность всех указанных достоинств теоремы разложения Хевисайда значительно уменьшается тем обстоятельством, что решение уравнения $X(p) = 0$ уже при степенях p выше второй затруднительно; а если не найдены корни уравнения $X(p) = 0$, то и нельзя применить теорему разложения Хевисайда.

Пример на теорему разложения Хевисайда. Дана цепь, представленная на рис. 7. Требуется найти кривую изменения во времени тока i при замыкании рубильника K .

Импеданс рассматриваемой цепи представляется следующим общим выражением:

$$Z = Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

При установившемся режиме переменного тока

$$Z(j\omega) = R_3 + j\omega L_3 + \frac{(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1})(R_2 + j\omega L_2)}{R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2) + \frac{1}{j\omega C_1}}.$$

Подставляя p вместо $j\omega$, имеем

$$Z(p) = R_3 + pL_3 + \frac{(R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1})(R_2 + pL_2)}{R_1 + R_2 + p(L_1 + L_2) + \frac{1}{pC_1}}.$$

Переходя ввиду громоздкости коэффициентов, которые получились бы при p , сразу к численным значениям R, L и C , после преобразований и вычислений получаем

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{9,09p^3 + 145,5p + 181\,818,2}{p^3 + 132,73p^2 + 38\,218p + 2\,727\,300}.$$

Раскроем этот оператор, пользуясь теоремой разложения Хевисайда. Три корня уравнения третьей степени $X(p) = 0$ (найденные методом приближения) следующие:

$$\begin{aligned} p_1 &= -80,2; \\ p_2 &= -26,3 + j182,5; \\ &= -\alpha + j\beta; \\ p_3 &= -26,3 - j182,5; \\ &= -\alpha - j\beta. \end{aligned}$$

Так как два из корней представляют сопряженные комплексные величины, то для нахождения $A(t)$ применим формулу (36), которая в данном случае примет вид:

$$A(t) = \frac{Y(0)}{X(0)} + \frac{Y(p)}{p_1 X'(p_1)} e_n^{p_1 t} + 2Ae_n^{-\alpha t} \sin(\beta t + \theta).$$

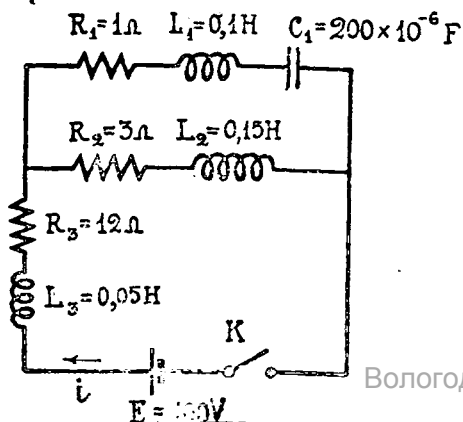


Рис. 7. Вологодская областная универсальная научная библиотека. Удмуртский государственный университет. www.booksite.ru

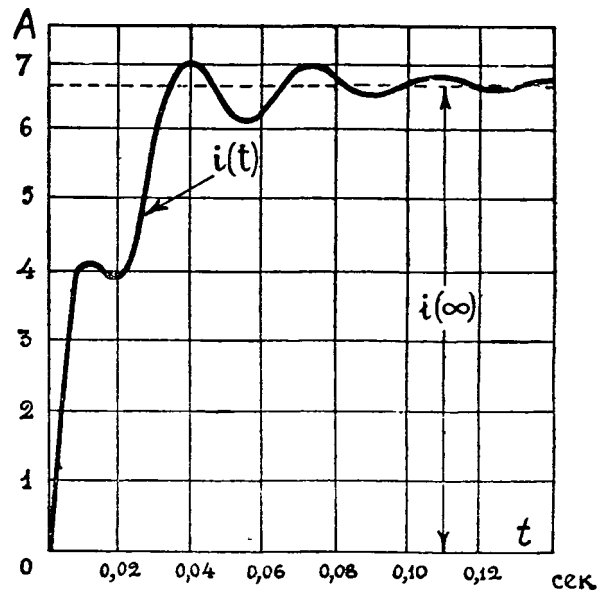


Рис. 8

Величина $\frac{Y(0)}{X(0)}$, представляющая собой величину $A(t)$ при установившемся режиме, равна

$$\frac{Y(0)}{X(0)} = \frac{181\,818,2}{2\,727\,300} = 0,0667.$$

Общий вид коэффициентов $\frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)}$ при членах $e_n^{p_k t}$ в основной формуле (35) теоремы разложения в рассматриваемом примере следующий:

$$\frac{Y(p_k)}{p_k X'(p_k)} = \frac{9,09p_k^2 + 145,5p_k + 181\,818,2}{p_k(3p_k^2 + 266,46p_k + 38\,218)}$$

Для случая $p_k = p_1 = -80,2$ имеем

$$\frac{Y(p_1)}{p_1 X'(p_1)} = -0,0787.$$

Для $p_k = p_2 = -26,3 + j182,5$:

$$\frac{Y(p_2)}{p_2 X'(p_2)} = a - jb = 0,006 - j0,0085.$$

Для $p_k = p_3 = -26,3 - j182,5$:

$$\frac{Y(p_3)}{p_3 X'(p_3)} = a + jb = 0,006 + j0,0085.$$

Так как для раскрытия оператора пользуемся формулой (35), то находим величины A и θ :

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} = 0,0104.$$

$$\theta = \arctg \frac{b}{a} = 0,953 \text{ радиан},$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta = 0,617 \text{ радиан}.$$

Перед θ — знак минус, так как знаки перед j в комплексном корне p_2 и в соответствующем комплексном коэффициенте $a - jb$ (равным образом как в корне p_3 и в соответствующем коэффициенте $a + jb$) разные.

Таким образом все величины, необходимые для определения $A(t)$, известны, подставляя эти величины в приведенную выше формулу для $A(t)$, получаем

$$A(t) = 0,0667 - 0,0787 e_n^{-80,2t} + 0,0208 e_n^{-26,3t} \sin(182,5t + 0,617).$$

Так как к цепи внезапно приложена постоянная э. д. с. $E = 100$ В,

$$i(t) = A(t) \cdot E = 6,67 - 7,87 e_n^{-80,2t} + 2,08 e_n^{-26,3t} \sin(182,5t + 0,617).$$

1) См. с тем же примером, решенным другим способом у Л. Г. Уолдриффа, Principles of Electric Power Transmission and Distribution, 1925, p. 228.

Кривая изменения тока во времени показана на рис. 8. При $t = \infty$, т. е. при установившемся режиме, имеем

$$i(\infty) = 6,67.$$

Последняя величина представляет собой не что иное, как

$$\begin{aligned} i(\infty) &= A(\infty) E, \\ &= \frac{Y(0)}{X(0)} E, \\ &= 0,0667 \cdot 100. \end{aligned}$$

Что касается тока $i(t)$ в первоначальный момент, т. е. при $t = 0$, то он может быть найден по формуле

$$\begin{aligned} i(0) &= A(0)E, \\ &= \frac{Y(\infty)}{X(\infty)} E. \end{aligned}$$

Сократив оператор $\frac{Y(p)}{X(p)}$ на p^2 и подставляя $p = \infty$, получаем

$$\frac{Y(\infty)}{X(\infty)} = 0.$$

Таким образом для первоначального значения ток $i(t)$ имеем

$$i(0) = 0.$$

Непосредственная подстановка $t = 0$ в полученное ранее общее выражение $i(t)$ не дает точного значения для $i(0)$; именно в этом случае для $i(0)$ получается хотя и весьма небольшое значение, но все же отличающееся от нуля. Расхождение объясняется неточностью численных значений коэффициентов в общем выражении для $i(t)$.

§ 5. Вспомогательные теоремы для раскрытия операторов

Весьма часто заданный оператор $\frac{1}{Z(p)}$ имеет такой вид, что непосредственно раскрыть его затруднительно; в частности, в случае применения для раскрытия операторов теоремы разложения Хевисайда могут встретиться большие трудности при решении уравнений $X(p) = 0$ высоких степеней. В таких случаях часто бывает весьма полезно предварительно путем преобразований привести оператор к более простому виду. Для выполнения подобных преобразований в операционном исчислении существует ряд теорем. Остановимся на некоторых из них.

а) Теорема Бореля. Применяющаяся в операционном исчислении теорема Бореля основана на следующем общем предложении Бореля, которое приводим без доказательства¹²⁾.

Если функции $f(t)$, $f_1(t)$ и $f_2(t)$ определяются интегральными уравнениями:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e_n^{-pt} dt, \quad (38)$$

$$F_1(p) = \int_0^{\infty} f_1(t) e_n^{-pt} dt, \quad (39)$$

$$F_2(p) = \int_0^{\infty} f_2(t) e_n^{-pt} dt, \quad (40)$$

причем функции $F(p)$, $F_1(p)$ и $F_2(p)$ удовлетворяют соотношению:

$$F(p) = F_1(p) \cdot F_2(p), \quad (41)$$

то

$$f(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau. \quad (42)$$

Пользуясь в качестве зависимостей (38), (39) и (40) интегральными уравнениями Карсона

$$\frac{1}{pZ(p)} = \int_0^{\infty} A(t) e_n^{-pt} dt,$$

$$\frac{1}{pZ_1(p)} = \int_0^{\infty} A_1(t) e_n^{-pt} dt,$$

$$\frac{1}{pZ_2(p)} = \int_0^{\infty} A_2(t) e_n^{-pt} dt,$$

при условии, что

$$\frac{1}{pZ(p)} = \frac{1}{pZ_1(p)} \cdot \frac{1}{pZ_2(p)},$$

или что

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{1}{p} \frac{1}{Z_1(p)} \frac{1}{Z_2(p)}, \quad (43)$$

на основании формулы (42) имеем

$$A(t) = \int_0^t A_1(\tau) A_2(t - \tau) d\tau. \quad (44)$$

Таким образом если заданный оператор $\frac{1}{Z(p)}$ разбивается на два оператора $\frac{1}{Z_1(p)}$ и $\frac{1}{Z_2(p)}$ по формуле (43), то величину $A(t)$ для оператора $\frac{1}{Z(p)}$ можно определить по формуле (44), найдя предварительно $A_1(t)$ для оператора $\frac{1}{Z_1(p)}$ и $A_2(t)$ для оператора $\frac{1}{Z_2(p)}$.

б) Теорема перестановки (shifting formula). Теорема перестановки представляет следующее положение

$$F(p) [f(t) e_n^{\gamma t}] = e_n^{\gamma t} F(p + \gamma) [f(t)], \quad (45)$$

где в квадратные скобки заключена функция времени, на которую воздействует оператор, и где оператор $F(p + \gamma)$ получается из оператора $F(p)$ заменой p на $p + \gamma$; при этом γ есть или положительное действительное число, или комплекс с положительной действительной частью; доказательства приводить не будем.

Подставляя в уравнение (45) $F(p) = \frac{1}{Z(p)}$ и $f(t) = 1$, получаем следующую частную формулу теоремы перестановки:

$$\frac{1}{Z(p)} [e_n^{\gamma t} \cdot 1] = e_n^{\gamma t} \frac{1}{Z(p + \gamma)} [1]$$

или, так как

$$e_n^{\gamma t} 1 = e_n^{\gamma t},$$

то

$$\frac{1}{Z(p)} [e_n^{\gamma t}] = e_n^{\gamma t} \frac{1}{Z(p + \gamma)} [1]. \quad (46)$$

В последнем уравнении в левой части оператор $\frac{1}{Z(p)}$ воздействует на переменную э. д. с. $e_n^{\gamma t}$, а в правой части оператор $\frac{1}{Z(p + \gamma)}$ воздействует на постоянную единичную э. д. с.

Пользуясь уравнением (46), нетрудно выразить устанавливающую проводимость $A(t)$, отвечающую оператору $\frac{1}{Z(p + \gamma)}$, через устанавливающуюся проводимость $A_1(t)$, отвечающую оператору $\frac{1}{Z(p)}$.

Заменим в левой части уравнения (46) переменный член $e_n^{\gamma t}$ через соответствующий оператор.

Из предыдущего согласно формуле (29) имеем

$$e_n^{\gamma t} = \frac{p}{p - \gamma} 1.$$

Подставляя это значение $e_n^{\gamma t}$ в левую часть уравнения (46) и опуская скобки, получаем

$$\frac{1}{Z(p)} \frac{p}{p - \gamma} 1 = e_n^{\gamma t} \frac{1}{Z(p + \gamma)} 1,$$

откуда

$$\frac{1}{Z(p + \gamma)} 1 = e_n^{-\gamma t} \frac{1}{Z(p)} \frac{p}{p - \gamma} 1.$$

Заменив $\frac{p}{p - \gamma}$ через $1 + \frac{\gamma}{p - \gamma}$, имеем

$$\frac{1}{Z(p + \gamma)} 1 = e_n^{-\gamma t} \frac{1}{Z(p)} 1 + \gamma e_n^{-\gamma t} \frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p - \gamma} 1,$$

или, принимая во внимание, что

$$\frac{1}{Z(p + \gamma)} 1 = A(t)$$

и

$$\frac{1}{Z(p)} 1 = A_1(t).$$

¹²⁾ См. E. Borel, Leçon sur les Séries Divergentes (1931), p. 104.

$$A(t) = e_n^{-\gamma t} A_1(t) + \gamma e_n^{-\gamma t} \frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p-\gamma} I. \quad (47)$$

Применим теорему Бореля к нераскрытому оператору в правой части; для этого перепишем его в виде

$$\frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p-\gamma} = \frac{1}{p} \frac{1}{Z(p)} \frac{p}{p-\gamma}.$$

Так как

$$\frac{1}{Z(p)} I = A_1(t)$$

и так как

$$\frac{p}{p-\gamma} I = e_n^{\gamma t},$$

то согласно формуле (44):

$$\frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p-\gamma} I = \int_0^t A_1(\tau) e_n^{\gamma(t-\tau)} d\tau$$

$$= e_n^{\gamma t} \int_0^t A_1(\tau) e_n^{-\gamma \tau} d\tau.$$

Подставляя последнее выражение в правую часть уравнения (47), получаем окончательное выражение для $A(t)$ через $A_1(t)$:

$$A(t) = e_n^{-\gamma t} A_1(t) + \gamma \int_0^t A_1(\tau) e_n^{-\gamma \tau} d\tau. \quad (48)$$

с) Теорема переноса или смещения (transfer formula). Теорема смещения заключается в следующем, что если имеем

$$\frac{1}{Z(p)} I = A(t),$$

то

$$e_n^{-pt} \frac{1}{Z(p)} I = A(t-m), \quad (49)$$

где $A(t-m)$ получается из $A(t)$ подстановкой $t-m$ вместо t . Таким образом смысл оператора e_n^{-mp} состоит в том, что под его действием начало отсчета времени смещается в сторону запаздывания на промежуток времени m .

Формулу (49) можно вывести, исходя из теоремы Бореля и интегрального уравнения Карсона¹²⁾.

10/XII 1933 г.

(продолжение в следующем номере)

К вопросу о построении диаграммы нагрузки привода с маховой массой

Инж. А. Г. Захарин

Москва, ВИАЭС

При выборе электрического двигателя для привода, снабженного значительной маховой массой, одной из основных задач является решение общего уравнения движения и построение диаграммы моментов двигателя по заданной диаграмме моментов рабочей машины.

Одним из частных случаев, имеющих, однако, значительный практический интерес, при этом является случай построения диаграммы нагрузки при заданной механической характеристике двигателя.

$$M_d = f(\omega)$$

и для момента рабочей машины, являющегося функцией времени,

$$M_s = \varphi(t).$$

Для двигателей с жесткой характеристикой задача определения зависимости

$$M_d = \psi(t)$$

в общем виде может быть решена лишь в простейшем случае неизменяемости момента рабочей машины $M_s = \text{const}$ согласно известного соотношения

$$M_d = M_s - e^{-\frac{t}{B}} (M_s - M_{d0}), \quad (1)$$

где B — постоянная, определяемая параметрами данного привода; M_{d0} — начальное значение момента двигателя, а также в случае линейной зависимости момента от времени:

$$M_s = bt + c,$$

где b и c — некоторые постоянные величины.

В случаях более сложной зависимости нагрузочного момента от времени задача либо значительно усложняется, либо совершенно не решается в общем виде. Поэтому для любой сложной или совершенно иррегулярной зависимости нагрузочного момента от времени — диаграмму моментов рабочей машины разбивают на известное число отрезков, для которых полагают приближенно $M_s = \text{const}$ или $M_s = bt + c$ и затем строят по точкам кривую $M_d = \psi(t)$.

Подобный метод построения, являясь довольно кропотливым, отнимает значительное количество времени; поэтому не лишена интереса возможность некоторого его упрощения путем простейших преобразований уравнения моментов.

Рассмотрим указанный выше случай линейной зависимости нагрузочного момента от времени:

$$M_s = bt + c; \quad (2)$$

для асинхронного двигателя с достаточной точностью можно положить

$$M_d = a(\omega_s - \omega), \quad (3)$$

где a — постоянная, определяемая параметрами мотора, ω_s — синхронная угловая скорость.

Общее уравнение движения

$$M_d - M_s = I \frac{d\omega}{dt} \quad (3a)$$

в данном случае примет вид

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{a}{I} \omega + \frac{b}{I} t - \frac{a\omega_s - c}{I} = 0.$$

Решая его относительно ω , имеем

$$\omega = e^{-\frac{at}{I}} \left[C - \frac{e^{\frac{at}{I}}}{a} \left(b \left(t - \frac{I}{a} \right) - a\omega_s + c \right) \right];$$

полагая, что при $t=0$ $\omega = \omega_0$, и, имея в виду, что в начале рассматриваемого интервала времени (рис. 1) момент двигателя

$$M_{d0} = a(\omega_s - \omega_0), \quad (4)$$

а момент нагрузки

$$M_{s0} = C, \quad (5)$$

откуда

$$C = M_{s0} = M_{d0} + a\omega_0, \quad (6)$$

¹²⁾ См. главу IV упомянутого ранее курса операционного исчисления Y. R. Carson'a; там же можно найти вывод формулы (48).

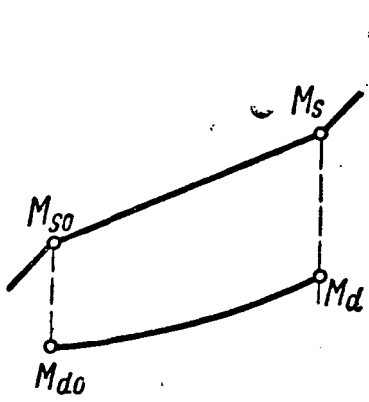


Рис. 1

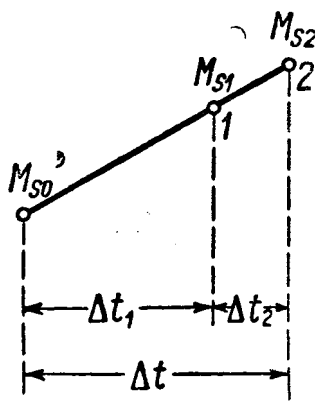


Рис. 2

имеем после преобразования и подстановки уравнение

$$M_s - M_d = e^{-\frac{at}{I}} (M_{s0} - M_{d0}) + \frac{1 - e^{-\frac{at}{I}}}{\frac{at}{I}} (M_s - M_{s0}) \quad (7)$$

[которое для случая $M = \text{const}$ легко приводится к виду (1)].

При однажды заданных значениях a и I данное уравнение справедливо на любом прямолинейном участке, причем отсчет времени следует вести от начала этого участка. Следовательно, если задаться постоянным интервалом времени $\Delta t = \text{const}$, то можно положить

$$\frac{a}{I} \Delta t = \text{const} = K, \quad (8)$$

и дальше

$$e^{-\frac{a}{I} t} = \text{const} = C_1, \quad (9)$$

$$\frac{1 - e^{-\frac{at}{I}}}{\frac{at}{I}} = \text{const} = C_2, \quad (10)$$

причем уравнение (7) примет вид

$$M_s - M_d = C_1 (M_{s0} - M_{d0}) + C_2 (M_s - M_{s0}). \quad (11)$$

Справедливость подобной подстановки при любом значении Δt очевидна из приведенного выше вывода и легко может быть показана. Действительно, на любом прямолинейном участке 0-2 (рис. 2) имеем

$$M_{s2} - M_{d2} = e^{-k} (M_{s0} - M_{d0}) + \frac{1 - e^{-k}}{k} \cdot (M_{s2} - M_{s0}). \quad (a)$$

Разбивая интервал времени Δt на две произвольных составляющих Δt_1 и Δt_2 , имеем для участка 0-1

$$M_{s1} - M_{d1} = e^{-k_1} (M_{s0} - M_{d0}) + \frac{1 - e^{-k_1}}{k_1} \cdot (M_{s1} - M_{s0}),$$

для участка 1-2

$$M_{s2} - M_{d2} = e^{-k_2} (M_{s1} - M_{d1}) + \frac{1 - e^{-k_2}}{k_2} \cdot (M_{s2} - M_{s1}),$$

где

$$k_1 = \frac{a}{I} \Delta t_1; \quad k_2 = \frac{a}{I} \Delta t_2;$$

подставляя в последнее равенство значение $M_{s1} - M_{d1}$ из предыдущего уравнения и имея в виду, что

$$\frac{M_{s1} - M_{s0}}{k_1} = \frac{M_{s2} - M_{s1}}{k_2} = \frac{M_{s2} - M_{s0}}{k}; \quad k_1 + k_2 = k;$$

получаем

$$\begin{aligned} M_{s2} - M_{d2} &= e^{-(k_1 + k_2)} (M_{s0} - M_{d0}) + \\ &+ e^{-k_2} \cdot \frac{1 - e^{-k_1}}{k_1} (M_{s1} - M_{s0}) + \frac{1 - e^{-k_2}}{k_2} (M_{s2} - M_{s1}) = \\ &= e^{-k} (M_{s0} - M_{d0}) + \frac{1 - e^{-k}}{k} \cdot (M_{s2} - M_{s0}); \end{aligned}$$

т. е. тот же результат, что и в первом случае.

Пользуясь уравнением (11), можно весьма просто построить диаграмму моментов двигателя как аналитическим, так и графическим методом. Определив для данного привода величины a и I , задаемся величиной Δt и, определив постоянные C_1 и C_2 из уравнений (9) и (10), в дальнейшем строим кривую по точкам согласно уравнению (11), имея в виду, что M_{d0} и M_{s0} представляют собой значения моментов в начале каждого участка, а M_d и M_s — в конце его.

Выбор величины Δt определяется исключительно желательной точностью при замене криволинейных участков диаграммы прямолинейными, а также удобством масштабов при графическом построении.

Величина a из уравнения (3) может быть определена из соотношения

$$M_n = 974 \frac{p}{n_n} = a (\omega_s - \omega_n),$$

откуда

$$a = 9,3 \frac{P \cdot 10^3}{(n_s - n_n) \cdot n_n}, \quad (12)$$

где p — номинальная мощность на валу двигателя в kW, ω_n , n_n и ω_s , n_s угловая скорость и скорость вращения при номинальной мощности и синхронные.

В качестве примера построим диаграмму моментов асинхронного двигателя мощностью 14,5 kW при 955 об/мин при заданной в моментах нагрузочной диаграмме простейшего вида, изображенной на рис. 3. Криволинейное очертание диаграммы заменяется по возможности близко проходящими прямыми линиями (изображены пунктиром). Момент инерции системы составляет

$$I = 30 \text{ kgm sec}^2;$$

постоянная двигателя равна

$$a = \frac{9,3 \cdot 14,5 \cdot 10^3}{(1000 - 955) \times 955} = 3,06.$$

Задаваясь интервалом времени $\Delta t = 5 \text{ sec.}$, имеем

$$k = \frac{3,06}{30} \cdot 5 \cong 0,51$$

и далее

$$C_1 = e^{-0,51} \cong 0,6;$$

$$C_2 = \frac{1 - e^{-0,51}}{0,51} \cong 0,8.$$

На основании данных табл. 1 можем построить по точкам кривую моментов двигателя. На рис. 4 эта же кривая построена графически, причем умножение разностей моментов на постоянные производится в координатной сетке при помощи двух наклонных лучей OC_1 , OC_2 , отложенных таким образом, что

$$\text{tg}(tOC_1) = 0,6 = C_1, \quad \text{tg}(tOC_2) = 0,8 = C_2.$$

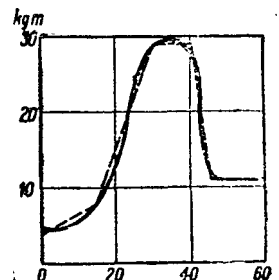


Рис. 3

Таблица 1

№ интервалов	t sec.	$M_{s0} - M_{d0}$	$C_1(M_{s0} - M_{d0})$	$M_s - M_{s0}$	$C_2(M_s - M_{s0})$	$M_s - M_d$	M_s	M_d
0	0	0	0	0	0	0	4,0	4,0
1	5	0	0	+ 1,33	+ 1,06	+ 1,06	5,33	4,27
2	10	+ 1,06	+ 0,64	+ 1,33	+ 1,06	+ 1,70	6,67	4,97
3	15	+ 1,70	+ 1,02	+ 1,33	+ 1,06	+ 2,08	8,0	5,92
4	20	+ 2,08	+ 1,25	+ 7,00	+ 5,6	+ 6,85	15,0	8,15
5	25	+ 6,85	+ 4,11	+ 7,00	+ 5,6	+ 9,71	22,0	12,29
6	30	+ 9,71	+ 5,83	+ 7,00	+ 5,6	+ 11,43	29,0	17,57
7	35	+ 11,43	+ 6,88	0	0	+ 6,88	29,0	22,12
8	40	+ 6,88	+ 3,7	0	0	+ 3,7	29,0	25,3
9	45	+ 3,7	+ 2,22	- 18,00	- 14,4	- 12,18	11,0	23,18
10	50	- 12,18	- 7,4	0	0	- 7,4	11,0	18,4
11	55	- 7,4	- 4,44	0	0	- 4,44	11,0	15,44
12	60	- 4,44	- 2,66	0	0	- 2,66	11,0	13,66

Например, для участка ab имеем

$$M_{s0} - M_{d0} = ac \quad \text{и} \quad M_{s1} - M_{s0} = bd.$$

Откладываем от точки b вниз отрезок $be = C_1(ac)$, а от полученной таким образом точки e — отрезок $ef = C_2(bd)$. Полученная таким образом точка f соответствует моменту двигателя в конце интервала времени.

Как видно из диаграммы, разность $M_s - M_d$ остается положительной вплоть до момента $t = 40$ sec; начиная от $t = 40$ и до $t = 60$ sec. разность $M_s - M_d$ отрицательна, так же как и разность $M_s - M_{s0}$ для участка $t = 40 \div 45$ sec. Поэтому соответствующие величины $C_1(M_{s0} - M_{d0})$ и $C_2(M_s - M_{s0})$ откладываются в противоположные стороны (например, отрезок lm).

Необходимо отметить еще следующее обстоятельство. Если в нагрузочной диаграмме рабочей машины оперировать не с моментами, а с мощностями, то для участка прямолинейного возрастания или убывания мощности будем иметь [по аналогии с уравнениями (2) и (3a)]:

$$M_d \omega - l \omega \frac{d\omega}{dt} = bt + c.$$

В общем виде подобное уравнение не решается, приближенное же решение¹⁾ приводит к соотношению (при тех же значениях индексов и коэффициентов, что и выше).

$$P_d = (P_{d0} - P_{s0}) C_1 + P_{s0} + bt(1 - C_2),$$

откуда, заменяя

$$b = \frac{P_0 - P_{s0}}{t},$$

получим

$$P_s - P_d = C_1(P_{s0} - P_{d0}) + C_2(P_s - P_{s0}), \quad (13)$$

т. е. получаем выражение, совершенно аналогичное выражению (11), откуда следует, что для приближенного решения приведенным выше методом можно пользоваться также и тогда, когда нагрузочный график задан не в виде диаграммы моментов, а в виде диаграммы мощностей.

¹⁾ См. Попов, Работа асинхронного двигателя группы Леснарда-Ильгнера, „Электричество“ № 22—24, 1930 г.

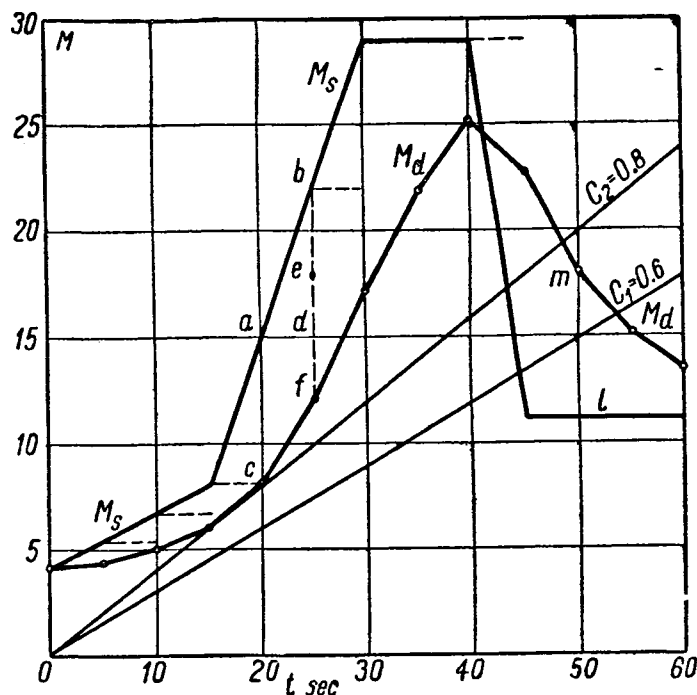


Рис. 4

Выражение для угловой скорости в этом случае, как известно, имеет вид

$$\omega = \frac{\omega_s}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{a\omega_s^2} \left[(P_{d0} - P_{s0} + \frac{bl}{a}) e^{-\frac{at}{T}} + P_{s0} - \frac{bl}{a} + bt \right]} \right) = \frac{\omega_s}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{a\omega_s^2} \cdot P_d} \right)$$

или

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega_s} = \frac{n}{n_s} = 0,5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4P_d}{a\omega_s^2}} \right). \quad (14)$$

Таким образом, зная из таблицы (аналогичной табл. 1) или из графического построения значения P_d на каждом участке, мы без труда определим значения ω и построим кривую вида

$$\omega = f_1(t).$$

Отметим также, что метод решения, подобный вышеизложенному, применим в общем случае к зависимости любых величин, соотношение которых определяется линейным уравнением, подобным написанному выше,

$$\frac{dx}{dt} + ax + bt + c = 0.$$

(например, к построению кривой нагрева электродвигателя при прямолинейном изменении нагрузки), причем решение дается в виде линейного алгебраического уравнения с постоянными „экспоненциальными“ коэффициентами.

ХРОНИКА

Вопросы выключающей аппаратуры на парижской конференции 1933 г.

На парижской конференции по высоким напряжениям в 1933 г. весьма полно была дана картина современного состояния вопросов высоковольтной коммутационной аппаратуры. Впервые после войны на этой конференции были представлены немецкие электротехники, и это, несомненно, значительно отразилось на полноте освещения этих вопросов. Хотя большинство представленных докладов не претендуют на оригинальность, но, подводя итоги последних работ в данной области, они тем самым позволяют получить довольно полную картину этого весьма сложного в настоящий момент участка электротехники.

Как известно, одним из наиболее важных факторов работы выключателя является скорость восстановления напряжения на клеммах выключателя при проходе тока в дуге через нуль. Анализ этого фактора и определению наиболее простых формул подсчета скорости восстановления напряжения посвящен доклад Жилларда (Швейцария).

В своем докладе Жиллард устанавливает следующие зависимости скорости подъема напряжения.

- a) она растет с ростом рабочего напряжения;
 - b) она растет с возрастанием $\sin \varphi$ цепи короткого замыкания;
 - c) она быстро уменьшается с увеличением несимметричности короткого замыкания (с ростом постоянной составляющей), так как при этом все больше сближаются точки прохождения тока и напряжения через нуль;
 - d) она растет с увеличением собственной частоты устанавливающихся колебаний контура, которая определяется постоянными этого контура;
 - e) она уменьшается с увеличением декремента затухания цепи.
- Большую роль в последнем случае играет активная нагрузка в сети, которая имеется в данный момент.

Автор указывает, что подсчет скорости восстанавливаемого напряжения может производиться с достаточной для практических целей точностью по следующим формулам:

для $\sin \varphi = 1$, т. е. когда напряжение сети при разрыве тока имеет максимальное значение

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{cp} = 4 \cdot \sqrt{2} E f_0$$

для однополюсного короткого замыкания и

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{cp} = 6 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E f_0$$

для трехполюсного короткого замыкания.

Эти формулы дают среднюю скорость, представляющую собой прямую, соединяющую начало координат ($I = 0$) с вершиной первой волны напряжения. Для получения максимальной скорости, выражаемой прямой, проведенной из начала координат, и касательной к кривой восстанавливающегося напряжения, необходимо эти значения помножить на коэффициент 1,14.

Из этих формул видно, что наряду с рабочим напряжением E большое значение имеет собственная частота контура f_0 , которая может быть в общем виде определена по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Трудность вопроса при практическом определении f_0 по этой формуле лежит в определении L и C для практических цепей. Сравнительно легко эти постоянные определяются для цепей с сосредоточенными постоянными. Автор приводит несколько примеров этих цепей, сравнивает результаты подсчетов с заснятыми осциллограммами. Что касается цепей с распределенными постоянными, то автор ограничивается указанием на трудности их решения и предлагает предварительно собрать достаточное количество статистического материала для получения в будущем более или менее точных формул подсчета.

Следующим докладом, посвященным частично также вопросам восстановления напряжения и его роли в работе выключателя, является доклад Брессона, шефа-электрика аппаратных заводов фирмы Делль (Франция). Автор указывает на положительную роль, которую играет активное сопротивление в цепи, увеличивающее $\cos \varphi$ и в пределе (при $L = 0$) дающее совпадение нулевых точек тока и напряжения, при котором

$$\frac{dU}{dt} = \omega E_0$$

Таблица 1¹⁾

Воздушные выключатели

Фирма	AEG	BBC	Delle	Westinghouse
Тип	Выключатель сжатого газа	Выключатель сжатого воздуха	Выключатель сжатого воздуха	Дейонный воздушный выключатель
Напряжение	До 220 kV	До 37 kV	5÷35 kV (проект до 75 kV)	5÷25 kV
Ток	—	1 000 А	500÷2 000 А	600÷1 200 А, 1 500 А
Разрывная мощность	До 500 MVA при 30 kV „ 1 500 MVA „ 100 kV „ 2 500 MVA „ 220 kV	До 500 MVA	До 500 MVA (проект 1 500 MVA)	20÷40 MVA
Максимальный ток включения	—	100 kA	60 kA	—
Продолжительность включения ²⁾	0,3 сек (для 10-kV типа)	0,15÷0,2 sec.	0,2 sec.	0,17÷0,37 sec 0,1÷0,21 sec. 0,5 sec. (спец. тип)
„ „ „ ³⁾	0,2 сек (для 10-kV типа)	0,1 sec.	0,13 sec.	
Принцип действия	Продольное дутье	—	Поперечное дутье с повышением сопротивления	Разделение дуги
Рабочее давление	7÷9 at при малых мощностях 12÷16 at при больших мощностях; 20 at для 220 kV	5÷7 at	2÷3 at	—
Потребление воздуха для включения, отнесенное к атмосферному давлению	60 l (для 10 kV)	{ Для одного цикла „включение — выключение“ до 120 l	4÷9 l	—
То же для выключения	150 l—для 10 kV ⁴⁾		Сжатый воздух	Сжатый воздух
Привод	Сжатый воздух	Сжатый воздух	Сжатый воздух	Сжатый воздух

1) Обе таблицы (1 и 2) заимствованы из журнала „Е и М“ № 48, 1933, стр. 633 и дополнены автором на основе позднейших данных

2) От дачи импульса до полного соприкосновения контактов

3) От дачи импульса до гашения дуги.

4) На полюсе

т. е. влияние высших гармонических исключается и восстановление напряжения идет сравнительно медленно, следуя синусоиде рабочей частоты. Автор приходит отсюда к выводу о целесообразности введения в цепь при разрыве омических сопротивлений. Затруднения, обычно при этом встречающиеся (введение громоздких сопротивлений в бак выключателя, добавочные скользящие контакты, увеличение хода траверсы и пр.), по мнению автора удачно избегаются в новом типе выключателя без масла с независимым дутьем воздуха, направленным поперек дуги. Этот напор воздуха сдувает дугу с главных контактов на искрогасительные (соединенные с добавочным сопротивлением). Разрез такого выключателя дан на рис. 1. Автор приводит осциллограммы и киноснимки в подтверждение своих выводов о быстром гашении дуги в таких выключателях. Эти выключатели фирма уже включила в свои каталоги и строит их до 500 MVA и 35 kV. Следует отметить при этом, что необходимые для работы выключателя давления газа очень невелики — порядка 2–3 ат, что является его значительным преимуществом по сравнению с газовыми выключателями AEG, где давление в баке должно быть в среднем порядка 12–16 ат. (см. табл. 1).

Что касается масляных выключателей, то Брессон разбивает их по принципу гашения дуги на две группы: на выключатели, гасящие дуги при помощи энергии, создаваемой электрической цепью, проходящей внутри выключателя, и на выключатели, в которых гашение дуги производится при помощи энергии, выделяемой самой дугой. В качестве оригинальной конструкции первого типа Брессон дает описание и некоторые результаты экспериментов по выключателю с перемещением дуги (interrupteur à translation d'ars).

В этом выключателе, рис. 2 имеющем один контактный разрыв, выключение производится следующим образом: подвижная контактная траверса, прикрепленная шарнирно к одному из вводных стержней, другим своим концом касается другого стержня и тем осуществляет контакт. При выключении этот конец отходит, совершая движение по дуге, пока не пройдет добавочного контакта в виде вилки. Тянувшаяся за этим подвижным контактом электрическая дуга с этого момента горит уже не между неподвижным и подвижным контактами, а между двумя неподвижными контактами, так как промежуточный контакт соединен через обмотку двух выдувающих электромагнитов со вторым вводным стержнем (а следовательно, и с подвижным контактом). Действием этих электромагнитов дуга начинает

двигаться вниз в зону холодного и неионизированного масла до тех пор, пока под влиянием быстрого охлаждения она не погаснет. Этот принцип гашения дуги напоминает гашение струей масла, осуществляемое в так называемых камерах масляного дутья, так как и тут и там быстрый эффект гашения достигается путем интенсивного охлаж-

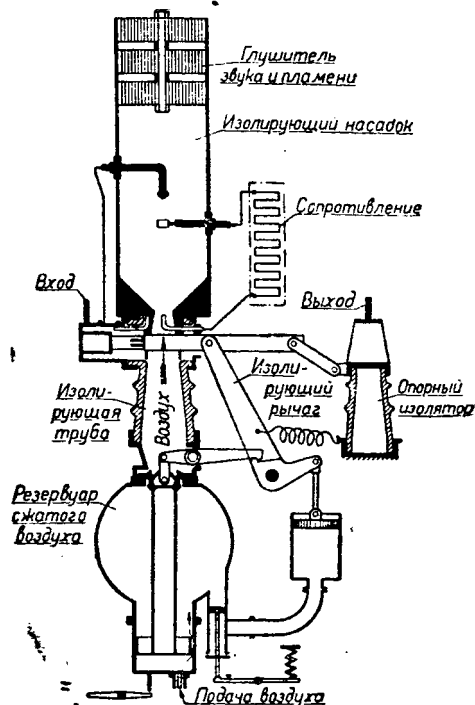


Рис. 1

Таблица 2

Жидкостные выключатели

Фирма	AEG	Alston	BBC	MFO	SSW
Тип	Водяной выключатель	Выключатель с малым объемом масла	Водяной выключатель	Водяной выключатель	Экспансионный выключатель
Напряжение	10,20 kV	15 kV	До 37 kV*	10,20 kV	Все напряжения
Ток	До 1 000 А 1)	—	До 2 500 А	200 ÷ 1000 А	До 2 000 А (частично с параллельным треншалтером)
Разрывная мощность	400 MVA	500 MVA	400 MVA	—	—
Максимальный ток включения	—	—	80 kV	—	—
Продолжительность включения	—	—	0,15 sec.	—	0,1 ÷ 0,2 sec. для 10 kV 0,36 sec. свыше 30 kV
Продолжительность выключения	—	—	0,1 sec.	Несколько периодов 2)	—
Род гасящей жидкости	Вода	Масло	Вода с добавлениями	Вода	Экспансионный свыше 30 kV—масло
Вид провода	Моторный Пружинный (Kraftspeicher) сжатый воздух	Электромагнитный; мотор; сжатый газ	Пружинный; сжатый газ (только для включения)	Пружинный	Ручной, быстродейств. привод; сжатый газ; электромагнит
Примечания	Жесткая камера	Камера давления на 80 ÷ 100 ат Количество масла 3×41 Принцип масляного выдувания	Три камеры с предохранительными клапанами. Свыше 37 kV последовательно включается треншалтер для включения	—	При 30 kV камера с выдуванием жидкости. Свыше 30 kV последовательный треншалтер, эластичная камера давления

1) Свыше—параллельный треншалтер.

2) Длительность дуги при этом около 0,1 sec.—собственное время выключателя.

3) Свыше 37 kV выключатели с маслом.

дения дуги свежим маслом, только в данном случае это достигается, главным образом, путем передвижения дуги в зону свежего масла, а в камерах масляного дутья путем движения струи масла на дугу, горящую на постоянных (для времени существования данной дуги) электродах. Такие выключатели фирмой Делль строятся уже до 25 kV.

Вторая группа масляных выключателей представлена выключателем с небольшим объемом масла, имеющим внутри бака еще камеру (рис. 3). Эта камера помимо отверстия для выхода подвижного контакта снабжена еще и отверстиями в противоположном конце непосредственно у неподвижного контакта. Давление, создаваемое энергией дуги в этой камере, заставляет масло вытекать мимо неподвижного контакта, охлаждая как всю дугу, так в особенности ее основание на подвижном контакте.

Как видно из доклада, энергия дуги, необходимая для гашения в таком выключателе, весьма не велика и составляет, например, для выключателя на 150 kV и 450 MVA энергии разрыва всего 120 килоджоулей.

Не имея под рукой достаточно экспериментальных и эксплуатационных данных, нам трудно, однако, оценить этот новый тип выключателя, общие же конструктивные соображения не позволяют видеть в нем что-нибудь более совершенное, хотя бы по сравнению с известным расширительным выключателем фирмы SSW как с эластичными камерами, так и с жесткими камерами.

Что касается остальных докладов, рассматривающих вопросы выключателей, то все они¹⁾ представляют собой подытоживание большого научно-исследовательского, конструкторского и эксплуатационного опыта ряда немецких и швейцарских фирм за последние годы.

Поскольку эти работы уже довольно хорошо освещены в мировой технической печати и в основном известны нашим читателям, то мы ограничимся здесь лишь несколькими замечаниями и приведем в заключение сводную таблицу, дающую наглядное представление о предельных параметрах современных выключателей различных типов (см. табл. 1 и 2).

В каких направлениях развивалось выключателестроение за последние годы?

Здесь мы должны прежде всего наметить два основных направления: выключатели жидкостные и безжидкостные. Однако теперь уже в этих двух основных направлениях появились различные новые течения. Так, масляные выключатели помимо дальнейшего развития и совершенствования обычных выключателей с большим объемом масла путем введения масляных камер, камер масляного дутья, дейонных решеток и т. п., развиваются также и в направлении уменьшения объема масла с доведением его до одного-двух десятков литров на бак вместо многих тонн и даже десятков тонн. Это — выключатели расширительные, горшковые и т. п. Затем получили права гражданства выключатели водяные, правда, в ограниченном диапазоне (до 25—30 kV и 500 MVA). Большой успех следует отметить также в области безмасляных, а именно воздушных выключателей, которые потенциально являются более совершенным типом, чем масляные. Фирме AEG удалось построить и испытать выключатели со сжатым газом на 220 kV и 2 500 MVA, в ближайшее время надо ожидать широкого распространения этих выключателей. Что же касается генераторных напряжений, то

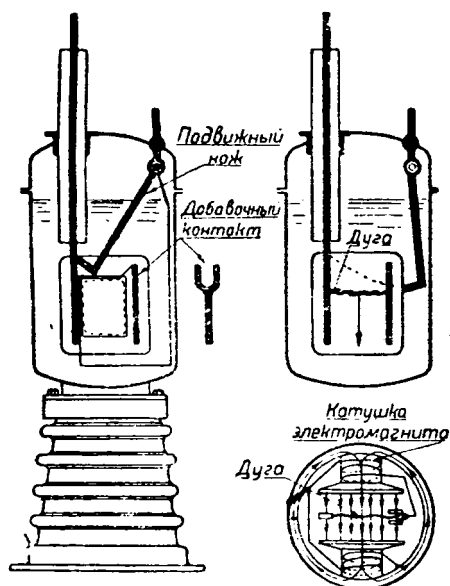


Рис. 2

1) Перрошет и Корелович, Современное состояние техники безмасляных и с малым объемом масла выключателей высокого напряжения, Кессельринг, Безмасляные и с малым объемом масла выключатели, Проблемы развития высоковольтных выключателей с маслом и без него.

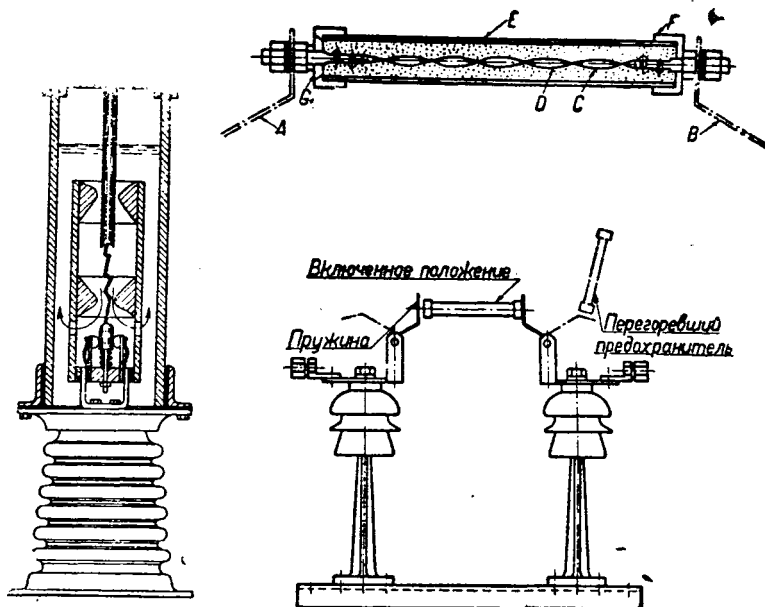


Рис. 3

Рис. 4

здесь все большее распространение получают воздушные дейонные выключатели фирмы Westinghouse и воздушные выключатели с поперечным дутьем фирмы Dell. В настоящее время в Европе установлено 1 500 экспансионных (с маслом или водой) выключателей, 400 сжатого газа, а в САСШ 250 воздушных дейонных выключателей.

Вопросам высоковольтных плавких предохранителей посвящен доклад John (Англия). Автор кратко останавливается на существующих конструкциях жидкостных (немасляных) и стреляющих предохранителей, разбивая их на четыре группы:

- A — тетрагалороуглеродистый предохранитель, хорошо известный и в нашей практике;
- B — предохранитель с шунтирующей вставкой из высокоомного металла (например, вольфрам), конструкция, также получившая за последние годы широкое распространение;
- C — стреляющие предохранители открытого типа;
- D — новая конструкция, описанию которой в основном автор и посвящает свой доклад.

Автор считает, что для предохранителя важнейшую роль играет не его разрывная мощность, так как обычно эта мощность покрывается последовательно включенным выключателем, а два другие качества: дешевизна замены сгоревшей вставки и возможность быстрого обнаружения сработавшего предохранителя. Этим свойствам мало удовлетворяют типы A и B. Тип C удовлетворяет этим требованиям, но его работа, особенно во внутренних помещениях, очень стеснительна, так как связана с выбрасыванием горячих газов, шумом и механическими ударами. В значительно большей мере поэтому для напряжений до 30 kV подойдет тип D.

Этот предохранитель состоит из трубки (например, фарфоровой), внутри которой по оси расположена плавкая вставка. Параллельно с ней натянута тонкая высокоомная нить, прикрепленная к двум концевым патронам. Один металлический наконечник патрона, наглухо прикрепленный к трубке, приболчен вместе с тем к поддерживающей его пружине; другой наконечник имеет среднюю часть, вырезанную в виде конуса, вершиной направленного внутрь трубки, и прикрепленную с внешней стороны к своей поддерживающей пружине (рис. 4). В момент перегорания вставки, а затем и нити, стягивающей оба поддерживающих конца предохранителя пружины, последние получают свободу и отбрасываются в противоположных направлениях. Таким образом предохранитель как бы распадается на две части, — одна в виде трубки и одного зажима, другая в виде части наконечника (конуса) с остатками плавкой вставки и нити. Замена последних уже не представляет никакой трудности, так же как и обнаружение поврежденного предохранителя.

Едва ли можно согласиться с мнением докладчика, что разрывная мощность предохранителя не играет никакой роли, так как именно низкая разрывная мощность современных предохранителей является препятствием их широкому применению взамен дорогостоящих масляных выключателей в тех случаях, где это возможно по всем остальным условиям (тупиковые подстанции, сельскохозяйственные высокового напряжения и т. п.). Указанные им другие свойства, несомненно, также весьма важны, и работа, проведенная в этом направлении, заслуживает безусловного внимания.

Таким образом доклады, представленные на Парижскую конференцию 1933 г., развернули довольно полную картину бурного развития этой области электропромышленности за последние годы. Наряду с упорным развитием и совершенствованием старых типов выключателей появились, окрепли и кое-где уже частично вытеснили старые типы выключателей выключатели с малым объемом масла или совсем без него. Рядом исследователей (Слепян, Браун, Бир-

манс, Майер, Кессельринг, Корелиович, Брессон и др.), проведены далеко идущие исследования в области дуги переменного тока и внесена значительная ясность в понимание процесса возникновения и гашения этих дуг. Капиталистическая техника, хотя и с большим запозданием, спешит под ударами кризиса выравнять отставший участок электротехники. Вложением средств в капитальное строительство материальной базы научно-исследовательских работ — лабораторий разрывной мощности — в ряде стран (Америка, Германия, Швейцария, Франция, Англия) ей удалось обеспечить значительное повышение поступательных темпов научно-исследовательской мысли в области выключающей аппаратуры.

Наша электропромышленность, проделавшая за последние годы

(за одну пятилетку) в этой области путь, измеряемый капиталистическими десятилетиями, овладев всем диапазоном производства выключателей, начиная от рубильников и кончая 220к-V гигантами на 2500 MVA, также поставлена вплотную перед задачей дальнейшей реконструкции освоенных типов и поисков новейших решений, в том числе и безмасляных типов выключателей с учетом особенностей нашей географии, социалистической экономики и техники. Необходимая для этого база — лаборатория разрывных мощностей — должна быть построена в кратчайший срок и тем самым будет открыта новая страница перед оригинальной творческой мыслью в советском электроаппаратостроении.

Инж. И. Палицын

Ленинградский электрофизический институт (ЛЭФИ)

Применение метода электростатической аналогии к расчету заземлений

Сущность этого метода, известного уже давно, состоит в том, что вычисляется емкость заземлителя, который рассматривается как находящийся в непроводящей среде, и затем по формулам перехода вычисляется сопротивление растекания тока. Формулы перехода очень просты: например, для случая, когда заземлитель находится около земной поверхности (т. е. при учете поверхности земли) получается такое соотношение между сопротивлением растекания R и емкостью c заземлителя:

$$R = \frac{1}{2\pi\kappa c},$$

где κ — удельная проводимость почвы.

Таким образом вычисление сопротивления заземлителя сводится к вычислению его емкости. Точное определение емкости сложного заземлителя представляется делом трудным или даже невозможным. Однако возможно приближенное вычисление емкости при помощи метода, названного себе чрезвычайно широкое применение в радиотехнике, — метода, предложенного Howe. Благодаря произведенным исследованиям выяснилось, что этот метод можно применить и для случая обычных конструкций заземлителей (трубы, ленты, их комбинации и пр.), причем все вычисления удастся свести к весьма простым операциям. В частности, для случая рядов труб, соединенных полосами, когда заземлитель составлен, следовательно, из взаимно параллельных и перпендикулярных элементов, расчет сводится к расчету этих элементов, а этот последний — к пользованию двумя кривыми, полученными расчетным путем и годными для любых таких заземлителей. Для проверки были рассчитаны конкретные конструкции заземлителей, с которыми экспериментировали различные авторы (Беляков — ВЭИ, Торопов — Волховстрой и др.). Получается практически полное совпадение результатов опыта этих авторов с вычислениями. Таким образом благодаря произведенной работе можно считать установленным, что расчет заземлений, включая и сложные конструкции их, можно производить при помощи электростатической аналогии, причем необходимая величина емкости заземлителя рассчитывается по методу Howe.

В. Воробьев

Экспериментальное определение волновых сопротивлений заземлений

В группе неустановившихся процессов было проведено экспериментальное исследование волновых сопротивлений заземлителей, выполненных в виде труб и в виде противовесов. Последние были выполнены в виде закопанных в землю на глубину около 0,5 м медных проводов разных диаметров и расположенных под разными углами к линии передачи и между собой. Измерения производились как при импульсах с помощью шаровых разрядников, так и при 50 Hz по способу амперметра и вольтметра. Почва, в которой находились исследуемые заземлители, обладала довольно плохой проводимостью — порядка $0,2 \cdot 10^{-6}$ S/cm. Получены следующие результаты опытов:

1. С увеличением длины противовеса волновое сопротивление резко уменьшается, оставаясь меньше сопротивления при 50 Hz до длины около 60 м. Начиная с этой длины волновое сопротивление остается почти постоянным, сопротивление же при 50 Hz продолжает уменьшаться.

2. Из опытов не удалось установить какой-либо зависимости волнового сопротивления противовеса от его диаметра, хотя последний изменялся в довольно широких пределах (от 2,8 м — провод, до 12 мм — трос).

3. Опыты не показали какого-либо влияния направления, по которому уложен противовес по отношению к линии передачи на величину его волнового сопротивления.

4. Величина напряжения на конце противовеса при разных длинах последнего изменяется, имея максимум при длине около 15 м. Величина этого максимума около 117% по сравнению с напряжением, приложенным в начале противовеса.

5. Измерения коэффициента использования параллельных и раз-

несколько меньше при импульсах, чем при 50 Hz. Это же относится и к трубам.

6. Состояние почвы (влажная, сухая, разрыхленная и т. д.) мало влияет на волновое сопротивление и сильно сказывается на сопротивлении, измеренном при 50 Hz.

7. Волновое сопротивление трубы сильно зависит от величины приложенного напряжения. Отношение сопротивления при 80 kV к сопротивлению при 350 kV равно $\frac{1}{4}$.

8. Формулы, предложенные Bewley, не могут быть применены для расчета противовесов ввиду неопределенности входящих в них коэффициентов.

Произведенная работа показывает на возможность применения противовесов для защиты линий от грозных перенапряжений в условиях, подобных тем, в которых производились опыты. Кроме того, эта работа позволяет произвести расчет противовесов.

В. Воробьев, И. Балыгин

Приборы для исследования перенапряжений

В течение 1932—1933 г. в ЛЭФИ разработаны следующие приборы для исследования перенапряжений на линиях электропередачи:

1. Регистрирующий кидонограф (рис. 1), представляющий по своей кинематической схеме совершенно оригинальную конструкцию. Необходимость неравномерного движения сдвигающей и наматывающей катушек при равномерном движении ленты привела американские фирмы (GEC, Westinghouse) к сложным кинематическим схемам. В приборе ЛЭФИ эта задача решена весьма простым способом. Прибор ЛЭФИ не нуждается в сильном часовом механизме, так как этот последний не служит источником движения, а лишь регулятором хода. Прибор применим для регистрации перенапряжений на трех фазах линии. Скорость движения ленты — 1 см в час при работе без перезарядки в течение 8 дней. Прибор приводится в действие пирей. Опытная эксплуатация кидонографа ЛЭФИ в течение грозового сезона 1933 г. в системе 160 kV Дгэс показала безобразную работу механизма, несмотря на неудовлетворительное выполнение приборов в полукустарной мастерской. Всего изготовлено 9 приборов, из них 5 для системы Дгэс. На основании опыта эксплуатации их в настоящее время разрабатывается вторая, усовершенствованная модель.

2. Регистратор прямых ударов молнии (рис. 2) весьма простой и дешевой конструкции. Корпусом прибора служит фарфоровая деталь «герметической арматуры» для ламп наружного освещения, что дает возможность без затруднений изготовить желаемое количество РПУ. Характерной чертой прибора ЛЭФИ является

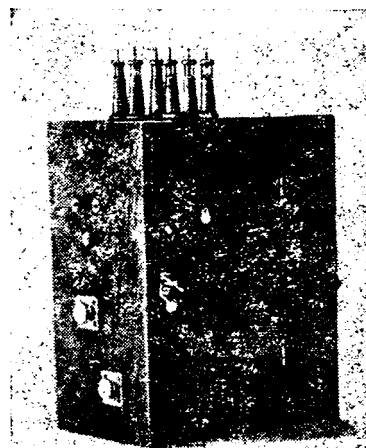


Рис. 1

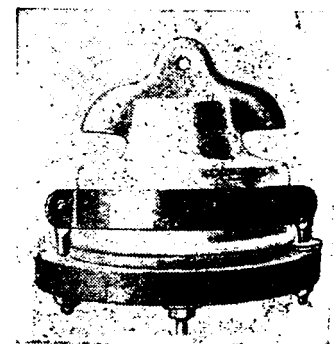


Рис. 2

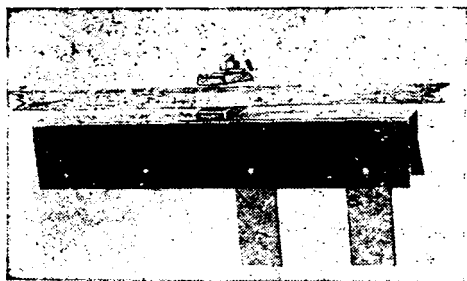


Рис. 3

зарядка на свету, без мешка, пластинками, вложенными в бумажные пакеты, имеющие в стенках металлические контакты. Изготовлено 375 РПУ для 160 kV системы Дгэс.

3. Счетчик перекрытый гирлянд (рис. 3), по конструкции совершенно оригинальный, отличающийся от американского большей простотой, удобством зарядки и лучшей видимостью показаний. Для 160 kV системы Дгэс было изготовлено 375 приборов и на основании опыта эксплуатации их в течение 1932—1933 г. разработана вторая усовершенствованная модель СПГ-2.

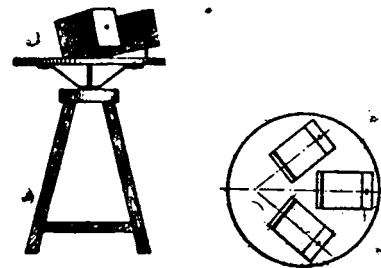


Рис. 4

4. Стереодиаграмма (рис. 4) очень примитивного выполнения, предназначенная для предварительных опытов фотографирования молнии с целью измерения размеров разрядного канала и определения места удара. Вместо объектива применено малое отверстие (стенки), для данной цели обеспечивающее достаточную светосилу и абсолютную ортоскопию изображения. Поверочные измерительные съемки с помощью стереофотоустановки дали неожиданно хорошую точность измерений (ошибка менее 4%). Установка состоит из двух пунктов, имеющих каждый три магазинных железных камеры, расположенных веерообразно на вращающемся столе.

А. Корсунцев

БИБЛИОГРАФИЯ

Проф. Б. И. Даманский. Централизованное управление электрическими установками и системами, ОНТИ, Энергоиздат, 1933 г., тираж 4 000 экз., цена 4 р. 75 к.

Вопросы управления большими электрическими системами и установками являются в настоящее время чрезвычайно актуальными. В этой области мы имеем значительное отставание нашей техники от техники капиталистических стран и почти полную неосведомленность наших широких технических кругов, существующих и применяемых за границей в широких масштабах приборах и аппаратах. До сего времени на русском языке не имелось за исключением нескольких статей в технических журналах никакой литературы по этому вопросу. С этой точки зрения нужно было бы приветствовать выпуск Энергоиздатом книги проф. Б. И. Даманского «Централизованное управление электрическими установками и системами», представляющей по своему замыслу первый опыт суммирования заграничной техники в области централизованного управления электрическими системами и допущенной Комитетом по высшей технической школе в качестве учебного пособия для энергетических вузов.

К сожалению, эта книга обладает целым рядом серьезных недостатков, которые ставят под вопрос целесообразность издания книги в ее теперешнем виде и делают совершенно недопустимым применение ее в качестве пособия для вузов.

Трудно было бы перечислить все недостатки и ошибки, которые имеются в книге, так как для этого потребовалось бы слишком много места. Поэтому ниже мы останавливаемся только на основных недостатках и ошибках.

1. Книга носит преимущественно компилятивный характер и по своему существу представляет собой изложение ряда статей, помещенных в течение последних лет в иностранных технических журналах, и перевод ряда фирменных брошюр. С этим можно было бы примириться, так как естественно, что при составлении книги, подобной рассматриваемой, в первую очередь и почти исключительно могла быть использована только заграничная практика. Однако никакой сравнительной критической оценки описываемых систем, никаких эксплуатационных данных в книге нет. В книге просто описывается в определенном порядке ряд систем и аппаратов по тем материалам, которые имелись у автора, причем рядом с описанием вполне современных систем помещено описание систем, давно уже отживших и переставших даже изготавливаться фирмами без всяких указаний на это (например, система телеуправления синхронно вращающимися избирателями фирмы Сименс). Давая описание определенных групп систем, автор не дает почти никакой характеристики применимости этих групп, несмотря на то, что отдельные группы систем имеют свои характерные свойства и достаточно обособленные области применения.

В тех немногочисленных случаях, когда автор пытается это сделать, эти попытки в большинстве случаев не выдерживают никакой критики.

2. Использование автором при составлении книги почти исключительно иностранного материала и, очевидно, малое знакомство автора с терминологией, выработавшейся в СССР в рассматриваемой области, привело к совершенно невероятной терминологии в книге. Целый ряд терминов, представляющих собой долов...

недопустимым. Таковы, например, термины, как «внегородские станции» (стр. 84) вместо привычного термина «районные станции», «ведущие» «плановые» и «поддерживающие» станции (стр. 88 и 89) вместо «пиковые» станции, станции основной нагрузки и станции, работающие по принужденному графику, такие термины, как «контактная рукоятка» (стр. 106), «распорядительная установка контакта» (стр. 111) и «операционное движение рукоятки» (стр. 122), такие обороты речи, как «график ведущей станции обертывает график плановой станции (подпись под рис. 64 на стр. 86) «рабочие» и «внерабочие» контакты и т. д.

3. Существует целый ряд существенных ошибок автора в тексте книги, которые являются совершенно недопустимыми и совершенно неправильно информируют читателей. Так, например, описывая систему с синхронно вращающимися избирателями фирмы Делье Со (стр. 128), применяющую в качестве избирателей телефонные искатели автоматических телефонных станций, автор помещает фотографию сигнальных ключей селекторной системы той же фирмы, никакого отношения к этой системе не имеющей, и именует эти ключи телефонными искателями.

На стр. 140—143 дается в качестве пояснения к импульсным системам телеуправления описание принципа действия буквопечатающих телеграфных аппаратов, которые никакого отношения к импульсным системам телеуправления не имеют и нигде вообще в системах телеуправления не применяются.

На стр. 150 при описании группо-импульсной системы АЕГ автор указывает, что род импульсов, применяемый в этой системе, имеет часть положительных и часть отрицательных импульсов. В действительности же особенностью системы АЕГ является именно применение импульсов одинаковой полярности, в связи с чем при передаче высокой частоты эта система требует только одного канала связи.

На стр. 183 автор дает описание выпрямительной системы. Из описания следует, что системы подобного рода используют вспомогательный источник в виде стабилизированного выпрямленного напряжения. Это подтверждается приведенным рис. 129. В действительности же выпрямительные системы не используют вспомогательных источников, они выпрямляют и посылают в линию самоизмеряемое напряжение или ток. Схема рис. 129 предназначена для того, чтобы при меняющемся первичном напряжении получать постоянное вторичное и непосредственно к телеизмерению никакого отношения не имеет.

На стр. 173 по описанию автора можно понять, что колебания сопротивления линии или напряжения источника тока в системе Midwarth устраняются от руки «регулируемым установочным сопротивлением», в то время как в действительности система это делает сама автоматически.

4. Целый ряд рекомендаций и оценок автора являются совершенно ошибочными и неприемлемыми. Так, например, на стр. 174 автор утверждает, что «радиус действия простой протенциометрической системы весьма велик» и что она может быть применена при расстояниях в несколько сот километров. С другой стороны (на стр. 180), мы встречаем следующую характеристику токовой компенсационной системы, «метод этот, будущая компенсационная, не является нулевым, а потому токи утечки от нару...

ний. В то же время на стр. 6 автор рекомендует в противоречие с этим применять компенсационные системы на расстояние 100—150 km.

В действительности же потенциметрические системы следует применять на расстояниях не свыше 5—10 km, а компенсационные — на расстояниях не свыше 20—30 km и в некоторых случаях по 50 km. При больших же расстояниях необходимо применять импульсные системы.

На целом ряде других ошибочных рекомендаций мы не останавливаемся.

5. Несмотря на большой объем книги, целый ряд факторов, имеющих существенное значение при централизованном управлении, в книге не освещен, несмотря на то, что в ряде других мест приведен ряд подробностей, не представляющих никакого интереса.

Примерами могут служить описания систем телеизмерения Гарتمان-Браун (180 стр.) DTW (190 стр.) меняющихся частот (205 стр.). Детали, приведенные здесь, не являются необходимыми в работе подобного рода, они более прилипли бы к месту, например, в книге с заголовком «телеметрия». Наряду с этим в описаниях отдельных систем не хватает всесторонней характеристики с различных эксплуатационных точек зрения. Например, описаны характеристики многих систем с точки зрения суммирования Midwarth (172 стр.), токовые компенсированные системы (181 стр.) времени импульсные системы, односторонне освещен вопрос суммирования в индукционной системе (165 стр.), не указано на зависимость времени импульсных систем от времени срабатывания реле, от постоянных линий связи, совсем почти отсутствует критика термоумформенных систем (184 стр.), отсутствует ряд существенных свойств конденсаторной системы, выпрямительной.

Абсолютно недостаточно освещены вопросы суммирования, которые играют громадное значение при централизованном управлении электрическими установками. Между тем, эти вопросы настолько актуальны и обширны по своему содержанию, что их можно было бы выделить в отдельную главу.

Также абсолютно недостаточны материалы по многократному использованию каналов связи. В книге приведено описание всего одного способа, выбранного, очевидно, случайно, который никакого представления о современном состоянии этого вопроса не дает. Между тем, от использования линий связи в значительной мере зависит применение той или иной системы телеизмерения или телеуправления.

О самом централизованном управлении по существу почти ничего не сказано, несмотря на то, что книга посвящена именно этому вопросу.

Суммируя сказанное выше, нужно прежде всего констатировать, что в качестве пособия для высшей школы книга непригодна. Для эксплуатационных работников книга пригодна со значительными оговорками. Безоговорочно этой книгой может пользоваться только человек, хорошо разбирающийся в данном вопросе. Таким образом книга, являющаяся по своему назначению очень нужной, по своему содержанию является совершенно неудовлетворительной и пробела в нашей технической литературе в данном вопросе не заполняет. Энергоиздату необходимо озаботиться об издании другой книги по вопросам централизованного управления электрическими системами, а лучше всего ряда книг по отдельным вопросам, входящим в эту проблему, поручив составление этих книг людям, являющимся действительными специалистами в этой области.

Бригада Бюро автоматизации
и телемеханики при ЦБТЭК ВСНТО
Инж. М. А. Гаврилов и инж. А. В. Михайлов

А. Ф. Вальтер. Пробой твердых диэлектриков, ГТТИ, 1933, Л., 96 стр., цена 1 р. 25 к., тираж 3 500 экз.

Рецензируемая книга представляет собой один из выпусков (VII) в серии «Проблемы новейшей физики», издаваемой под редакцией акад. А. Ф. Иоффе, С. Ф. Васильева и Д. З. Будниченко.

Напечатанный в числе других, изданных в связи с пятнадцатилетием деятельности институтов физико-технического комбината, настоящий выпуск посвящен рассмотрению вопроса о пробое твердых диэлектриков и делит свое содержание на семь глав: общее закономерности пробоя твердых диэлектриков (I), теория теплового пробоя (II), ее опытная проверка (III), электрический пробой в однородном (IV) и неоднородных (V) электрических полях, неполный пробой (VI) и длительные процессы при пробое твердых диэлектриков (VII).

В начале изложения автор вполне основательно подчеркивает факт сложности выбора в отношении пробоя твердых диэлектриков наиболее простых опытных условий, естественно необходимых для вывода ясных и общих закономерностей.

Структура диэлектрика, зависимость пробивного напряжения от температуры и времени являются наиболее интересными факторами для определения постоянства зависимых явлений в твердых диэлектриках. Автор приводит соответствующие данные для стекла (по Вальтеру и Инге), для фарфора (по Хальбаху и

Дрегеру), бакелизованной бумаги (по Хальбаху и Диттерту). Отмечая весьма различные закономерности двух областей (I—когда пробивное напряжение не зависит ни от времени, ни от температуры, и II—когда температура и время сильно влияют на пробивное напряжение), автор указывает на существование двух различных механизмов пробоя твердых диэлектриков, т. е. пробоя электрического и теплового.

Более отчетливые для однородных диэлектриков явления теплового и электрического пробоя усложняются при рассмотрении пробоя твердой технической изоляции, имеющей в большинстве случаев слоистую диэлектрическую среду. Соответствующие явления, объединяемые под термином «старение», автор рассматривает в конце книги.

Останавливаясь на теории теплового пробоя твердых диэлектриков, которая «позволяет не только качественно, но и строго количественно охарактеризовать процесс пробоя и приводит к формулам, дающим возможность вычислять абсолютные значения пробивных напряжений, причем вычисленные значения пробивных напряжений оказываются в хорошем согласии с наблюдаемыми», автор вкратце передает математическую трактовку этой теории, предложенную в СССР Н. Н. Семеновым и В. А. Фоком, причем упрощает изложение на одномерном случае переменного напряжения, в заключение останавливаясь на случае постоянного напряжения (по В. А. Фоку) и на четырех случаях частных.

Как пример опытной проверки тепловой теории пробоя, А. Ф. Вальтер приводит некоторые данные систематической проверки этой теории в отношении каменной соли, стекла и фарфора. Не являясь для большинства твердых диэлектриков тепловым (при обычных эксплуатационных условиях и переменном напряжении технической частоты), пробой может быть тепловым при обычных температурах (20—80°) лишь для немногих диэлектриков, как например, бакелизованная бумага, о которой автор и приводит здесь соответствующие данные. Для высоких частот, применяемых в радиотехнике, пробой большинства твердых диэлектриков является тепловым даже при комнатной температуре (за исключением слюды, полистирола и некоторых других материалов). Упомянув о том, что «никакой переходной области между областями теплового и электрического пробоя не обнаруживается», автор далее описывает характерные признаки электрического пробоя и рассматривает два предположения о причине появления большого количества свободных зарядов в диэлектрике, обуславливающих его хорошую проводимость в момент пробоя. Эти предположения сводятся к 1) ударной ионизации и 2) к вырыванию связанных ионов или электронов электрическим полем (все — для однородного поля).

Понимание явлений пробоя в неоднородных электрических полях более усложнено. В общем для твердого диэлектрика существует два характерных пробивных напряжения: максимальное и минимальное, разность между которыми возрастает с увеличением однородности диэлектрика и его электрической прочности.

Останавливаясь на рассмотрении пробоя слоистой изоляции (слюда или стекло и жидкий диэлектрик), автор отмечает один «на первый взгляд, неожиданный» вывод, что для безопасности более прочного слоя (слюда, стекло) необходимо, чтобы на него приходилось большая часть падения напряжения, чем на первый слой изоляции (например, трансформаторное масло).

Описывая методы борьбы с краевым разрядом, автор указывает на плодотворность применения среды с повышенной электропроводностью или полупроводящего лака, наносимого на поверхность образца вокруг электрода. Вторым способом ослабления краевых разрядов является применение в качестве среды трикрезилфосфата или (предложение А. Ф. Иоффе) смеси порошка TiO₂ с льняным маслом. Автор отмечает ограниченность действия второго способа.

После краткого обсуждения зависимости пробивного напряжения от толщины, температуры и длительности воздействия напряжения (в частности, приведены характерные осциллограммы пробоя для стекла и каменной соли) автор переходит к рассмотрению явлений неполного пробоя твердых диэлектриков, подразделяя диэлектрики в отношении хода развития пробоя и формы разрядов на группу аморфных и группу кристаллических веществ.

В последней главе о длительных процессах при пробое имеем между прочим формулировку следующего положения: «зависимость пробивного напряжения от времени характерна для неоднородных диэлектриков, содержащих включение или поры и мало устойчивых по отношению к термическим и химическим воздействиям».

В качестве мер против снижения электрической прочности изоляции при длительном воздействии напряжения рекомендуется устранение в диэлектрике прослоек, заполненных менее прочными компонентами, и повышение электрической прочности прослойки среды.

Содержание описываемой книги включает экспериментальные данные и иллюстративный материал в большинстве случаев из работ, выполненных сотрудниками физико-технического комбината и автором книги в том числе. Список работ, использован-

них при составлении книги, приведен в ее конце и, конечно, все не может быть рассматриваем как сколько-нибудь исчерпывающий существующую литературу по излагаемому вопросу.

Несмотря на то, что книга в целом вполне удовлетворительно отвечает поставленной автором цели, она не может претендовать на углубленное рассмотрение и полный обзор современного состояния важной проблемы пробоя твердых диэлектриков.

Данная монография более отображает некоторые работы соотрудников комбината в отношении поставленного вопроса, нежели дает общую картину положения вопроса на сегодняшний день. Исследование диэлектриков, промышленное значение которых непрерывно и сильно возрастает, является предметом особого внимания физиков не только СССР, но и САСШ, Франции, Италии и т. д.; но о ряде соответствующих последних вагариных работ рецензируемая книга читателя не информирует.

Достоинством книги является доступность изложения, удовлетворительное количество иллюстраций и хорошее качество издания. Рецензируемая книга, как и несколько других выпусков серии «Проблемы новейшей физики», несомненно, будет способствовать физическому образованию новых кадров электроизоляционной промышленности, подчас страдающих односторонне-техническим подходом к диэлектрику или же упускающих из виду значение структурного понимания электроизоляционного материала.

А. П. Примаковский

ДНЕВНИК ФАРАДЕЯ. Faraday's Diary; being the various philosophical Notes of Experimental Investigation made by Michael Faraday during the Years 1820—1862 and bequeathed by him to the R. Inst. of Gr. Br. now, by order of the Managers, printed and published for the first time, under the Editorial supervision of Thomas Martin Inn 7 vols. Sup. Roy, 800. vol. 1 pp. XXV + 430; vol. 2, pp. XVII, 467. L. 1932

Предпринятое в Англии издание семи томов дневника Фарадея представляет собой явления исключительного научного интереса и важности. О существовании этого документа знали очень давно и многие биографы Фарадея пользовались рукописями дневника при составлении своих книг; например, обстоятельная биография Фарадея, написанная Бенс Джонсом, содержит помимо переписки Фарадея многочисленные выдержки из его дневников, записных книжек, речей и лекций.

Дневник Фарадея имеет свою историю. 4 ноября 1867 г. занесено в протоколы Королевского института в Лондоне завещание проф. Фарадея, передающее институту шесть томов in folio «Experimental Notes» (Заметок об опытах), два тома in quarto таких же заметок и несколько не переплетенных манускриптов. В самом завещании Фарадея (1855 г.) дословно сказано так: «различные философские замечания об опытным исследованиям на писчей бумаге, пронумерованные по сериям и отчасти переплетенные в пять томов, книга в четверть листа философских заметок, другая половина в четверть листа таких же заметок...»

Окончательно объединенные по распоряжению руководства института рукописи дневника Фарадея в целом составляют восемь томов in folio и два тома in quarto.

Дневник содержит более 4000 страниц и дает весьма полную и почти непрерывную запись всей экспериментальной работы Фарадея за 42 года (1820—1862 гг.); от начала до конца запись исполнена собственной рукой Фарадея, его тонким и ясным почерком, лишь со случайными неразборчивыми местами и очень редкими вставками, написанными другими лицами, но тем не менее относящимися к данной работе Фарадея.

При просмотре страниц дневника обращает внимание крайняя систематичность и методичность составления заметок, по выражению Thomas Martin'a весьма отличных от неаккуратности заметок об опытах его предшественника в Королевском институте Генри Дэйви. Каждая страница дневника Фарадея датирована и каждый параграф пронумерован, каждый листок рукописи полностью исписан, многие параграфы иллюстрированы (всегда на правом поле листка беглыми набросками в чернилах).

В ранних частях дневника нумерация параграфа начинается заново в нескольких местах, но начиная со второго тома in folio сохраняется непрерывная последовательность почти до конца, причем число пронумерованных параграфов в этих сериях превышает 16000. Номера всегда применяются с ссылкой на прежнее исследование. Это напоминает последовательность номеров в опубликованных «Experimental Researches in Electricity» («Опытные исследования в области электричества»).

На многих страницах дневника посередине проведена пером вертикальная линия: вероятно, что таким образом Фарадей переречеркивал материал, использованный при подготовке опубликованных им статей¹⁾.

Дневник Фарадея не является журналом или ежедневной записью событий, но вернее — лабораторным блокнотом. Записи идут изо дня в день по мере хода экспериментов Фарадея. Содержание дневника полностью научное, или в нем содержатся наблюдения, относящиеся к данной работе, но сделанные вне лаборатории (например, в ходе некоторых опытов с верхним или волнистостью, вызванными колебаниями на поверхности

жидкости, Фарадей, наблюдая как в один сырой день повозка повара гремела по булыжнику, отметил, что дождевая вода, собравшаяся на верхушках пустых бочек, накоплялась массами, очень похожими на его завихрения).

Детали использованных приборов, изменения, произведенные в них по мере хода опытов, ожидаемые и действительно найденные эффекты записываются с величайшей тщательностью и точностью. Дефекты в приборах, неудачи в экспериментах записываются так же, как и тогда, когда сбываются лучшие ожидания Фарадея. Его исключительное искусство и изобретательность, настойчивость пред лицом неудачи, раскрываются перед читателем этого дневника, показывающего, как Фарадей следовал день за днем одной и той же нити мысли и пробовал сперва одно, а потом другое видоизменение, пока не удовлетворялся наличием или отсутствием предвиденного им эффекта и не исчерпывал все возможности.

Не представляя собой лишь сухой записи фактов, дневник является личной записью работы Фарадея, заботливо им сохранявшейся. Здесь видны энтузиазм к открытиям, исключительная настойчивость, оригинальность, плодovitость и богатство научного воображения Фарадея. Описание отдельного исследования нередко заканчивается постановкой новых задач, подсказанных предыдущей работой.

Дневник изобилует лабораторными сведениями, характеризующими как приборы, так и методы, примененные сотню лет назад. Фарадей изолирует проволоку катушек, прокладывая шнурок между витками и разделяя их слой колленкором; он сам изготавливает гальванометры, остроумно утилизирует простые детали.

Дневник Фарадея отражает его изумление красотой наблюдавшихся эффектов и восторженность многозначительными наблюдениями: «особо удовлетворительное испытание иногда заканчивается словами «весьма хороший эксперимент».

Как замечает T. Martin, под наблюдением которого издается дневник Фарадея, «вероятно, ни один из людей науки сравнимой с ним (Фарадеем) величины не оставил личной записи, которая была бы одновременно так полна и так поучительна».

Первый том рукописи, меньший из двух in quarto, включает запись с сентября 1820 г. по декабрь 1823 г., — Фарадей был в возрасте 29 лет в сентябре 1820 г. и в то время занимался, главным образом, химией и анализом, включая исследование новых смесей хлора и углерода; однако этот том содержит и некоторые важные электрические эксперименты (первые опыты с электромагнитным вращением и т. п.). Второй том in quarto большего размера охватывает период с декабря 1823 г. по ноябрь 1832 г. и по содержанию относится преимущественно к химии (в нем имеется запись об открытии и анализе в мае 1825 г. бикарбурата водорода). Второй том in quarto заполнен не более чем на две трети; в 1831 г. Фарадей, очевидно, решил хранить свои заметки на отдельных листах писчей бумаги и с этого времени дневник пишется на листах такого рода, а затем сшивается в томики.

Том первый in folio за время с февраля 1831 г. по июнь 1832 г. является одним из наиболее значительных научных манускриптов в мире, так как он содержит по существу запись работ, заключающих в себе открытие электромагнитной индукции (знаменитый опыт с кольцом 29 августа 1831 г.).

Заметки велись Фарадеем с 1831 г. вплоть до 1862 г., когда силы его склонились к упадку и опытная работа пришла к концу. Запись от 12 марта 1862 г. описывает эксперимент, который, вероятно, был последним из сделанных Фарадеем. Тогда ему не удалось обнаружить при помощи спектроскопа влияние магнитного поля на пучек света. Но и здесь последующие работы ученых доказали глубину воззрений Фарадея.

Недавно изданные в Лондоне два тома дневника включают в первый том рукописи с сентября 1820 г. по июнь 1832 г. и во второй том — рукописи с 25 августа 1832 г. по 29 февраля 1836 г. Изданы они под непосредственным наблюдением генерального секретаря К. института F. Martin'a, ценным содержанием статьи которого в «Nature» мы выше воспользовались.

Помимо биографического, физического и электротехнического значения, представляемого дневником Фарадея, здесь исследователь может найти исключительный по ценности материал для суждения о методике и организации научного труда. Опыт исключительного экспериментатора должен быть всесторонне использован. Поэтому следует отметить особую полезность перевода переиздания в СССР как собрания научных сочинений Фарадея, так и его интересного дневника.

А. П. Примаковский

Письмо в редакцию

В № 17 журнала «Электричество» за прошлый год появилась за подписью ячееки аппаратостроения НИТО энергетиков завода «Электроаппарат» рецензия на вышедшую год назад книгу проф. А. М. Залесского «Масляные выключатели». Своим образом рецензии и помещению под ней подписи ячейки научно-технической организации, что, очевидно, имеет целью придать рецензии характер общественного приговора, побуждает нас просить вас напечатать настоящее письмо.

Рецензия начинается с указанием на чрезвычайную сложность и обширность вопросов, связанных с масляными выключателями

¹⁾ См. Thomas Martin Faraday's Diary „Nature“, 126, 1930, p. 812—814.

и утверждения, «что составление подобного труда представляет собой, несомненно, для одного автора, хотя и обладающего разносторонней эрудицией, весьма тяжелую задачу».

Далее констатируется: 1) что «тем не менее, автор с достаточной полнотой охватил литературный и фирменный материал вплоть до 1925—1927 гг., а в некоторых отдельных случаях и последующих годов»; 2) что «основные проблемы масляного выключателя не только затронуты проф. Залесским, но и получили то или иное освещение соответственно взглядам и вкусам автора»; 3) что «выводы автора отличаются совершенной конкретностью и преподаются в форме технических расчетов»; 4) что «в книге собран большой фирменный материал, разобрано много конструкций выключателей, приведены многочисленные сведения об испытаниях, авариях, материалах»; 5) что «по объему собранного материала книга проф. А. И. Залесского превосходит все известные рецензентам труды в данной области и не только в нашей литературе, но и в иностранной». Наконец, рецензенты отмечают, что им известно, что «книга задержалась в выпуске на 2 года, что неминуемо должно было привести к частичному обесценению собранного автором материала. Этим же может быть объяснен ряд недостатков книги, отмеченных ниже»¹⁾.

За этой вышкой, всесторонней и весьма лестной оценкой книги проф. Залесского, объясняющей «нижеследующие недостатки» и «частичное обесценение» книги двухлетней задержкой в напечатании книги (и очевидно, хотя об этом рецензия умалчивает, и годичным запозданием рецензии...), рецензенты вдруг делают поворот и говорят уже о «существенных ошибках и промахах, допущенных автором», и «значительно понижающих ценность книги».

В чем же состоят эти промахи и ошибки. Во-первых, автору ставится упрек, что даже в таких случаях, когда не имеется достаточно теоретического и экспериментального материала, он стремится дать законченные технические расчеты, прибегая к чрезмерному, совершенно необоснованному упрощению в подходе к физическим процессам.

Прежде всего следует отметить, что, поскольку по тому или иному вопросу нет достаточного теоретического и экспериментального материала, всякий имеет право соглашаться с автором или оспаривать его способ подхода к явлениям, но никто не может претендовать на обладание истиной, а тем более упрекать автора за попытку осмыслить имеющийся скудный материал и подойти к явлению расчетным путем. Вопрос о том, насколько автор правильно предугадывает невыясненные стороны явлений и насколько полно принимаемая им упрощенная схема отображает существо дела, можно будет решить лишь по накоплению дополнительного экспериментального материала. Но сам путь — путь схематизации и упрощения сложных явлений для получения необходимых расчетных формул, — это общий и единственно возможный путь всех отраслей технической физики, понимаемый в широком смысле.

Второй недочет книги проф. Залесского рецензенты усматривают в том, что внимание, уделяемое им отдельным вопросам, далеко не всегда соответствует значению данного вопроса в электротехнике, а скорее диктуется количеством доступного автору материала и личным интересом автора. Спрашивается, как можно писать по «недоступным материалам»? Что же касается влияния на компоновку книги личных научных интересов автора, то от этого недостатка не свободна ни одна оригинальная книга и не только наших союзовых авторов, но и зарубежных, притом пользующихся мировой известностью (например, классические книги по электрическим машинам R. Richter'a, M. Widmar'a). Теоретически можно требовать от автора чувства меры, оценка этого чувства, однако, всегда будет субъективной.

Таким образом второй упрек рецензентов проф. Залесскому столь же мало обоснован, как и первый.

Третий (в рецензии он стоит на втором месте) и наиболее существенный упрек по мнению рецензентов сводится к тому, что в основу теоретических построений проф. Залесского приняты уже отжившие и отнюдь не плодотворные теории Айртона, Симона, Бауэра и Норберга. Далее приводится критика этих теорий на основе того материала, который появился за последние три года, а следовательно, который как проф. Залесскому, так и рецензентам стал известен только тогда, когда книга проф. Залесского была уже оформлена²⁾. Известно, что как раз в этот период в теории и технике масляных выключателей произошел громадный сдвиг. А потому, если бы указанные критические замечания имели целью обратить внимание читателей на эти новые успехи и побудить проф. Залесского, прекрасно, по оценке самих рецензентов, справившегося со своей задачей, переиздать книгу с учетом новых достижений, то это было бы вполне правильным и уместным. Но рецензенты, игнорируя первую хвалебную часть своей рецензии и собственные указания на причины «частичного обесценения книги (книга задержалась в выпуске на два года), делают совершенно нео-

жиданное заключение, которое и является причиной настоящего нашего письма.

Рецензенты пишут: «Ввиду отмеченных недостатков книга ни в коем случае не может служить систематическим курсом или занятиям руководством в практической работе для лиц, специально занятых постройкой или эксплуатацией масляных выключателей, так как пользование книгой в этих целях будет бесполезным и даже вредным».

Как следует из вышеизложенного, рецензия на книгу проф. Залесского, напечатанная в журнале «Электричество», состоит из трех плохо увязанных друг с другом частей. В первой части отмечаются крупные положительные качества книги и делается корректное указание, что «частичное обесценение книги и «ряд недостатков, отмеченных ниже», вызваны тем, что «книга задержалась в выпуске на 2 года». Вторая часть рецензии, которая по смыслу первой части должна была указать недостатки книги, говорит уже не о недостатках, а о «чрезвычайно существенных ошибках и промахах, допущенных автором», и не о «частичном обесценении» книги, а о «значительном понижении ценности книги». Эта часть, однако, не содержит ни одного указания на «чрезвычайно существенные ошибки» и говорит лишь о «промахах». При этом в действительности лишь первые два указания могут быть отнесены к промахам, но не проф. Залесского, а самих рецензентов, которые, по видимому, недостаточно знакомы с путями развития современной технической физики и с технической литературой. Что же касается третьего указываемого рецензентами «промаха», то он представляет по существу упрек проф. Залесскому в отсутствии у него дара ясновидения, в результате чего в книге оказались неиспользованными материалы, которые появились и появляются после оформления книги. Как первая, так и вторая часть рецензии дают оценку книги с учетом ее недостатков, и хотя вторая часть, впадая в противоречие с первой, говорит о «значительном понижении ценности книги», а не «неминуемом обесценении книги», которое явилось результатом задержки на 2 года в напечатании книги, но ценность книги в ней не отрицается.

Очевидно, что при отмеченном построении первых двух частей рецензии в заключительной третьей части рецензентам предстояло высказать свое окончательное мнение: имеется ли налицо «неминуемое частичное обесценение книги», вызванное обстоятельствами, от автора не зависящими, или «значительное понижение ценности книги» вследствие «чрезвычайно существенных ошибок и промахов автора». Рецензенты нашли, как мы видели, третий выход и объявили книгу не только «бесполезной, но даже вредной».

Таким образом оказывается, что книга проф. Залесского, являющаяся «первым капитальным по объему трудом о масляных выключателях», в котором, несмотря на большие, стоявшие перед ним трудности, «автор с достаточной полнотой охватил литературный и фирменный материал» по дате завершения книги, причем «основные проблемы масляных выключателей не только затронуты им, но и получили то или иное освещение соответственно взглядам и вкусам автора», а «выводы отличаются совершенной конкретностью и поддаются в форме технических расчетов», — эта книга по мнению рецензентов является не только бесполезной, но и вредной. Основной же причиной такого проговора служит появление после оформления книги новых крупных теоретических и практических достижений.

Совершенно очевидно, что это заключение представляет собой не вывод из рецензии, а проявление намерения во что бы то ни стало дискредитировать книгу. Вполне соглашаясь с первой частью рецензии, отмечающей крупные достоинства книги проф. Залесского, и приветствуя появление этой книги, мы считаем необходимым протестовать самым решительным образом против внедрения в нашу критическую литературу приемов, примененных в упомянутой рецензии. Отрицательная сторона этой рецензии усугубляется еще тем, что она напечатана не за подписью отдельного лица, а от имени научно-технической организации, а именно ячейки аппаратостроения НИТО энергетиков завода «Электроаппарат». По самому положению завода, — единственного в Союзе по данным отрасли производства, это должно придавать рецензии особый вес, на что, очевидно, и ведется расчет. В заключение мы не можем не выразить сожаления, что редакция журнала «Электричество» напечатала рецензию без подписей, ее составивших. Советская техническая общественность должна знать, с кого ей спрашивать за подобное бесцеремонное обращение с печатным словом.

А. Горев, В. Толвинский

От редакции

Помещая письмо гг. Горева и Толвинского по поводу рецензии на книгу проф. Залесского «Масляные выключатели», мы считаем необходимым указать на следующее:

Поместив рецензию, данную научно-техническим кружком завода «Электроаппарат», редакция отнюдь не считает, что она стала жертвой сведения каких-либо личных счетов уже потому, что этот кружок объединяет в себе почти всех наиболее известных практических и теоретических работников в области советского выключателестроения (Машкиллейсон, Воронов, Третьяк, Романовский, Аронович и др.), а также ввиду наличия в порт-

¹⁾ Разрядка всюду напра.

²⁾ Предисловие к своей книге автор написал в 1932 г., когда основная часть этого материала была опубликована. Редакция

феле редакции еще одной рецензии аналогичного характера от работников Лаборатории коммутационной аппаратуры ВЭИ. По этим же причинам редакция не может также разделить сожаления по поводу помещения рецензии ячейки НИТОЭ без поименного перечисления всех членов этой организации, подписавших эту рецензию. Редакция со своей стороны не может не выразить недоумения по поводу столь горячей защиты со стороны авторов письма книги, которая хотя и явилась первой специальной работой по масляным выключателям, но, к сожалению, не оказалась на уровне требований, предъявляемых к такого рода книгам со стороны советского читателя — инженера и студента.

В заключение приводим упомянутую выше рецензию работников ВЭИ и считаем вопрос на этом исчерпанным.

Проф. А. М. ЗАЛЕСКИЙ «Масляные выключатели», изд. Кубуч, №32, стр. 424, 26½ л., тираж 10 000 экз., цена 7 руб.

Автор взял на себя весьма ответственную задачу, т. е. составление большого по объему специального труда, посвященного только масляным выключателям. Прежде всего необходимо отметить, что период составления и издания труда совпадает с периодом исключительно бурного развития в области выключателей как масляных, так и безмасляных. Здесь мы имеем в виду как конструктивную сторону, так и теорию рабочего процесса. Это очень серьезное обстоятельство сделало книгу к моменту ее появления на свет почти бесцельной.

Автор пользуется в сущности совсем устаревшими теориями, опирающимися на уравнение Айрбон и Норберга, стараясь подвести математическую базу под процесс разрыва дуги в выключателе.

Из большого объема экспериментального материала, сопровождающего первые главы книги, с очевидностью вытекает чрезвычайная сложность явлений, сопровождающих процесс разрыва дуги в масляном выключателе, и математическая часть не помогает разобраться во всем этом, несмотря на большое отведенное ей место. Громоздкий математический аппарат, привлеченный автором в помощь уяснения некоторых физических вопросов, только затрудняет их понимание, не приводя в то же время ни к каким расчетным формулам. Охваченный в книге литературный материал в отношении его систематизации позволяет желать много лучшего. Как отмечает сам проф. Залесский, исследования в области выключателей обычно производились конкурирующими фирмами, а потому результаты исследований освещались тенденциозно. В силу этого использование подобного материала требует большей осторожности. Необходимо было бы подчеркнуть, что является более или менее установленным и что еще сомнительным. К сожалению, критика в книге проф. Залеского почти отсутствует. Особенно в этом отношении следует отметить главу, посвященную влиянию постоянных цепи на работу масляных выключателей.

В книге имеется ряд существенных недочетов физического характера. Так, например:

Автор устанавливает в § 12, что давление способствует гашению дуги только в некоторых небольших пределах, и вслед за

этим в § 13 категорически утверждает, что давление само по себе является основным фактором, определяющим работу гасительной камеры. Таким образом совершенно не ясно, какое место принадлежит давлению. К 1930 г. Слепиан дал уже довольно полное толкование рабочего процесса масляного выключателя, совершенно не нашедшего отражения в книге проф. Залеского.

Следует также отметить, что автор не подчеркнул принципиальной разницы в разрыве дуги в выключателе «Денон» и действенной решетке масляного выключателя и даже, наоборот, считает их одинаковыми, что, конечно, неверно.

В § 27 дается метод определения тягового усилия привода, исходя из скорости подхода траверсы к контактам и величины электродинамических усилий, действующих на траверсу. Такой метод может быть применен только для проверки выбранной величины силы тяги при включении на существующее короткое, а не для определения ее величины, так как одна исходная величина (скорость) является сама функцией силы тяги и при ее увеличении должна возрастать, в то время как по автору зависимость между ними обратная. Если пользоваться предлагаемым методом, то может оказаться, что при достаточных малых электродинамических усилиях привод может оказаться вообще лишним элементом (1).

При наличии в книге весьма подробных и довольно абстрактных математических выкладок относительно расчета контактов физическая сторона в этом вопросе почти отсутствует. Фигурируют такие понятия как «плотность тока» в контакте, т. е. понятие, недостаточно определенное и т. п.

Во всей книге чувствуется явная диспропорция в изложении материала. Некоторые вопросы разбираются с излишней математической подробностью (например, электродинамические усилия в контактах), в то время как другие — весьма существенные — ограничены только картинками и то не полно (например, приво-ды).

Приходится сожалеть также, что автор ограничился только масляными выключателями, не упоминая совершенно о новых течениях в области выключающей аппаратуры, хотя бы для того, чтобы была ясна вся проблема в целом. Было бы очень не плохо для учебника дать и исторические справки о развитии выключающей аппаратуры взамен большого количества архивного материала, никому ненужного.

В заключение следует отметить, что книга проф. Залеского для систематического изучения данного вопроса рекомендована быть не может, в особенности если это изучение производится самостоятельно. Только очень редкие отдельные места могут быть рекомендованы без особых дополнений и замечаний.

Для специалиста эта книга может служить только как справочный материал по некоторым литературным данным (результаты некоторых исследований), да и то сомнительно, так как большинство из них уже имеет только историческое значение. Книга оказалась уже слишком старой как только она появилась.

Инж. Ю. В. Буткевич, инж. А. Я. Буйлов, инж. А. М. Мелькумов

ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

Техника высокого напряжения и линии передач

Медные и алюминиевые провода в современных высоковольтных электропередачах на дальних расстояниях, «ETZ», 27 апреля 1933 г., стр. 403—404.

В Германии Al как материал для проводов высоковольтных сетей употребляется уже давно. С 1915—1918 гг. там стали употреблять и сталеалюминиевые провода, состоящие из стальной жилы и покрывающих ее алюминиевых проволок. С 1920 г. вошла в употребление в небольшом количестве и бронза. При устройстве в 1926 г. первой сети с напряжением в 200 кV здесь ставили медные провода, в то время как с САСШ в таких случаях применяли обыкновенно сталеалюминиевые. С 1928 г. в подобных случаях ставили иногда и провода из алдрея (сплав алюминия).

В Германии обыкновенные провода делают из проволоки диаметром от 1,8 до 3 мм, в Америке же от 1,8 до 5 мм, сталеалюминиевые же немецкие провода при отношении поперечного сечения наружного алюминиевого слоя к площади сечения стального сердечника 6:1 делают из 7 стальных и 26 алюминиевых проволок, тогда как американские и английские состоят обыкновенно только из 1 стальной и 7 алюминиевых проволок.

В Германии почти $\frac{2}{3}$ всех проводов в сетях высокого напряжения (30 кV и выше) — медные. Наиболее употребительные сечения их 50 ÷ 700 мм² (соответственного алюминиевого — 120 мм²). Общая длина таких сетей в Германии составляет 27 000 км; из них имеют медные провода 61,8%, бронзовые — 0,5%, алюминиевые — 33,2%, сталеалюминиевые — 2,9% и из алдрея — 1,6%. На алюминиевые провода приходится: в сетях напряжением от 100 до 125 кV 52,7%, от 50 до 80 кV — 32,5% и в сетях напряжением от 30 до 50 кV — 15%. На медь в общем приходится 64,8%, причем в сетях с напряжением в 220 кV провода ставились исключительно медные.

Переходя к данным по Англии, следует заметить, что в то время когда в Германии высоковольтные линии расположены по преимуществу в больших промышленных центрах, в Англии подобные линии чаще всего с напряжением в 132 кV служат для соединения и выравнивания работы отдельных силовых станций. Общая длина такой сети в Англии равна только 35% германской и составляет в общем 904 км с 19 724 т металла в проводах (в Германии 46 070 т). По напряжению эта сеть распределяется в следующие группы: 33 кV — 32,9%, 66 кV — 10,7% и 132 кV — 56,4%, а по весу проводов: сталеалюминиевых 87,5% и медных 12,5%, причем сюда включены и вес стали. Если же сталь выделить, то получится 81,3% алюминиевых и 18,7% медных. Сеть с напряжением в 132 кV имеет здесь исключительно сталеалюминиевые провода, так что здесь на 1 км сети с медными проводами приходится 5,5 км сетей со сталеалюминиевыми проводами.

Высоковольтная сеть во Франции подходит ближе к германской. Общее протяжение ее составляет 32 625 км, а общий вес материала проводов — около 46 000 т, причем он распределяется следующим образом: в сетях с напряжением в 30—50 кV на медь приходится 91%, а на алюминий — 9%; в сетях 55—90 кV на медь — 62%, на алюминий — 36,9%, на альмелок — 0,9%; в сетях с напряжением 85—125 кV, только 35,9% — на медь, а на алюминий и сталеалюминий — 64,1%; в сетях же с напряжением 130—220 кV медь совсем не применяется.

Нормы для поперечного сечения проводов во Франции отличаются от германских. Чаще всего здесь применяются следующие сечения: при 30—50 кV медные 38—50 мм², алюминиевые 88 мм² и сталеалюминиевые 50—70 мм²; при 50—80 кV — соответственно 50—70 мм², 88—127 мм², 70—150 мм²; при 85—125 кV 100—143 мм², 170—238 мм² и 148—238 мм²; при напряжении 130—220 кV — алюминиевые сечением 238—355 мм², сталеалюминиевые 180—400 мм² и из альмелока 196 мм². Франция в районе алюминиевой промыш-

ленности и гидроэлектрических станций в последнее время вообще предпочитает алюминий и его сплавы (альмелек).

Швейцарская высоковольтная сеть имеет общее протяжение в 7300 км. Вес проводов в ней—11800 т, из которых приходится на медные и бронзовые 63,3%, а на алюминиевые и сталеалюминиевые 36,7%. В сетях с напряжением выше 100 кV легкие металлы преобладают; из общей же длины сетей в 7300 км имеется участок с медными проводами—63,7%, алюминиевыми, сталеалюминиевыми—26,1% и из алдрея—9,8%.

Что касается сетей с напряжением в 220 кV ($139 \cdot \sqrt{3}$), то таких имеется ныне: в САСШ 8145 км, в том числе 5375 км со сталеалюминиевыми проводами общим весом 23125 т и 770 км с медными (5360 т); в Италии—290 км, в том числе 200 км со сталеалюминиевыми проводами (800 т) и 72 км с проводами из алдрея (вес 230 т); во Франции—1050 км со сталеалюминиевыми (4380 т) и в Германии—1318 км—с медными (вес металла 14000 т). Касаясь вопроса о применении в таких сетях вместо меди алюминия, следует заметить, что в Германии при современных ценах на медь и алюминий такая замена нерациональна, как это видно из следующего расчета. Сечение медного провода по своей величине относится к сечению алюминиевого такой же пропускной способности, как 70 к 120.

Вес проводов—как 603 к 324. Стоимость (на 1 км)—как

$$\frac{303 \cdot 82}{324 \cdot 185} = \frac{495}{630}$$

Из этого расчета видно, что в Германии при современных ценах на металлы алюминиевый провод стоит дороже медного на 20÷25%.

Инж. И. Тихонов

Реле и измерительные приборы

W. M. THORNTON, W. G. THOMPSON, Абсолютное измерение высоких напряжений, „JIEE“, июнь, 1932, стр. 1—15, 14 рис., 11 табл.

Как известно, в настоящее время не существует эталона, который бы мог служить для сравнения с приборами, предназначенными для измерения очень высоких потенциалов, а точное измерение большого числа физических постоянных требует возможности точного определения этих потенциалов. В реферируемой статье описывается прибор и простой метод абсолютного измерения высоких напряжений, основанный на следующем принципе.

Металлический эллипсоид, свободно подвешенный между двумя пластинами, на которых наложено два различных потенциала, принимает такое положение в поляризованном поле, что его большая ось будет параллельна направлению этого электрического поля; если отклонить эллипсоид из этого положения, то возникает вращающий момент, стремящийся привести эллипсоид в исходное положение. Этот вращающий момент дает возможность определить величину поля и, следовательно, разность потенциалов. Надо сказать, что этот метод приложим только в случае достаточно высоких напряжений, чтобы поддерживать электрическое поле в несколько сотен вольт на сантиметр в центре интервала между двумя пластинами; кроме того, отношение расстояния между этими последними к длине эллипсоида не должно быть ниже 25, если требуется точность выше 1%.

В статье дается теория функции этого прибора и подробное описание модели, которая служила авторам для экспериментирования. Эллипсоид из дюралюминия имел длину 3,9694 см и 0,567 см в диаметре и объем 0,7388 см³; пластины имели диаметр 140 см; их края загибались, чтобы избежать появления таких разрядов при очень высоких напряжениях. Расстояние между пластинами равнялось 1 м, чтобы возможно больше ослабить влияние эллипсоида на распределение заряда на их поверхностях. Пластина, соединенная с землей, укреплена на железной стойке, высоковольтная же пластина поддерживается изолирующим стержнем, а расстояние между пластинами сохраняется при помощи бакелизованных трубок.

Исследования показали, что электрическое поле может быть рассматриваемо однородным в центральной части, имеющей 50 см в диаметре. Подвес бифилярный, носящий в нижней части зеркальце и амортизатор. Проверка прибора производилась при помощи шарового искрового промежутка, результаты показали, что отношение трансформации оставалось постоянным между пределами от 10 до 50 кV.

Что касается различных влияний, как, например, влияния расстояния между пластинами, движения воздуха, температуры окружающей среды и пр., то в пределах найденных опытом соотношений они не сказываются на измерениях. Из результатов довольно тщательного экспериментирования авторы пришли к заключению, что их прибор способен измерять напряжения между 100 и 200 кV с точностью 0,1% и что он обладает качествами, присущими всякому эталонному прибору.

Инж. Л. Брауде

СОЦИАЛИСТИЧЕСКИЙ ОБМЕН ОПЫТОМ В ПРЕДПРИЯТИЯХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ТЕХНИКО-ИНФОРМАЦИОННЫМИ ИЗДАНИЯМИ ЦИТЭИН-СО ЦЕНТРОТЕХПРОПА НКТП

- **ТЕХСО** ● Картоoteca технической информации и социалистического обмена опытом
Серия 13. Производство и распределение электр. энергии 480 карт, цена 58 руб.
Серия 14. Электрооборудование промышленных предприятий, 360 карт, цена 43 руб.
Серия 59. Электротехническая промышленность, электромашиностроение, 240 карт, цена 29 руб.
Серия 60. Раднотехника и вакуумная техника, 120 карт, цена 15 руб.
Серия 61. Гальванические источники тока, 120 карт, цена 15 руб.
- **ТЕХНАР** ● Техническая аннотационная картоoteca Госуд. научн. библ. НКТП
Серия 20. Электротехническая промышленность, сильные токи, 1100 карт, цена 77 руб.
Серия 21. Электротехническая промышленность, слабые токи, 480 карт, цена 34 руб.
- **НОВОСТИ ТЕХНИКИ** ● Бюллетень, в 120 номерах в год помещает информацию о всех новейших достижениях советской и иностранной техники, 28 р. 80 к. в год
- **НОВОСТИ ТЕХНИКИ** ● Картоoteca 1933 года, информация о достижениях техники
Серия 6. Электротехника, 74 карты, цена 7 р. 40 к.
Технико-экономическая информ. картоoteca
Серия 4. Электрохозяйство капиталистических стран 75 карт, цена 15 руб.

● **ТЕХПЕРЕВОДЫ ИЗ ИНОСТРАННЫХ ЖУРНАЛОВ** ● **ОТЧЕТЫ О ЗАГРАНИЧНЫХ КОМАНДИРОВКАХ** ●
ТРЕБУЙТЕ ПОДРОБНЫЕ ПРОСПЕКТЫ

ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ: Управление сбыта ЦИТЭИН-СО НКТП, Москва 12, Рыбный п. 24. к. 2 (расч. сч. № 1525 в 140 н. Госбанка, первая группа) или его филиалам и представительствам

ОНТИ — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Технический редактор И. Ф. Кузьмин

РЕДКОЛЛЕГИЯ: инж. Е. С. Аватков, проф. В. И. Вейц, инж. В. Н. Глазнов, инж. М. Н. Грановская, инж. Я. А. Климовичкий, акад. Г. М. Кржижановский, инж. А. М. Николаев, инж. Е. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, инж. Н. А. Савонов, проф. М. А. Шателен, акад. К. И. Шенфер, проф. Я. Н. Шпальрейн. **ОТВ. РЕДАКТОР:** инж. Н. А. Савонов

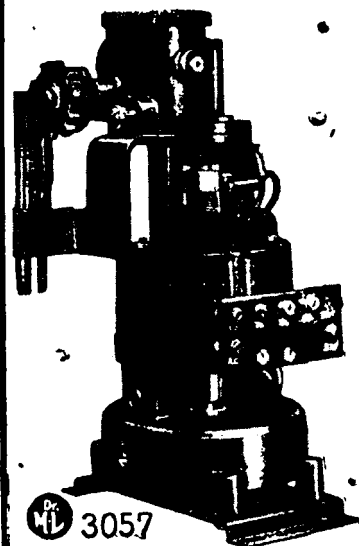


TAYLOR
ИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

ЛЕТЕРОИД
ВУЛКАНИЗИРОВАННАЯ ФИБРА
ФЕНОЛОВОЕ ВОЛОКНО

Изготавливаются на самом современном заводе в мире. Завод построен в 1933 г.

Taylor & Co., Incorporated
NORRISTOWN, PENNSYLVANIA, U. S. A.



3057

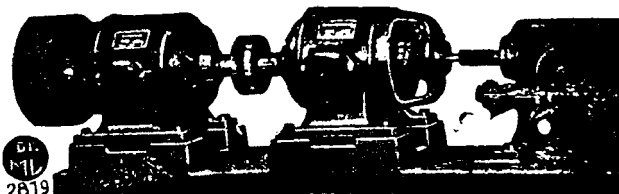
**Специальные
машины**

для
телефона

Вызывающие и
сигнальные
умформеры

для вызывающего
тока в 25 а. с. и для
двух частот сум-
мера с сигнальным
механизмом

Мощности от
2—200 вольт-амп.



2819

Max Levy
G. m. b. H.
Berlin N 65 H, Müllerstrasse 30 v. 6681

МЫ РЕКОМЕНДУЕМ:

**ЧИСТОЕ ЖЕЛЕЗО
«АРМКО» ДЛЯ МАГ-
НИТНЫХ АППАРАТОВ**

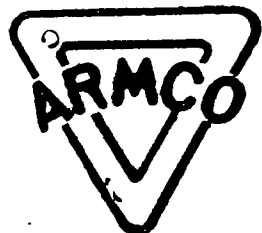
Благодаря высокой электропроводимости, хорошей магнитной проницаемости специальные разновидности нашего чистого железа предлагаются для телефонных аппаратов и для радиопромышленности. Наиболее крупные телефонные общества и Радиоконпании в Америке и Европе употребляют чистое железо АРМКО для телефонных аппаратов и громкоговорителей.

**ТРАНСФОРМАТОРНУЮ
СТАЛЬ «АРМКО»**

Производство АРМКО включает 5 специальных разновидностей стальных листов для электрических трансформаторов с минимальной потерей ватт, вплоть до 1,07 ватт на 1 кило. Мы изготавливаем также особую сталь для радио-трансформаторов.

**ОГНЕУПОРНУЮ
СТАЛЬ «СИКРОМАЛЬ»**

Вырабатываемая нами сталь «СИКРОМАЛЬ» отличается сопротивляемостью до 600, 800, 900, 1000 и 1200° Ц. Мы особенно рекомендуем цельнотянутые трубы для пароперегревателей, рекуператоров, трубы для продувания котлов и т. д.



ARMCO

ЦЕНТРАЛЬНОЕ ЕВРОПЕЙСКОЕ БЮРО
6, Avenue Gourgaud, 6 — PARIS (XVII)

В Англии: Thames House, Millbank, LONDON S.W.1.
В Германии: Hochhaus Hansaring, KÖLN a/Rh.

ОНТИ ЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ НА 1934 ГОД

ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени Ф. Дзержинского
Орган ВТИ им. Дзержинского.
Рассчитан на инженеров, техников, студентов вузов.
Подписная цена: на год — 20 р., на 6 мес. — 10 р. Отд. номер — 2 р.
10 номеров в год.

ТЕПЛО и СИЛА ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров-энергетиков, инженерно-технических работников электростанций и студентов вузов и др.
Подписная цена: на год — 18 р., на 6 мес. — 9 р.
Отдельный номер — 1 р. 50 к.
12 номеров в год.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ
Выпуск ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ
РЕФЕРАТНЫЙ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров и техников.
Подписная цена: на год — 12 р., на 6 мес. — 6 р. Отд. номер — 1 р. 20 к.
10 номеров в год.

МАШИНИСТ
Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального бюро по обучению рабочих теплосилового хозяйства.
Рассчитан на машинистов стационарных и подвижных теплосиловых установок.
Подписная цена: на год — 4 р. 20 к., на 6 мес. — 2 р. 10 к., на 3 мес. — 1 р. 5 к.
Отдельный номер — 35 к.
12 номеров в год.

ВЕСТНИК КОЧЕГАРА
Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального бюро по обучению рабочих теплосилового хозяйства.
Рассчитан на кочегаров стационарных и судовых котельных установок, на машинистов, на низший и средний административно-технический персонал.
Подписная цена: на год — 3 р. 60 к., на 6 мес. — 1 р. 80 к., на 3 мес. — 90 к.
Отдельный номер — 30 к.
12 номеров в год.

„Советское котлотурбостроение“ (бывш. „Вестник котлотурбинной промышленности“)
Орган Всесоюзного научно-исследовательского института теплогидротехнического оборудования.
Рассчитан на инженерно-технический персонал заводов и научно-исследовательских институтов котлотурбостроения.
Подписная цена: на год — 12 р., на 6 мес. — 6 р.
Отдельный номер — 2 р.
6 номеров в год.

Дизелестроение Орган Государственного Всесоюзного дизельного объединения и Научно-исследовательского дизелинститута
Рассчитан на ИТС заводов, сотрудников институтов, преподавателей вузов и техникумов и инженерно-технический персонал дизельных установок и судов.
Подписная цена: на год — 10 р. 80 к., на 6 мес. — 5 р. 40 к.
Отд. номер — 1 р. 80 к.
6 номеров в год.

Гидротехническое строительство Орган Гидроэлектростроения, Сектора водных ресурсов Госплана СССР.
Рассчитан на инженерно-технических работников, занятых производством и эксплуатацией гидротехнических сооружений.
Подписная цена: на год — 15 р., на 6 мес. — 7 р. 50 к.
Отдельный номер — 1 р. 50 к.
12 номеров в год.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО Орган Главэнергопрома, Главэнерго НКТП и Энергетического института и Академии наук СССР и ВЭЖ-РНТО
Рассчитан на квалифицированных работников электропромышленности и электростроительства.
Подписная цена: на год — 25 р., на 6 мес. — 12 р. 50 к., на 3 мес. — 6 р. 25 к. Отд. номер — 1 р. 25 к.
20 номеров в год.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров-энергетиков и учащихся вузов.
Подписная цена: на год — 18 р., на 6 мес. — 9 р., на 3 мес. — 4 р. 50 к. Отд. номер — 1 р. 50 к.
12 номеров в год.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ
Выпуск ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
РЕФЕРАТНЫЙ ЖУРНАЛ ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров-теплотехников.
Подписная цена: на год — 12 р., на 6 мес. — 6 р. Отд. номер — 1 р. 20 к.
10 номеров в год.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОМОНТЕР ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА
Рассчитан на квалифицированного электромонтера, младший и средний персонал и прорабов.
Подписная цена: на год — 8 р. 40 к., на 6 мес. — 4 р. 20 к., на 3 мес. — 2 р. 10 к.
Отдельный номер — 70 коп.
12 номеров в год.

ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА
Рассчитан на инж.-технический персонал заводов ВЭТ и инженеров-электротехников.
Подписная цена: на год — 10 р., на 6 мес. — 9 р., на 3 мес. — 4 р. 50 к.
Отдельный номер — 1 р. 50 к.
12 номеров в год.

ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СЛАБОГО ТОКА Орган Всесоюзного объединения электрослабой точной промышленности (ВЭСО)
Рассчитан на инженеров, техников, студентов и высококвалифицированных рабочих.
Подписная цена: на год — 12 р., на 6 мес. — 6 р.
Отдельный номер — 1 р. 20 к.
10 номеров в год.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА
Орган Главэнергопрома и постоянного бюро съездов по электрификации жел. дорог.
Рассчитан на квалифицированного рабочего, техника, студента, мастера и инженера, работающих по электрической тяге.
Подписная цена: на год — 12 р., на 6 мес. — 6 р. Отд. номер — 2 р.
6 номеров в год.

СВЕТОТЕХНИКА Орган Главэнергопрома, светотехнической секции ЭНИА и светотехнической секции ВЭЖ-РНТО
Рассчитан на инженеров, техников, студентов, квалифицированных рабочих и мастеров.
Подписная цена: на год — 6 р., на 6 мес. — 3 р. Отд. номер — 1 р.
6 номеров в год.

Подписку на журналы и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, в Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ — „Техпериодика“. Подписную плату переводите по почте или перечисляйте на расч. счет Гл. к-ры „Техпериодика“ ОНТИ № 3703 в Моск. обл. к-ре Госбанка. В заказе (подписке) указывайте дату перевода или номер и дату взыска банка. Подписка принимается также отделениями магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятия, всеми отделениями и магазинами Когиза, всеми почтовыми отделениями и письмомоспями. Вниманию подписчиков. Главной конторой „Техпериодика“ ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам. С жалобами на „неаккуратное получение журналов 1934 г.“ обращайтесь непосредственно в адрес конторы. Все журналы ОНТИ экспедируются по ярьдочной (адресной) системе. Подписка меньше, чем на 3 мес. не принимается.