

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



## СОДЕРЖАНИЕ

Ф. Д. Михеев и В. С. Могильников — К расчету электромагнита с короткозамкнутым витком при постоянном потокосцеплении	3
О. Б. Брон и Л. А. Гельбух — Движение высокочастотной электрической дуги в дугогасительной решетке	7
А. Л. Игрицкий — Исследование дуги постоянного тока в стальной дугогасительной решетке	12
В. С. Кравченко — Воспламеняющая способность электрического искрения	21
М. И. Гитман — Вопросы электроснабжения сельского хозяйства в зонах великих строек коммунизма	28
А. Г. Москалев — Частотные характеристики энергосистем	35
Б. А. Прыстай — Расчет предельных пролетов воздушных линий	40
Л. Б. Гейлер — Вопросы электрооборудования быстроходных лифтов постоянного тока	45
А. П. Куваева — Влияние активного сопротивления в цепи статора на характеристики асинхронной машины в генераторном режиме	53
А. М. Бреслер — Индукционное реле сопротивления	57
Д. Е. Трофименко — Метод вычисления допустимой продолжительности короткого замыкания в двухмашинной системе	61
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
Л. Л. Барвинский — Индукционный нагрев соленой рыбы	67
Ю. М. Галонен — Экспериментальное исследование соленоидов электропривода стрелок трамвая	70
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
Г. С. Матюхин — Рубиновые звезды Московского кремля. К 15-летию установки	73
<b>СТАНДАРТЫ И НОРМЫ</b>	
Б. Г. Лорткипанидзе — О правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами	76
<b>ДИСКУССИИ</b>	
Правила устройства электротехнических установок — В. И. Евсеев. К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“ — Г. Р. Рахимов, Д. Н. Шапиро, М. Ф. Широхов, В. Ю. Ломоносов	80
<b>ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА</b>	
К статье Г. Г. Марквардта и П. Н. Шляхто „О наиболее выгоднейшей характеристике тягового двигателя“. К статье И. Н. Крачковского „Оценка пропускной способности линий электропередачи на базе натуральной мощности“	84
<b>ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ</b>	
Передвижная электростанция мощностью 28 квт. Прибор для контроля состояния заземляющей и зануляющей проводок. Устройства энергоснабжения опытного участка однофазного тока 50 гц на французских железных дорогах. Проект линии электропередачи 300 кв	85
<b>ХРОНИКА</b>	
Совещание по энергетике и электрификации новых орошаемых районов. Конференция-семинар по новой технике на электрических железных дорогах. В доме инженера и техника им. Дзержинского	91
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
А. В. Орловский — Книга Ю. В. Буткевича, А. А. Васильева, А. А. Глазунова, И. Я. Гумина, С. А. Геликонского, М. В. Метлина „Электрическая часть станций и подстанций“	94
Б. Л. Рымарь, В. А. Кочан, В. А. Петроцкий и Б. В. Мочалов — Книга П. Н. Горюнова, С. М. Пигина и Н. Н. Шумиловского „Электрические счетчики“	95
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96
Номограмма для возведения числа в степень меньше единицы (на 3-й странице обложки)	

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

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

# К расчету электромагнита с короткозамкнутым витком при постоянном потокоцеплении

Кандидат техн. наук, доц. Ф. Д. МИХЕЕВ и инж. В. С. МОГИЛЬНИКОВ  
Ленинград

Наиболее распространенным способом устранения вибрации якоря электромагнитных аппаратов переменного тока является экранирование части полюса магнитной системы короткозамкнутым витком.

Теория и методы расчета электромагнита с короткозамкнутым витком довольно полно разрабатаны и освещены в отечественной литературе [1] только для случая заданной постоянной н. с. или электромагнита. На основе этой теории сделан ряд выводов, используемых в практике построения при выборе параметров короткозамкнутого витка и экранированной части полюса. Однако большинство электромагнитных аппаратов переменного тока работает не при постоянной н. с., а при постоянном потокоцеплении. В этом случае характер распределения магнитных потоков в обеих частях полюса, их сдвиг по фазе, зависимость средней и минимальной сил тяги от относительной величины экранированной части полюса и сопротивления короткозамкнутого витка будут существенно отличаться от случая постоянной н. с. При условии оптимума основных параметров будут также другими.

В работе дается метод расчета и определяются оптимальные параметры электромагнита с короткозамкнутым витком, работающего при постоянном потокоцеплении.

**Исходные положения.** Для вывода основных соотношений возьмем магнитную систему клапанного типа (рис. 1, а). Другие возможные системы (рис. 1, б, в, г) легко могут быть приведены к приведенной, если пренебречь магнитным сопротивлением полюсов по сравнению с магнитным сопротивлением воздушных зазоров. Например, для системы б) результирующая сила тяги в каждом рабочем зазоре будет равна силе тяги системы а) и т. д. Примем следующие обычные допущения:

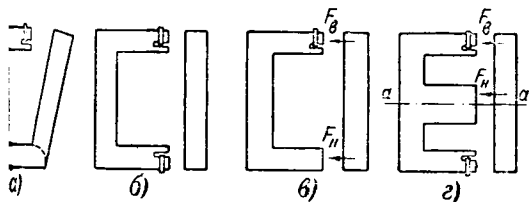


рис. 1. Магнитные системы с короткозамкнутым витком.

Дан метод расчета средней и минимальной сил тяги электромагнита с короткозамкнутым витком при постоянном потокоцеплении. Приведен анализ зависимостей этих сил от относительной величины экранированной витком площади полюса и величины сопротивления витка при конечных зазорах. Даны рекомендации по выбору наивыгоднейших значений этих величин.

1) магнитный поток синусоидален; 2) система не насыщена; 3) сопротивление стали пренебрегаем<sup>1</sup>; 4) сила тяги, создаваемая краевым потоком (поток «выпучивания»), пренебрежимо мала по сравнению с силой, создаваемой рабочим потоком без учета краевого потока<sup>2</sup>; 5) индуктивным сопротивлением рассеяния короткозамкнутого витка пренебрегаем; 6) потери в стали для упрощения не рассматриваем<sup>1</sup>.

Представим магнитную цепь системы с короткозамкнутым витком в виде эквивалентной схемы (рис. 2), в которой сечение полюса сердечника расщеплено на две части:  $S_1$  — сечение неэкранированной части и  $S_2$  — сечение экранированной короткозамкнутым витком части полюса.

Рабочий зазор  $\delta$  между якорем и сердечником для обеих частей полюса, как это делается у большинства аппаратов, принимаем одинаковым. Полный магнитный поток намагничивающей катушки можно представить в виде геометрической суммы трех потоков:

$$\Phi = \Phi_2 + (\Phi_1 + \Phi_s), \quad (1)$$

где  $\Phi_2$  — поток взаимной индукции, проходящей через сечение  $S_2$ , охватываемое короткозамкнутым витком;

$\Phi_1$  — поток через сечение  $S_1$ ;

$\Phi_s$  — поток рассеяния.

Потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  являются рабочими потоками, создающими силу притяжения якоря.

Поток рассеяния  $\Phi_s$  определяется в пространстве вокруг магнитной системы сложным образом.

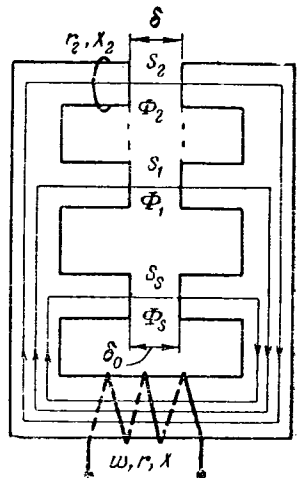


Рис. 2. Эквивалентная схема магнитной цепи.

<sup>1</sup> Магнитное сопротивление стали и потери в стали должны быть учтены при определении тока, потребляемого катушкой.

<sup>2</sup> Краевой поток может быть отнесен к потокам рассеяния (Л. 3, стр. 213).

Для упрощения расчета представим его равномерно распределенным по некоторому фиктивному сечению  $S_s$  в постоянном и равном начальном зазоре  $\delta_0$ .

Фиктивное сечение может быть найдено по формуле:

$$S_s = \frac{G_s}{\mu_0} \delta_0 = \frac{G_k + G_{ny}}{\mu_0} \delta_0,$$

где  $G_k$  — проводимость краевого потока;

$G_{ny}$  — приведенная проводимость утечки, вычисленная по числу потокоцеплений (см., например, [Л. 3], стр. 186);

$\delta_0$  — начальный рабочий зазор;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха.

Для принятой схемы замещения магнитной цепи при любом зазоре  $\delta$  коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{G_1 + G_2 + G_s}{G_1 + G_2} = 1 + \frac{S_s}{S_1 + S_2} \frac{\delta}{\delta_0},$$

где  $G_1 = \mu_0 \frac{S_1}{\delta}$  — проводимость рабочего потока  $\Phi_1$ ;

$G_2 = \mu_0 \frac{S_2}{\delta}$  — проводимость рабочего потока  $\Phi_2$ ;

Начальный коэффициент рассеяния при  $\delta = \delta_0$

$$\sigma_0 = 1 + \frac{S_s}{S_1 + S_2}.$$

Принятые выше допущения дают возможность определять силу тяги по формуле Максвелла:

$$F_t = - \frac{\Phi_t^2}{2\mu_0 (S_1 + S_2)}, \quad (2)$$

где  $\Phi_t = \Phi \sin \omega t$  — мгновенное значение потока.

В дальнейшем сечения, зазоры, потоки и силы рассматриваются в относительных единицах, причем за базисные единицы приняты: рабочее сечение  $S_1 + S_2$ ; начальный зазор  $\delta_0$ ; полный поток по уравнению:

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2} U}{\omega w}, \quad (3)$$

где  $U$  — напряжение сети;

$\omega$  — угловая частота;

$w$  — число витков катушки.

Для силы тяги за базисную единицу примем среднюю силу тяги (при отсутствии короткозамкнутого витка и  $\delta = 0$ ), определяемую по уравнению:

$$F_0 = \frac{\Phi_0^2}{4\mu_0 (S_1 + S_2)}. \quad (4)$$

В относительных единицах будем обозначать:

$$S_i = \frac{S_i}{S_1 + S_2}; \quad \frac{\delta}{\delta_0} = \delta; \quad \Phi_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_0}; \quad F_i = \frac{F_i}{F_0},$$

где  $i$  — любой индекс.

Тогда

$$\sigma_0 = 1 + S_s; \quad \sigma = 1 + S_s \delta = 1 + \delta (\sigma_0 - 1);$$

$$S_1 = 1 - S_2.$$

Индуктивное сопротивление катушки при начальном зазоре  $\delta_0$ :

$$X_0 = \omega w^2 (G_{10} + G_{20} + G_s), \quad (5)$$

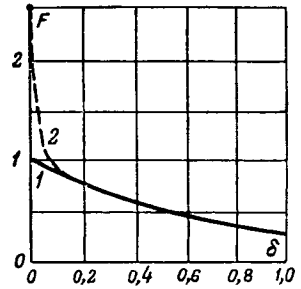


Рис. 3. Средняя сила тяги в зависимости от зазора  $\delta$  при отсутствии (1) и наличии (2) короткозамкнутого витка.

где  $G_{10} = \mu_0 \frac{S_1}{\delta_0}$ ;  $G_{20} = \mu_0 \frac{S_2}{\delta_0}$  — проводимости боковых потоков при  $\delta = \delta_0$ .

Полное индуктивное сопротивление катушки при любом зазоре  $\delta$  может быть выражено через  $X_0$  в виде:

$$X = X_0 \left[ \frac{S_1}{\sigma_0 \delta} + \frac{S_2}{\sigma_0 \delta} + \frac{S_s}{\sigma_0} \right] = X_1 + X_2 + X_3$$

Уравнения (1,6), (1,7), (1,8), (1,10), (1,11) и (1,12) приложения I позволяют определить среднюю и минимальную силу тяги для различных зазоров при любых соотношениях сечений полюсов  $S_1$  и  $S_2$  и при конструктивном параметре  $k$ .

Расчеты, произведенные по этим формулам (рис. 3), а также экспериментальные исследования аппаратов, показывают, что при относительных зазорах  $\delta \geq 0,1$  влияние короткозамкнутого витка практически ничтожно и им можно пренебречь. С другой стороны, при очень малых зазорах рассеяние пренебрежимо мало и воспользуемся этим для упрощения расчетных формул.

При относительно больших зазорах ( $\delta \geq 0,1$ ) полагаем, что короткозамкнутый виток отсутствует. Это соответствует  $k = \infty$ ; тогда

$$\Phi_1 = \frac{S_1}{\sigma}, \quad \Phi_2 = \frac{S_2}{\sigma}$$

и тяговая характеристика аппарата определяется простой формулой:

$$F_{cp} = \frac{1}{\sigma^2} = \frac{1}{[1 + \delta (\sigma_0 - 1)]^2}.$$

При малых зазорах ( $\delta \ll 0,03$ ), близких к начальному зазору  $\delta_k$ , полагаем  $\sigma = 1$ ; тогда

$$F_1 = \frac{(S_2^2 R)^2 + (R^2 + S_1 S_2^2)^2}{(R^2 + S_1^2 S_2^2)^2} S_1,$$

$$F_2 = \frac{R^4 + (S_1 S_2 R)^2}{(R^2 + S_1^2 S_2^2)^2} S_2,$$

$$\cos \psi = \frac{S_1 S_2 R (R^2 + S_1 S_2^2) - S_2^2 R^3}{\sqrt{(S_2^2 R)^2 + (R^2 + S_1 S_2^2)^2} \sqrt{R^4 + (S_1 S_2 R)^2}},$$

где  $R = k \delta_k$  — конструктивный параметр конечного положения.

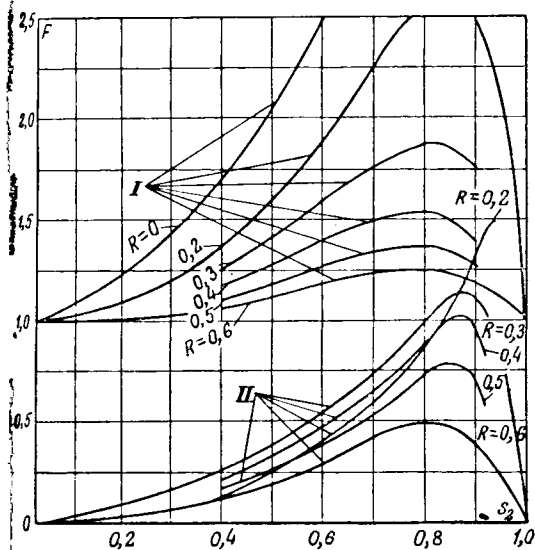


Рис. 4. Средняя (I) и минимальная (II) силы тяги в зависимости от относительного сечения \$S\_2\$ при различных значениях параметра \$R\$.

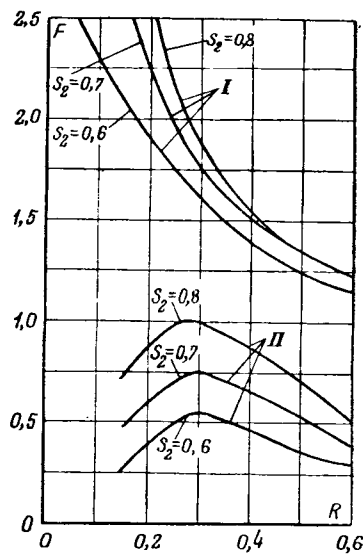


Рис. 5. Средняя (I) и минимальная (II) силы тяги в зависимости от параметра \$R\$ при различных значениях относительного сечения \$S\_2\$.

Формулы (8)... (10) совместно с формулами (9), (1,12) приложения I позволяют выразить \$F\_{cp}\$ и \$F\_{мин}\$ для любого зазора, близкого к конечному, в любых параметрах магнитной системы и короткозамкнутого витка, в функции только двух переменных \$S\_2\$ и \$R\$ (рис. 4 и 5).

Параметр

$$R = \frac{r_2}{\omega \mu_0 (S_1 + S_2)} \delta_k, \quad (11)$$

котором \$S\_1\$, \$S\_2\$ и \$\delta\_k\$ в правой части уравнения абсолютных единиц, дает связь между константой короткозамкнутого витка (\$r\_2\$) и магнитной системы (\$S\_1\$ и \$S\_2\$) при конечном зазоре \$\delta\_k\$. Зная \$R\$ и \$S\_2\$ и пользуясь кривыми рис. 4, можно, не производя расчетов, определить \$F\_{cp}\$ и \$F\_{мин}\$ для аппарата с магнитной системой по рис. 1 (приложение II).

**Оптимальные параметры.** Для магнитной системы с короткозамкнутым витком по условиям ранения вибраций якоря оптимальными являются те параметры, которые при конечном зазоре \$\delta\_k\$ дают наибольшее значение \$F\_{мин}\$.

Для электромагнита, работающего при постоянной н. с., Э. Яссе показал [Л. 4], что наиболее оптимальны следующие пределы отношений:

$$\frac{S_2}{S_1 + S_2} = \frac{1}{2} \dots \frac{2}{3}$$

$$\frac{r_2}{X_2} = \sqrt{\frac{2S_1}{2S_1 + S_2}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dots \frac{1}{2}}$$

Эти выводы, справедливые только для случая постоянной н. с., необоснованно используются в практике аппаратостроения при конструировании аппаратов, работающих при постоянном потокоплении.

Для нашего более сложного случая (\$\Phi = \text{const}\$) аналитическое определение оптимальных параметров не представляется возможным. Однако анализ зависимостей \$F\_{cp}\$ и \$F\_{мин}\$ в функции от \$S\_2\$ (рис. 4) и от \$R\$ (рис. 5) дает возможность установления пределов наиболее оптимальных значений этих параметров.

Рис. 4 показывает, что наиболее оптимальны при практически возможных \$R\$ значения \$S\_2\$, лежащие в пределах 0,85...0,95. Однако это в технологическом отношении трудно выполнимо. Все же нам представляется, что для большинства аппаратов сильного тока вполне возможно осуществить \$S\_2 = 0,7 \dots 0,85\$ вместо \$S\_2 = 0,5 \dots 0,66\$, как это практикуется в аппаратостроении.

Согласно рис. 5 можно найти, что оптимальные пределы параметра \$R\$ будут:

$$R_{opt} = 0,2 \dots 0,4. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что наимыгоднейшее сопротивление короткозамкнутого витка

$$r_2 = (0,2 - 0,4) \frac{\omega \mu_0 (S_1 + S_2)}{\delta_k}. \quad (13)$$

**Приложение I. Вывод основных уравнений.** Для эквивалентной схемы магнитной цепи рис. 2, аналогично трансформатору, справедливы уравнения:

$$\left. \begin{aligned} j \frac{\omega W}{\sqrt{2}} \Phi + Ir &= U, \\ j \frac{\omega W}{\sqrt{2}} \Phi_2 + I_2 r_2 &= 0, \\ \frac{\omega W}{\sqrt{2}} \Phi &= IX + I_2 X_2, \\ \frac{\omega W}{\sqrt{2}} \Phi_2 &= IX_1 + I_2 X_2, \end{aligned} \right\} \quad (I,1)$$

где индекс 2 указывает на цепь короткозамкнутого витка, первое уравнение написано для катушки.

Исключая из системы (7) токи  $I$  и  $I_2$  и переходя согласно (3) к относительным единицам, получим:

$$\Phi = \frac{Xr'_2 + j(XX_2 - X_2^2)}{(r + jX)(r'_2 + jX_2) + X_2^2}, \quad (1,2)$$

$$\Phi_2 = \frac{X_2 r'_2}{(r + jX)(r'_2 + jX_2) + X_2^2}. \quad (1,3)$$

Согласно (1)

$$(\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_s) = \dot{\Phi} - \dot{\Phi}_2, \quad (1,4)$$

а

$$\Phi_1 + \Phi_s = \Phi_1 \frac{S_1 + S_2 \delta}{S_1}. \quad (1,5)$$

Пренебрежем активным сопротивлением намагничивающей обмотки по сравнению с индуктивным и положим  $r = 0$ , затем подставим в (1,2) и (1,3) значения  $X$  и  $X_2$  из (6), после некоторых преобразований получим:

$$\Phi_1 = \frac{(S_2^2 k \delta)^2 + [\sigma k^2 \delta^2 + S_2^2 (\sigma - S_2)]^2}{(\sigma k \delta)^2 + S_2^2 (\sigma - S_2)^2} S_1, \quad (1,6)$$

$$\Phi_2 = \frac{[S_2 (\sigma - S_2) k \delta]^2 + (\sigma k^2 \delta^2)^2}{(\sigma k \delta)^2 + S_2^2 (\sigma - S_2)^2} S_2, \quad (1,7)$$

где  $k = \frac{r'_2}{X_0} \sigma_0$  — конструктивный параметр начального положения аппарата.

Угол сдвига между потоками:

$$\psi = \arccos \frac{-a_1 b_2 + b_1 a_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}, \quad (1,8)$$

где

$$a_1 = S_2^2 k \delta; \quad a_2 = S_2 (\sigma - S_2) k \delta;$$

$$b_1 = \sigma k^2 \delta^2 + S_2^2 (\sigma - S_2); \quad b_2 = \sigma k^2 \delta^2.$$

Силы тяги, создаваемые потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , согласно (2) и (4) будут:

$$F_{t1} = 2 \frac{\Phi_1^2}{S_1} \sin^2 \omega t,$$

$$F_{t2} = 2 \frac{\Phi_2^2}{S_2} \sin^2 (\omega t - \psi).$$

Суммарная сила тяги системы

$$F_t = F_{t1} + F_{t2} = \left( \frac{\Phi_1^2}{S_1} + \frac{\Phi_2^2}{S_2} \right) - \left[ \frac{\Phi_1^2}{S_1} \cos 2\omega t + \frac{\Phi_2^2}{S_2} \cos (2\omega t - 2\psi) \right]. \quad (1,9)$$

Постоянная составляющая правой части уравнения (1,9) дает среднее значение силы тяги

$$F_{cp} = \frac{\Phi_1^2}{S_1} + \frac{\Phi_2^2}{S_2} = F_1 + F_2, \quad (1,10)$$

где  $F_1, F_2$  — средние значения сил тяги в сечениях  $S_1$  и  $S_2$ .

Вторая составляющая силы

$$[F_1 \cos 2\omega t + F_2 \cos (2\omega t - 2\psi)]$$

изменяется во времени с двойной частотой.

Нетрудно показать, что амплитуда переменной составляющей

$$F_{пер} = \sqrt{F_1^2 + 2F_1 F_2 \cos 2\psi + F_2^2}.$$

Минимальное значение силы тяги

$$F_{мин} = F_{cp} - F_{пер}.$$

**Приложение II. Пример расчета.** Воспользуемся данными примера расчета магнитной системы клапанного [Л. 3, стр. 296].

$$\frac{S_2}{S_1 + S_2} = 0,65; \quad \delta_k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}; \quad r_2 = 6,15 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$S_1 + S_2 = 2,1 \text{ см}^2; \quad F_0 = 3,6 \text{ кг}.$$

Определяем параметр  $R$  по (11):

$$R = \frac{r_2}{\omega \mu_0 (S_1 + S_2)} \delta_k = \frac{6,15 \cdot 10^{-4}}{314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 2,1} 5 \cdot 10^{-4} = 0,37.$$

Из рис. 4 находим:

$$\frac{F_{cp}}{F_0} = 1,5; \quad \frac{F_{мин}}{F_0} = 0,58.$$

Полученные значения сил в абсолютных единицах полностью совпадают с результатами расчета по [Л. 3] (таблица).

Сила тяги, кг	$F_0$	$F_{cp}$	$F_{мин}$
Метод расчета			
По графику рис. 4 . . . . .	3,6	5,4	2,1
По [Л. 3] . . . . .	3,6	5,35	2,15

Если выбрать  $R = 0,3$  и  $\frac{S_2}{S_1 + S_2} = 0,8$ , то получим  $F_{cp} = 1,88 \cdot 3,6 = 6,7 \text{ кг}$  и  $F_{мин} = 1 \cdot 3,6 = 3,6 \text{ кг}$ , что значит улучшает работу аппарата при конечном зазоре без изменения его тяговой характеристики при рабочих зазорах.

**Литература**

1. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
2. И. М. Витенберг. Расчет телефонных и кодовых реле. Госэнергоиздат, 1947.
3. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электрических магнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.
4. Э. Яссее. Электромагниты. Энергоиздат, 1934.



# Движение высокочастотной электрической дуги в дугогасительной решетке

Доктор техн. наук, проф. О. Б. БРОН и кандидат техн. наук Л. А. ГЕЛЬБУХ

Ленинград

**Задачи работы.** Развитие индукционного нагрева сталей привело к возникновению мощных высокочастотных установок. Для управления ими появились автоматически действующие выключающие аппараты (контакты), способные работать в установках с частотой до 10 000 гц при напряжениях от 500 до 1500 в и токах от 100 до 1500 а. Кроме того, от этих аппаратов требуется относительно большая частота работы — 200 включений и отключений в час. Нормальные аппараты, применяемые в цепях с частотой 50 гц, оказываются непригодными для этих целей. Необходимо разработать новые конструкции. Наиболее заманчивым для этих аппаратов казалось применение дугогасительной решетки. Идеальными условиями для дугогасительной решетки являются такие условия, при которых дуга гаснет на первом же прохождении тока через нуль. Как известно, энергия, выделяющаяся в дуге за полпериода,

$$W_{\partial} = \frac{1}{\pi f} I U_{\partial}, \quad (1)$$

$f$  — частота;

$I$  — ток;

$U_{\partial}$  — напряжение на дуге.

Это есть минимальное количество энергии, выделяющееся в дуге при заданных условиях. Именно поэтому гашение дуги при первом же прохождении тока через нуль является наиболее выгодным.

Из соотношения (1) следует, что энергия  $W_{\partial}$  прямо пропорциональна частоте. Значит, если удастся погасить высокочастотную дугу при первом же прохождении тока через нуль, то энергия, выделяющаяся, будет меньше, чем в дуге промышленной частоты. Так, при частоте 10 000 гц она в 200 раз меньше, чем при частоте 50 гц. При таких условиях гашение высокочастотной дуги протекает легче, чем гашение дуги технической частоты.

Известно, что электрическая прочность дугогасительной решетки после прохождения тока через нуль возрастает скачком, почти мгновенно, достигая меньшего 0,1 мксек, достигая некоторого

Рассматриваются электродинамические силы, действующие на электрическую дугу высокой частоты в дугогасительной решетке и при входе дуги в решетку. Показано, что явления, возникающие при гашении высокочастотной дуги решеткой, существенно отличаются от процессов при гашении дуг постоянного тока или промышленной частоты, что предъявляет новые требования к конструкции коммутационной аппаратуры для токов высокой частоты.

значения  $U_k$  (около 160 в эффективного значения для латунных электродов), а потом уже нарастает более медленно. Значит, для гашения дуги при первом же прохождении тока через нуль нужно выбрать такое количество  $n$  последовательно

включенных разрывов цепи, чтобы  $nU_k$  было больше приложенного к дуговому промежутку напряжения  $U$ . Именно на этом явлении основано действие дугогасительной решетки. Значит, решетка могла бы быть весьма совершенным способом гашения высокочастотной дуги. Необходимо только загнать высокочастотную дугу в решетку. Именно эта задача представляет наибольшие трудности и для ее правильного решения необходимо рассмотреть вопрос о движении дуги высокой частоты в дугогасительной решетке.

Для выяснения отличительных сторон явлений, связанных с движением высокочастотной дуги, обратимся к рис. 1, поз. I, где показано магнитное поле дуги постоянного тока, находящейся под пластинами стальной дугогасительной решетки. Под действием сил  $K$  эта дуга втягивается в решетку. Далее (позиция II) показано магнитное поле высокочастотной дуги, находящейся под той же решеткой. Наличие вихревых токов в пластинах коренным образом меняет конфигурацию поля. Силы  $K$  теперь не втягивают дугу в решетку, а, наоборот, препятствуют ее вхождению туда. Это обстоятельство не было учтено в некоторых конструкциях и привело к авариям. В нашу задачу входит рассмотрение вопроса о том, как велики силы  $K$ , при каких условиях они положительны и способствуют вхождению дуги в решетку, когда

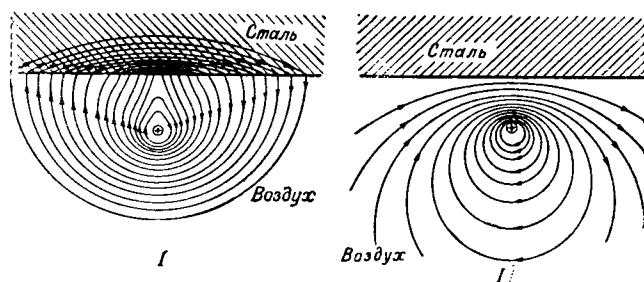


Рис. 1. Магнитное поле дуги, находящейся под пластинками стальной дугогасительной решетки. I — при постоянном и переменном токах низкой частоты; II — при переменном токе высокой частоты.



обращаются в нуль, при каких частотах становятся отрицательными, а также рассмотрение особенностей движения высокочастотной дуги, когда она уже вошла в решетку.

**Основные соотношения.** Пусть (рис. 2) плоскость  $XOY$  представляет собою границу раздела двух полубесконечных сред. Среда  $I$  обладает магнитной проницаемостью  $\mu_1$ , электропроводностью  $\sigma_1$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ , а среда  $II$  соответственно  $\mu_2$ ,  $\sigma_2$  и  $\epsilon_2$ . Пусть дуга с током высокой частоты  $I$  находится в среде  $I$  на расстоянии  $a$  от поверхности раздела. Она лежит в плоскости  $ZOY$  и параллельна оси  $OY$ . Возникающее в этих условиях электромагнитное поле в полупространстве  $I$  состоит из падающей волны и волны, отраженной от границы раздела сред. В полупространстве  $II$  распространяется преломленная волна.

Задача дальнейшего расчета заключается в нахождении напряженности  $H_x^0$  магнитного поля отраженной волны, которая обуславливает появление силы  $K$ , действующей на дугу.

Векторный потенциал электромагнитного поля прямолинейного тока, направленного параллельно оси  $Y$ , будет иметь лишь одну составляющую  $A_y$ , которая в случае проводника, помещенного в однородную среду  $I$ , выражается так [Л. 1]:

$$A_{1y}^0 = 0,2\mu_1 IK_0(k_1, r), \quad (2)$$

где  $r = \sqrt{(a-z)^2 + y^2}$ ;  $K_0$  — функция Макдональда нулевого порядка.

Функция  $K_0$  получается в результате решения уравнения Бесселя при мнимом аргументе вида:

$$\frac{d^2 A_y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_y}{dr} - k_1^2 A_y = 0. \quad (3)$$

Постоянная  $k_1$  зависит от свойств среды и частоты тока  $\omega$ , протекающего по проводнику:

$$k_1^2 = (i4\pi\sigma_1 - \omega\epsilon_1)\mu_1. \quad (4)$$

Выражение (2) представляет векторный потенциал падающей волны.

Наличие среды  $II$ , граничащей со средой  $I$  и характеризующейся постоянной  $k_2 = (i4\pi\sigma_2 - \omega\epsilon_2)\mu_2$ , обуславливает появление отраженной и преломленной волн. Векторные потенциалы этих волн  $A_1^0$  и  $A_2$  удовлетворяют волновым уравнениям:

$$\frac{\partial^2 A_{1y}^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1y}^0}{\partial z^2} = k_1^2 A_{1y}^0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{2y}}{\partial z^2} = k_2^2 A_{2y}.$$

Решение уравнений вида (5) будем искать методом частных решений, положив:

$$A_y^\lambda = F(x) \cdot \Phi(z). \quad (6)$$

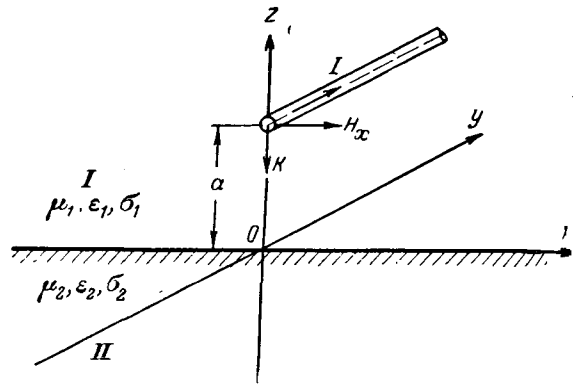


Рис. 2. К расчету сил, действующих на высокочастотную дугу у границы раздела двух сред.

Подставив это выражение в (5) и раздел обе части на  $F(x) \cdot \Phi(z)$ , получим:

$$\frac{1}{F(x)} \cdot \frac{d^2 F(x)}{dx^2} + \frac{1}{\Phi(z)} \cdot \frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} = k^2.$$

Согласно (7) сумма двух функций от  $x$  и  $z$  равна постоянному числу; следовательно, каждая из них должна быть также постоянной. Положим:

$$\frac{1}{F(x)} \cdot \frac{d^2 F(x)}{dx^2} = -\lambda^2; \quad (8)$$

тогда

$$\frac{1}{\Phi(z)} \cdot \frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} = \lambda^2 + k^2 = \eta^2. \quad (9)$$

Решение уравнений (8) и (9) имеет вид:

$$F(x) = D(\lambda) \cos(\lambda x) + E(\lambda) \sin(\lambda x), \quad (10)$$

$$\Phi(z) = N(\lambda) e^{\eta z} + M(\lambda) e^{-\eta z}, \quad (11)$$

где величины  $D$ ,  $E$ ,  $N$  и  $M$  зависят от  $\lambda$ .

В силу симметрии поля относительно плоскости  $X=0$  векторный потенциал является четной функцией координаты  $x$ , и в (10) следует положить  $E(\lambda) = 0$ .

Умножая в соответствии с (6) уравнение (10) на (11) и обозначая  $D(\lambda) \cdot N(\lambda) = C_1(\lambda)$ ;  $D(\lambda) M(\lambda) = C_2(\lambda)$ , получим следующее частное решение для векторного потенциала:

$$A_y^\lambda = [C_2'(\lambda) e^{\eta z} + C_1'(\lambda) e^{-\eta z}] \cos(\lambda x).$$

Общее решение складывается из сумм частных решений, и так как параметр  $\lambda$  может принимать любые значения, оно выразится в виде интеграла:

$$A_y = \int_0^\infty [C_2'(\lambda) e^{\eta z} + C_1'(\lambda) e^{-\eta z}] \cos(\lambda x) dx. \quad (12)$$

Заметим, что если мы условимся для вещественной части комплексной величины

$$\eta = \sqrt{k^2 + \lambda^2} \quad (13)$$

брать положительное значение корня, то, для того чтобы интеграл (12) был сходящимся, необходимо

Для среды I (где  $z$  принимает значение от  $0$  до  $+\infty$ )  $C_2'(\lambda) = 0$  и для среды II (где  $z$  изменяется от  $0$  до  $-\infty$ )  $C_1'(\lambda) = 0$ .

В силу этого мы будем иметь для среды I следующее выражение для векторного потенциала отраженной волны:

$$A_{y_1}^0 = \int_0^\infty C_1'(\lambda) e^{-\eta_1 z} \cos(\lambda x) d\lambda, \quad (14)$$

$$\eta_1 = \sqrt{k_1^2 + \lambda^2}. \quad (15)$$

Результирующее электромагнитное поле в среде можно получить сложением векторных потенциалов падающей и отраженной волн:

$$A_{y_1} = A_{y_1}^n + A_{y_1}^0 = 0, 2I\mu_1 K_0(k_1 r) + \int_0^\infty C_1'(\lambda) e^{-\eta_1 z} \cos \lambda x d\lambda. \quad (16)$$

Функция  $K_0(k_1 r)$  может быть представлена в виде интеграла

$$K_0(k_1 r) = \int_0^\infty e^{-|a-z|\eta_1} \cdot \frac{\cos(\lambda x) d\lambda}{\eta_1}.$$

Подставляя это значение в (16), получим:

$$0, 2I\mu_1 \int_0^\infty \left[ \frac{e^{-|a-z|\eta_1}}{\eta_1} + C_1(\lambda) e^{-z\eta_1} \right] \cos(\lambda x) d\lambda, \quad (17)$$

$$C_1(\lambda) = \frac{C_1'(\lambda)}{0, 2I\mu_1}. \quad (18)$$

Векторный потенциал для среды II выразится следующим образом:

$$A_{y_2} = 0, 2I\mu_1 \int_0^\infty C_2(\lambda) e^{z\eta_2} \cos(\lambda x) d\lambda, \quad (19)$$

$$C_2(\lambda) = \frac{C_2'(\lambda)}{0, 2I\mu_1},$$

$$\eta_2 = \sqrt{k_2^2 + \lambda^2}. \quad (20)$$

Для нахождения функций  $C_1(\lambda)$  и  $C_2(\lambda)$  необходимо применить граничные условия, которые должны выполняться на плоскости  $z = 0$ , разделяющей среды I и II.

В качестве этих условий можно принять непрерывность нормальной составляющей индукции и тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля при переходе через границу. Учитывая в виду, что  $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$  и что векторный потенциал  $\mathbf{A}$  имеет лишь составляющую  $A_y$ , можно записать:

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x}, \quad H_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_y}{\partial z}. \quad (21)$$

Применяя условия (21) к выражениям (17) и (19), при  $z = 0$  будем иметь:

$$\mu_1 \int_0^\infty \left[ \frac{e^{-a\eta_1}}{\eta_1} + C_1(\lambda) \right] \lambda \sin(\lambda x) d\lambda = \mu_2 \int_0^\infty C_2(\lambda) \sin(\lambda x) d\lambda,$$

$$\int_0^\infty [e^{-a\eta_1} - \eta_1 C_1(\lambda)] \cos(\lambda x) d\lambda = \int_0^\infty \eta_2 C_2(\lambda) \cos(\lambda x) d\lambda.$$

Для равенства этих интегралов необходимо равенство подинтегральных выражений, а потому получаем для определения функций  $C_1(\lambda)$  и  $C_2(\lambda)$  следующие два уравнения:

$$\mu_1 C_1(\lambda) - \mu_2 C_2(\lambda) = -\frac{\mu_1}{\eta_1} e^{-a\eta_1},$$

$$\eta_1 C_1(\lambda) - \eta_2 C_2(\lambda) = e^{-a\eta_1}.$$

Из этих уравнений имеем:

$$C_1(\lambda) = \frac{\mu_2 \eta_1 - \mu_1 \eta_2}{\eta_1 (\mu_2 \eta_1 + \mu_1 \eta_2)} e^{-a\eta_1},$$

$$C_2(\lambda) = \frac{2\mu_1}{\mu_2 \eta_1 + \mu_1 \eta_2} e^{-a\eta_1}. \quad (22)$$

Подстановка выражений для  $C_1(\lambda)$  и  $C_2(\lambda)$  в (17) и (19) определяет векторный потенциал в средах I и II. Как уже упоминалось, для вычисления усилий, действующих на дугу, нас будет интересовать поле отраженной волны в среде I.

Принимая во внимание (14), (18) и (22), для векторного потенциала этого поля будем иметь:

$$A_{y_1}^0 = 0, 2I\mu_1 \int_0^\infty \frac{\mu_2 \eta_1 - \mu_1 \eta_2}{\eta_1 (\mu_2 \eta_1 + \mu_1 \eta_2)} e^{-(z+a)\eta_1} \cos(\lambda x) d\lambda. \quad (23)$$

Поперечная составляющая напряженности магнитного поля отраженной волны в точке, через которую проходит ось дуги ( $x = 0, z = 0$ ):

$$H_x^0 = -\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_{y_1}^0}{\partial z} = 0, 2I \int_0^\infty \frac{\mu_2 \eta_1 - \mu_1 \eta_2}{\mu_2 \eta_1 + \mu_1 \eta_2} e^{-2\eta_1 a} d\lambda, \quad (24)$$

Напомним, что величины  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , входящие в (24), являются функциями параметра  $\lambda$ .

Зная напряженность  $H_x$ , можно вычислить силу, действующую на 1 см длины дуги, как

$$K = 1, 02I(H_x)_d 10^{-7} \left[ \frac{\kappa z}{\text{с.м.}} \right], \quad (25)$$

где под  $(H_x)_d$  подразумевается действительная часть (24).

Ниже будут рассмотрены два случая: 1) среда I — воздух, среда II — металл, что соответствует положению дуги до вхождения ее в решетку; 2) среда

$I$ —металл, среда  $II$ —воздух, что соответствует дуге, находящейся в решетке.

**Вхождение в решетку.** Остановимся на первом случае. Для воздуха  $\mu = 1, k_1 = 0$ , что следует из (4). Если проводимость воздуха  $\sigma = 0$  и принять во внимание, что рассматриваются сравнительно невысокие частоты (до 10 000 гц), то можно пренебречь токами смещения. Тогда вследствие (15)  $\eta_1 = \lambda_1$ .

В металле токи проводимости в значительной мере преобладают над токами смещения, а потому можно положить:

$$k_2^2 = i4\pi\sigma\omega\mu;$$

тогда  $\eta_2 = \sqrt{i4\pi\sigma\omega\mu + \lambda^2}$ . Магнитную проницаемость металла примем равной  $\mu$ . Подставляя приведенные значения коэффициента  $\eta$  и  $\mu$  в (24), будем иметь:

$$H_x^0 = 0,2I \int_0^\infty \frac{\mu\lambda - \sqrt{i4\pi\sigma\omega\mu + \lambda^2}}{\mu\lambda + \sqrt{i4\pi\sigma\omega\mu + \lambda^2}} e^{-2\lambda a} d\lambda. \quad (26)$$

Интеграл, входящий в (26), не выражается в элементарных функциях. Мы рассмотрим прежде всего два предельных случая:

а)  $\omega = 0$ , б)  $\omega = \infty$ .

Для случая а) можно написать

$$H_x^0 = 0,2I \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \int_0^\infty e^{-2\lambda a} d\lambda = \frac{0,2I}{2a} \frac{\mu - 1}{\mu + 1}. \quad (27)$$

Это соответствует полю зеркального изображения тока, появляющегося в области, занятой сталью, при прохождении у ее границы постоянного тока.

Для случая б) напряженность

$$H_x^0 = 0,2I \int_0^\infty e^{-2\lambda a} d\lambda = -\frac{0,2I}{2i}, \quad (28)$$

что соответствует зеркальному изображению противоположного знака.

Таким образом силы, действующие на дугу, в обоих предельных случаях противоположны по знаку, а величины их в соответствии с (25) будут:

$$K_1 = 1,02 \frac{I^2}{a} \frac{\mu - 1}{\mu + 1} 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right], \quad (29)$$

$$K_2 = -1,02 \frac{I^2}{a} 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right].$$

В первую из этих формул могут быть введены коэффициенты заполнения решетки и коэффициент, учитывающий краевые потоки.

Для исследования общего случая найдем действительную часть подинтегрального выражения в (26).

Обозначим

$$4\pi\sigma\omega\mu = u^2; \quad (30)$$

тогда

$$\sqrt{i u^2 + \lambda^2} = \alpha + i\beta,$$

где

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4}};$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4}}$$

и

$$\frac{\mu\lambda - \sqrt{i u^2 + \lambda^2}}{\mu\lambda + \sqrt{i u^2 + \lambda^2}} = \frac{\mu\lambda - \alpha - i\beta}{\mu\lambda + \alpha + i\beta} = \frac{\mu^2\lambda^2 - \alpha^2 - \beta^2 - i2\mu\lambda\beta}{(\mu\lambda + \alpha)^2 + \beta^2} = \frac{\mu^2\lambda^2 - \sqrt{\lambda^4 + u^4} - i2\mu\lambda\beta}{\mu^2\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4} + 2\mu\lambda\alpha}.$$

Вещественная часть этого выражения будет:

$$\frac{\mu^2\lambda^2 - \sqrt{\lambda^4 + u^4}}{\mu^2\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4} + 2\mu\lambda\alpha}.$$

Подставляя ее в (26), будем иметь:

$$(H_x^0)_\partial = 0,2I \int_0^\infty \frac{\mu^2\lambda^2 - \sqrt{\lambda^4 + u^4}}{\mu^2\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4} + 2\mu\lambda\alpha} e^{-2\lambda a} d\lambda.$$

Этот интеграл может быть вычислен методами численного или графического интегрирования.

Приведем пример вычисления зависимости усредненного действующего на дугу, находящуюся в воздухе под стальной решеткой, от частоты переменного тока. В этом случае принято: ток в дуге  $I = 1000$  а; расстояние центра дуги до края решетки  $a = 0,2$  см; магнитная проницаемость стали (принимая во внимание насыщение благодаря близости дуги)  $\mu = 10$ ; электрическая проводимость стали

$$\sigma = 6,86 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{ом см}} = 6,86 \cdot 10^{-5} \text{ CGSM}.$$

Вычисления производились путем численного интегрирования выражения (31), которое затем подставлялось в (27). Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Таблица

$f, \text{ гц}$	0	50	100	200	500	1000	5000	10000
$u = \sqrt{4\pi\sigma\omega\mu}$	0	1,64	2,32	3,28	5,2	7,35	16,4	23,7
$(H_x^0)_\partial, \text{ э}$	4,0	348	311	266	218	141	-29,7	-10,7
$K \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кг}}{\text{см}}$	4,18	3,6	3,17	2,74	2,23	1,49	-0,302	-1,1

На рис. 3 приведена кривая 1, изображающая зависимость усилия  $K$  от частоты для стальной решетки. На том же рисунке приведена для сравнения кривая 2, вычисленная для латунной решетки. Вычисления производились как и в предыдущем случае, путем численного интегрирования (31), причем принято:

$$\mu = 1; \sigma = 57,2 \cdot 10^{-5} \text{ CGSM},$$

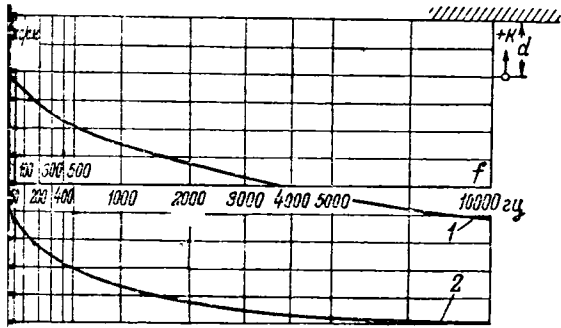
остальные данные остались неизменными. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Обе кривые нанесены в полуквадратичном масштабе. Как видно из рисунка, для стальной решетки сила  $K$  с частоты 3600 гц остается положительной (сила втягивает дугу в решетку), при больших частотах она становится отталкивающей, однако вплоть до частоты 10 000 гц остается значительно меньшей, чем отталкивающая сила при латунной решетке.

Как уже указывалось, кривые рис. 3 рассчитаны для тока 1000 а. При других токах, близких к 1000 а, таких, что магнитную проницаемость стали можно считать

Таблица 2

$f, \text{гц}$	0	50	100	200	500	1 000	5 000	10 000
$u = \sqrt{4\pi\sigma\omega\mu}$	0	1,5	2,12	3	4,75	6,7	15	21,2
$(H_x^0)_\theta, \text{э}$	0	-136	-178	-228	-303	-359	-465	-478
$K \cdot 10^{-2}, \frac{\text{кг}}{\text{см}}$	0	-1,38	-1,81	-2,32	-3,08	-3,66	-4,74	-5



Сила, действующая на дугу при вхождении в сталь-решетку ( $\mu = 10$ , кривая 1) и латунную решетку (2) в зависимости от частоты.  $a = 0,2 \text{ см}$ ; ток  $I = 1 000 \text{ а}$ .

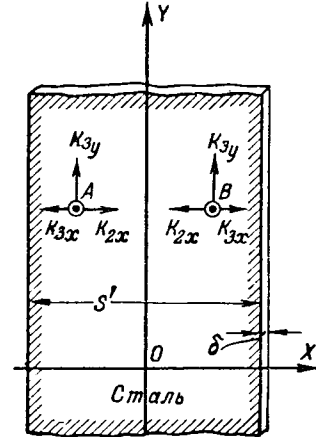


Рис. 4. Схема сил, действующих на дугу, находящуюся в точках А и В. Прямоугольная пластинка.

решеткой, характер кривых останется тем же, но их масштабы уменьшатся или увеличатся пропорционально квадрату тока.

**Дуга в решетке.** Перейдем теперь к рассмотрению случая, когда дуга находится в решетке. В этом на рис. 2 следует принять, что среда I является металлом, а среда II — воздухом. Для определения составляющей напряженности  $H_x^0$  магнитного поля в металле достаточно подставить вместо  $\mu_1$  и  $\eta_1$  величины  $\mu_2$  и  $\eta_2$  и вместо  $\mu_2, \eta_2$  подставить  $\mu_1, \eta_1$ , вычисленные для предыдущего случая (дуга в воздухе).

Проделав это, будем иметь:

$$= 0,2I \int_0^\infty \frac{\sqrt{4\pi\sigma\mu + \lambda^2} - \mu\lambda}{\sqrt{4\pi\sigma\mu + \lambda^2 + \mu\lambda}} e^{-2\sqrt{4\pi\sigma\omega\mu + \lambda^2}a} d\lambda. \quad (32)$$

Исследуем, как и ранее, два предельных случая:

- а)  $\omega = 0$  и б)  $\omega = \infty$ .

В случае а) интегрирование дает:

$$H_x^0 = -\frac{0,2I}{2a} \frac{\mu - 1}{\mu + 1}, \quad (33)$$

что соответствует изображению противоположного и отталкивающей силе K:

$$K = -1,02 \frac{I^2}{a} 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right].$$

Для случая б) модуль подинтегрального выражения равен нулю, что объясняется полным поглощением энергии электромагнитного поля в окружающей среде.

В общем случае действительная часть выражения (32) представляется в виде:

$$(H_x^0)_\theta = 0,2I \int_0^\infty \frac{[(\mu^2\lambda^2 - \sqrt{\lambda^4 + u^4}) \cos 2\alpha\beta - 2\mu\lambda\beta \sin 2\alpha\beta]}{\mu^2\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4} + 2\mu\lambda\alpha} e^{-2\alpha\lambda} d\lambda, \quad (34)$$

где попрежнему

$$\alpha = \sqrt{\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4}}; \quad \beta = \sqrt{-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + u^4}}.$$

Вычисление интеграла (34) может быть произведено лишь методами численного интегрирования.

Пользуясь полученными результатами, рассмотрим движение дуги между пластинами стальной решетки. Пусть опорная точка дуги находится в точке А или В (рис. 4). В таком случае, как известно [Л. 2, 3], при постоянном токе на дугу действуют силы  $K_2$  и  $K_3$ .

Их величина определяется соотношениями:

$$K_{2x} = -1,02 \frac{\pi}{s} I^2 \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{s} x \right) 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right], \quad K_{2y} = 0, \quad (35)$$

$$K_{3x} = 1,02 U(\delta) \frac{\pi}{s} I^2 \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{s} x \right) 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right], \quad (36)$$

$$K_{3y} = 2,04 \frac{1}{s} I^2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left( \frac{s}{2\delta} \right) 10^{-8} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{см}} \right].$$

Здесь  $U(\delta)$  есть некоторая функция  $< 1$ , а  $\delta$  — толщина пластин решетки.

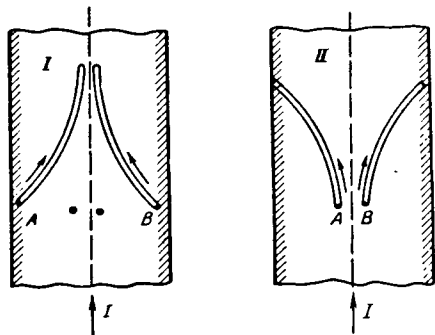


Рис. 5. Движение дуги по стальным пластинам.  $A$  и  $B$ —точки возникновения дуги.  
I—при низкой частоте, II—при высокой.

Силы, возникающие в результате действия электромагнитного поля  $K_{0x}$  и  $K_{0y}$ , стремятся переместить дугу от края пластины к ее оси симметрии. Они совпадают по направлению с силами  $K_{2x}$  и  $K_{2y}$  и равны этим силам при постоянном токе. С повышением частоты эти силы уменьшаются. Помимо этих на дугу действуют силы  $K_{3x}$  и  $K_{3y}$ , которые для тонких пластин можно считать не зависящими от частоты. Эти силы создаются токами в самих пластинах. Сила  $K_{3y}$  стремится переместить дугу вверх (если ток подведен снизу) и складывается с силой  $K_{0y}$ . Силы  $K_{0x}$  и  $K_{3x}$  действуют в противоположные стороны.

При низкой частоте и при постоянном токе силы  $K_{0x}$  преобладают над силами  $K_{3x}$  и дуга в стальной решетке перемещается от краев пластин к их оси симметрии (рис. 5, поз. I). При

высокой частоте силы  $K_{0x}$  становятся меньше сил  $K_{3x}$  и дуга стремится переместиться от симметрии пластин к их краям, как это показано на рис. 5, поз. II.

**Выводы.** Движение дуги в стальной решетке при высокой частоте сильно отличается от того, что имеет место при низкой частоте. При низкой частоте дуга втягивается в решетку. При высокой частоте, наоборот, возникают силы, препятствующие вхождению дуги в решетку. Поэтому требуется воздействие внешних сил (воздушное магнитное дутье), чтобы загнать высокочастотную дугу в решетку.

При низкой частоте дуга, вошедшая в стальную решетку, стремится переместиться от краев пластин к их центру. Решетка втягивает в себя дугу и препятствует ее выходу. При высокой частоте, наоборот, возникают силы, стремящиеся переместить дугу к краю пластин и вытолкнуть ее из решетки. Эта разница в поведении дуги вызывает и различный подход к конструкции дугогасительной решетки для низких и высоких частот.

#### Литература

1. В. Р. Бурсиан. Теория электромагнитных волн, применяемых в электроразведке. Ч. II (вып. 1). ЛГУ, стр. 1936.
2. О. Б. Брон. Движение электрической дуги в магнитном поле. Госэнергоиздат, 1944.
3. Н. А. Бабаков. Движение электрической дуги в узких щелях. Госэнергоиздат, 1948.

18.12

## Исследование дуги постоянного тока в стальной дугогасительной решетке

Кандидат техн. наук А. Л. ИГРИЦКИЙ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

В настоящее время не разработаны методы для расчета гашения дуги постоянного тока в выключателях и существующие конструкции дугогасящих устройств строились главным образом на основе конструктивных соображений в расчете на дальнейшую опытную проверку. Процессы, происходящие при горении и гашении дуги постоянного тока в различных типах дугогасящих устройств, весьма сложны и многообразны и их успешное изучение может производиться лишь на основе широко поставленных экспериментальных исследований.

Настоящая работа имела целью получить ряд экспериментальных материалов по горению и гашению дуги постоянного тока в широко приме-

Излагаются результаты экспериментального исследования дуги постоянного тока в стальной дугогасительной решетке, произведенного при токах от 1000 до 37000 а. Делается попытка приближенного расчета гашения дуги постоянного тока в решетке, что позволяет оценить отключающую способность выключателя. Дается пример расчета гашения дуги.

няемой конструкции дугогасящего устройства в стальной дугогасительной решетке. Учитывая важность создания методов расчета дугогасящих устройств, на основа-

проведенных экспериментальных исследований была сделана попытка приближенного расчета гашения дуги в стальной дугогасительной решетке.

Экспериментальное исследование имело целью 1. Определить характер изменения напряжения на выключателе и тока в цепи во время процесса отключения. Определить влияние величины напряжения, тока и индуктивности цепи на характер процесса отключения, в частности, во время отключения, высоту поднятия дуги в

е, число промежутков между пластинами, в которое заходит дуга в процессе отключения, величину перенапряжения, сопровождающего отключение цепи.

Определить характер движения дуги полного тока в стальной дугогасительной решетке и скорости ее перемещения в отдельных промежутках между пластинами.

Определить очередность и время вхождения в промежутки между пластинами и характер изменения напряжения на отдельных промежутках в процессе отключения.

Изследование дуги постоянного тока в стальной дугогасительной решетке производилось так: О. Б. Броном [Л. 1, 2] и доц. Н. А. Бамы [Л. 3, 4], однако перечисленные выше опыты или вовсе не исследовались, или же рассмотрены этими авторами недостаточно подробно.

Инструкция дугогасительной решетки, изданная при испытаниях, показана на рис. 1. Прямоугольные стальные пластины закрепляются в асбест-цементовых стенках. В опытах одна из асбест-цементовых стенок заменена стеклом для возможности зафирования дуги. Дугогасительные контакты автомата располагаются под пластинами решетки. Электрическая дуга, возникающая при разрыве контактов, затягивается в решетку действием сил, обусловленных взаимодействием тока в дуге со стальными массами пластин. Экспериментальное исследование было произведено в аппаратной лаборатории завода «Электрон» им. С. М. Кирова. Испытания производились в режиме выбега генератора постоянного тока при напряжении 260 в и токах от 1 000 до 37 000 а. Несколько опытов также было поставлено при напряжении 440 в. Испытуемая решетка вливалась на одном из полюсов автомата. Движение дуги в решетке фотографировалось обычным фотоаппаратом типа «фотоков», времени проф. О. Б. Брона и устройством дающей барабанной кассетой. В устройстве вращающейся барабанной кассетой, перемещающейся вертикально в промежутке между пластинами решетки дуга фотографировалась на фотопленку, закрепленную на барабане. Барабан вращался с большой скоростью вертикальной оси. Таким образом, на фотопленке непосредственно получалась кривая изменения дуги во времени.

Порядок и время вхождения дуги в промежутки между пластинами определялись при испытаниях на решетках, снабженных пластинами, на которые включались шлейфы выходного осциллографа.

Результаты испытаний. 1. Рассмотрение осциллограмм показало, что характер процесса отключения в сильной степени зависит от индуктивности цепи. При малой индуктивности ( $L = 10^{-3}$  гн) процесс происходит сравнительно быстро. Время гашения дуги невелико и меняется при отключении токов 7 000 ... 37 000 а соответственно в пределах от 6,5 до  $19 \cdot 10^{-3}$  сек. С ро-

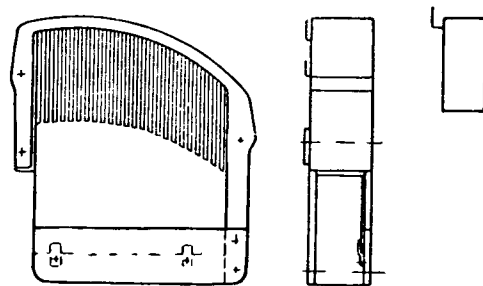


Рис. 1. Стальная дугогасительная решетка с передней стеклянной стенкой.

стом отключаемого тока время гашения дуги нарастает примерно по линейному закону. Осмотр в процессе испытаний показал, что при отключении токов до 25 000 а в решетке не наблюдается существенных дефектов. При отключении тока 37 000 а наблюдается оплавление нижних краев пластин, которое, очевидно, вызывается увеличением энергии, выделяемой в дуге за счет большего тока и большего времени гашения дуги. Однако оплавление не препятствовало дальнейшей нормальной работе дугогасительной камеры. Процесс отключения сопровождается перенапряжениями. Величина максимального напряжения на контактах автомата в процессе отключения равна  $1,3 \dots 1,6 U_n$ .

При значительной индуктивности цепи ( $L > 10^{-3}$  гн) процесс гашения дуги протекает значительно труднее. Время гашения дуги больше и меняется при отключении токов 1 000 ... 7 000 а соответственно в пределах 0,02 ... 0,04 сек. Осмотр решетки в процессе испытаний показал, что при отключении тока 7 000 а наблюдается оплавление нижних краев пластин решетки. Максимальное напряжение на контактах автомата в процессе отключения достигает  $(2 \dots 3) U_n$ . На рис. 2 приведены осциллограммы отключения тока 36 600 а при малоиндуктивной нагрузке ( $L = 0,03 \cdot 10^{-3}$  гн) и тока 6 800 а при значительной индуктивности цепи ( $L = 1,2 \cdot 10^{-3}$  гн). Опыты по отключению напряжения 440 в одним полюсом автомата показали, что ток порядка 2 000 а отключается автоматом удовлетворительно. При отключении тока 8 500 а процесс недопустимо затягивается и сопровождается сильным оплавлением нижнего края пластин решетки. При отключении из камеры автомата вырывается сноп искр и облако дыма. Отключение таких токов при напряжении 440 в вряд ли может быть признано допустимым.

2. Изучение движения дуги посредством ее фотографирования показало, что в процессе отключения дуга большую часть времени горит неподвижно у входа в решетку или в промежутках между пластинами. Движение дуги происходит лишь в незначительную долю всего времени отключения и дуга, как правило, в процессе отключения не достигает верхнего края пластин. Средняя скорость перемещения дуги в исследованных промежутках между пластинами при отключении токов 1 000 ... 1 700 а равна  $25 \dots 30 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ .

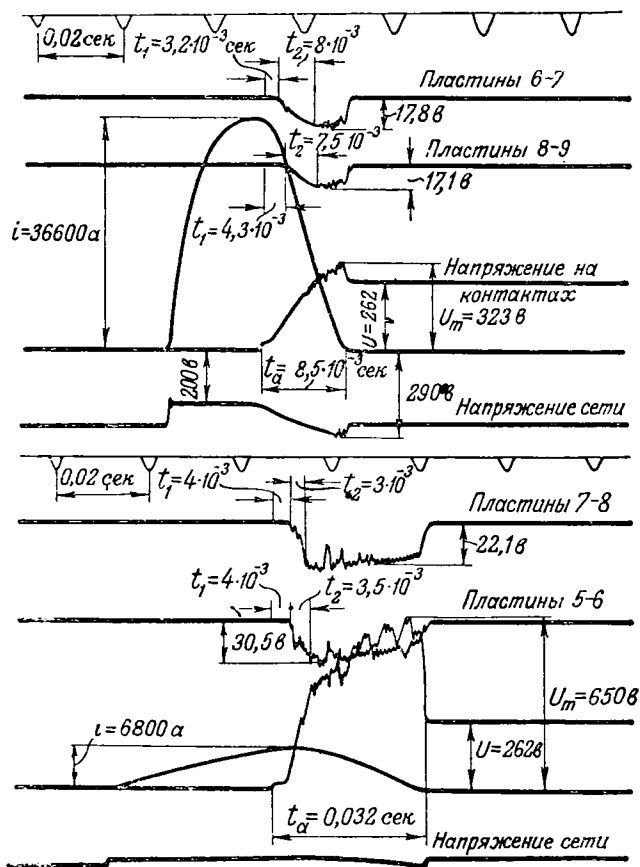


Рис. 2. Осциллограммы отключения цепи автоматом А2950, снабженным стальной дугогасительной решеткой.

3. Опыты по определению очередности и времени вхождения дуги в решетку при разных токах позволили определить (рис. 2): время  $t_1$  от момента расхождения дугогасительных контактов до появления напряжения на данном промежутке; время  $t_2$ , в течение которого устанавливается напряжение на промежутке; напряжение  $U_a$ , приходящееся на каждый промежуток. Для большей наглядности данные обработки осциллограмм нанесены на графиках рис. 3, 4 и 5.

По оси ординат на графике рис. 3 указан номер промежутка  $n$ , на котором появилось напряжение, по оси абсцисс время  $t_1$ . Расположение отдельных точек показывает, что время подхода дуги к различным промежуткам зависит от номера промежутка, но не от величины тока. Повидимому, некоторая зависимость от тока, особенно в начале процесса размыкания, все же имеется, однако разброс точек, получающийся при опытах, вследствие нестабильности процесса отключения, не позволяет ее обнаружить. На рис. 3 по опытным точкам проведена средняя кривая  $n = f(t_1)$ , позволяющая определить время подхода дуги к различным промежуткам. В течение времени  $t_0$  дуга от места возникновения на дугогасительном контакте перемещается к пластинам решетки под действием электродинамических сил от контура тока и в результате взаимодействия со стальными массами пластин. Сопоставляя график  $n = f(t_1)$  с графиком перемещения дугогасительного кон-

такта  $s = f(t)$  (рис. 3), можно заключить, что в районе неподвижного контакта примерно промежуток между пластинами 11 и 12 скорости движения дуги значительно больше скорости движения контактов, и движение ее происходит под действием электродинамических сил. Начиная с промежутка 11—12, кривые  $n = f(t_1)$  и  $s = f(t)$  примерно параллельны. Это свидетельствует о том, что подход дуги к промежуткам происходит со скоростью дугогасительного контакта. Дуга подходит к промежуткам по мере расхождения дугогасительных контактов. Таким образом, скорость расхождения дугогасительных контактов должна влиять на процесс отключения. Рассмотрение кадров ускоренной фотосъемки также подтверждает, что скорость движения дуги в начале процесса отключения больше скорости движения дугогасительного контакта. То обстоятельство, что в начале процесса размыкания дуга под пластинами решетки движется с большой скоростью, является ее существенным достоинством, так как благодаря этому с начала процесса отключения напряжение на дуге выключателя оказывается достаточно высоким, что способствует ее эффективному гашению. Вообще было бы целесообразно расширить зону, в которой движение дуги происходит с высокой скоростью под действием электродинамических сил. Вероятно, этого можно достигнуть путем выполнения подвижного дугогасительного контакта в виде рога и если рассмотреть в конструкции возможность обдувания интенсивного раздувания дуги под действием электродинамических сил в обе стороны в сторону подвижного и неподвижного дугогасительных контактов.

Рассмотрение осциллограмм напряжения отдельных промежутков между пластинами показало (рис. 2), что после подхода дуги к промежутку между пластинами напряжение на нем устанавливается не мгновенно, а в течение некоторого интервала времени  $t_2$ , обусловленного процессом вхождения дуги в промежутки между пластинами. Опыты показали, что длительность этого интервала не зависит от номера промежутка, но зависит от тока. В результате обработки осциллограмм на рис. 4 нанесены значения времени вхождения дуги в промежутки между пластинами в зависимости от тока и по этим значениям построена средняя кривая  $t_2 = f(I)$ .

Из осциллограмм и фотографий дуги в решетке можно заключить, что дуга в процессе отключения заходит не во все промежутки между пластинами. Число промежутков, в которые заходит дуга, тем больше, чем больше отключаемый ток, индуктивность и напряжение цепи. Величина напряжения на промежутке не зависит от номера промежутка, но зависит от значения тока  $i_{t_0}$  в момент вхождения дуги в решетку. На рис. 5 нанесены средние значения напряжения на промежутке и по ним построена средняя кривая  $U_a = f(i_{t_0})$ .

Динамические характеристики дуги. Как было указано, при отключении больших токов порядка нескольких тысяч ампер, напряжение

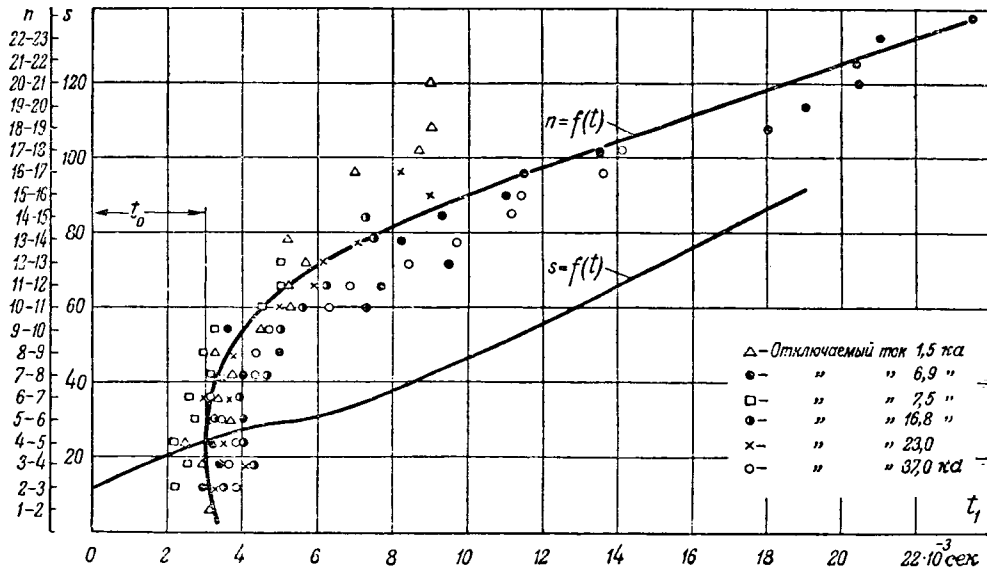


Рис. 3. Номер промежутка, на котором появилось напряжение, в зависимости от времени:  $n = f(t_1)$ .

горящей в промежутке между пластинами дуги, имеет некоторую тенденцию к уменьшению вместе с током в процессе отключения.

Для того чтобы исследовать этот вопрос более подробно, были поставлены опыты по определению динамических характеристик дуги, горящей подвижно в промежутке между пластинами. Испытания были проведены на переменном токе в цепи из двух омедненных стальных полос различных индуктивностях цепи и скоростях убывания тока. Фотограммы перемещения дуги показали, что скорость перемещения дуги близка к нулю. На рис. 6 показана динамическая вольт-амперная характеристика дуги, полученная в результате испытаний. Рассмотрение динамических характеристик позволяет сделать следующие выводы:

1. Напряжение на дуге уменьшается вместе с током. Такая вольт-амперная характеристика получается с характером изменения напряжения в промежутке между пластинами стальной сетки в процессе гашения дуги постоянного

2. При скоростях убывания тока  $0,3 \dots 3,5 \cdot 10^6 \frac{a}{сек}$

напряжение на дуге практически не зависит от скорости убывания тока.

3. Изменение индуктивности в пределах  $(6 \dots 26) \cdot 10^{-5} гн$  практически не влияет на характер изменения динамической вольт-амперной характеристики дуги.

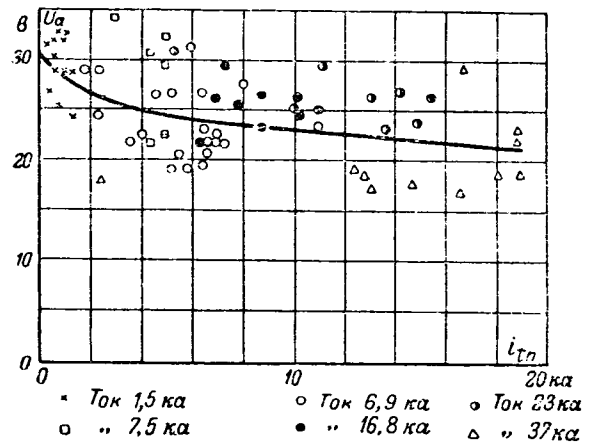
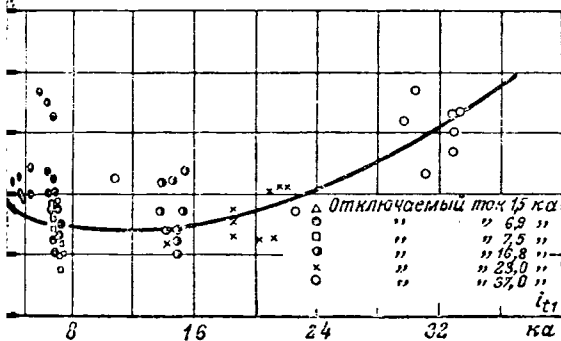


Рис. 5.  $U_a = f(i_{тн})$  — напряжение на промежутке между пластинами стальной сетки в зависимости от тока.



4.  $t_2 = f(i_{тн})$  — время вхождения дуги в промежутки между пластинами сетки в зависимости от тока.

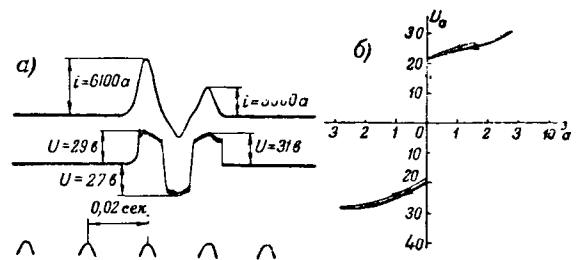


Рис. 6. Определение динамических вольт-амперных характеристик дуги, горящей в промежутке между стальными пластинами.



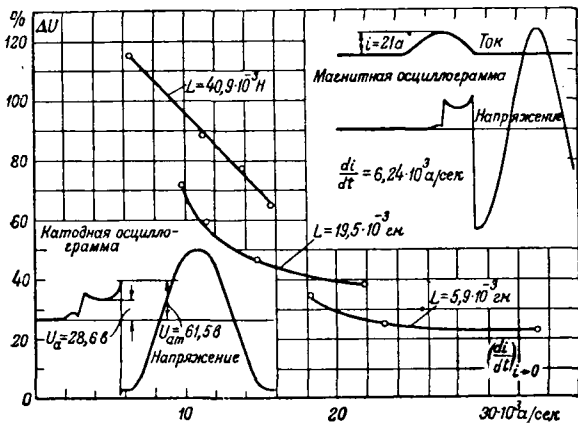


Рис. 7. Определение перенапряжений, сопровождающих погасание дуги в промежутке между стальными пластинами.

**Перенапряжения, сопровождающие погасание дуги.** Известно, что для гашения дуги постоянного тока в индуктивной цепи необходимо, чтобы напряжение на дуге в течение некоторого промежутка времени было больше напряжения цепи, и только в этом случае ток в цепи может быть доведен до нуля и дуга погаснет. Это превышение напряжения на дуге, возникшей в выключателе, над напряжением цепи является, таким образом, одной из причин, обуславливающих появление перенапряжений при отключении цепей постоянного тока.

При значительной индуктивности цепи скорость убывания тока при подходе его к нулю получается небольшой и вследствие этого динамическая характеристика дуги приближается к статической. При малых значениях тока, близких к нулю, вследствие активного воздействия окружающей среды в этом случае сопротивление дуги возрастает значительно быстрее, чем убывает ток в индуктивной цепи, и благодаря этому возникают значительные перенапряжения при угасании дуги. Это вторая причина появления перенапряжений.

Исследование имело своей основной целью выяснить влияние параметров цепи и скорости убывания тока при подходе его к нулю на величину перенапряжения, сопровождающего погасание дуги в промежутке между стальными пластинами. Исследование производилось на макете, состоящем из двух полос. Магнитным осциллографом регистрировался ток в цепи (рис. 7, верхняя осциллограмма), катодным осциллографом с механической разверткой времени — напряжение на дуге (нижняя осциллограмма). На рис. 7 по данным обработки ряда осциллограмм построены кривые изменения перенапряжения, сопровождающего процесс погасания дуги в промежутке между пластинами, в зависимости от скорости изменения тока при подходе его к нулю  $\left(\frac{di}{dt}\right)_{i \rightarrow 0}$ . Мы видим, что с уменьшением  $\frac{di}{dt}$  перенапряжение растет. Действительно, чем меньше скорость

убывания тока, тем больше динамическая характеристика приближается к статической и, следовательно, тем выше должны быть перенапряжения, сопровождающие процесс погасания дуги. Кривые рис. 7 могут быть использованы для учета перенапряжений, сопровождающих процесс отключения, а именно, зная индуктивность цепи и скорость, с которой ток приближается к своему нулевому значению, с помощью полученных кривых можно сказать, какова будет величина перенапряжения, сопровождающего отключение.

Полученные экспериментальные материалы позволяют произвести расчет гашения дуги постоянного тока в стальной дугогасительной сетке.

**Приближенный метод расчета.** При расчете гашения дуги в основном следует определить: 1) характер изменения напряжения на выключателе тока в цепи в процессе отключения; 2) время гашения дуги; 3) перенапряжения, имеющиеся место при гашении дуги; 4) энергию, выделяемую в дуге выключателя в процессе отключения; 5) закон нарастания сопротивления дуги промежутка; 6) число промежутков, в которые заходит дуга в процессе отключения.

Для процесса отключения индуктивного тока постоянного тока может быть составлено следующее дифференциальное уравнение:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_a = U,$$

где  $i$  — ток в цепи, а;

$U$  — напряжение на зажимах цепи, в;

$U_a$  — напряжение на дуге, в;

$R$  — омическое сопротивление цепи, ом;

$L$  — индуктивность, гн.

Для простоты расчетов примем, что напряжение на отдельном промежутке между пластинами меняется по графику, приведенному на рис. 8. На графике момент времени  $t = 0$  соответствует расхождению дугогасительных контактов;  $t_1$  — время подхода дуги к промежутку между пластинами;  $t_2$  — время вхождения дуги в промежуток между пластинами;  $U_a$  — напряжение на промежутке во время вхождения в него дуги. Интервалы времени  $t_1$  и напряжение  $U_a$  могут быть соответственно определены по экспериментальным кривым  $n = f(t_2) = f(i_{1n})$  и  $U_a = f(i_{1n})$  рис. 3, 4 и 5.

Расчет тока в цепи и напряжения на дуге в процессе отключения может быть произведен из уравнения (1) методом последовательных приближений. При расчете напряжения на дуге в первом приближении принимается, что ток в процессе отключения нарастает по экспоненциальному

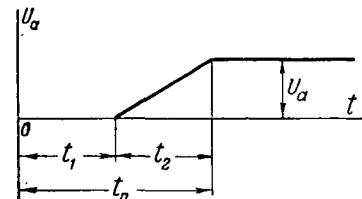


Рис. 8. График изменения напряжения на промежутке между пластинами во времени.

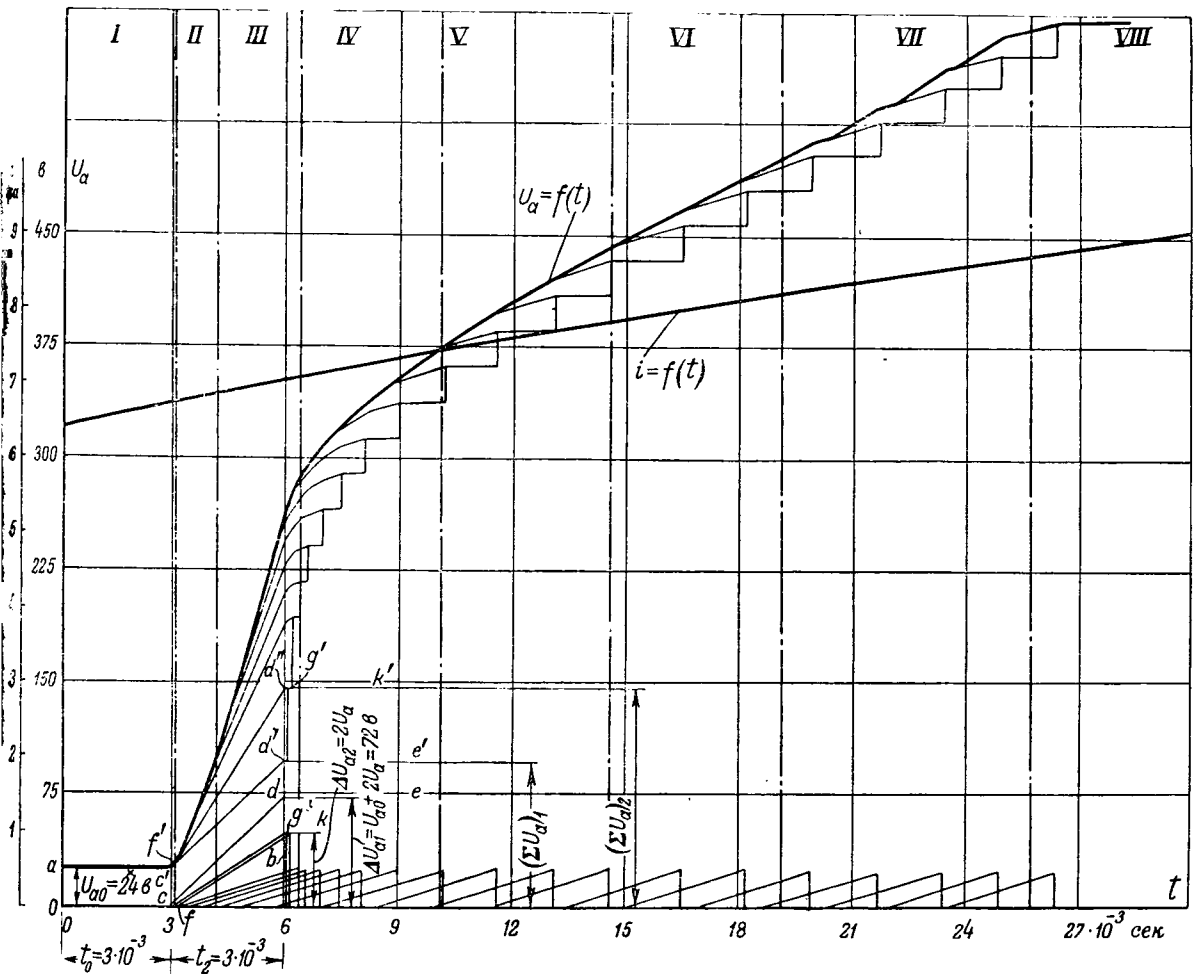


Рис. 9. Ток в цепи и напряжение на дуге в зависимости от времени (в первом приближении).

до величины установившегося тока короткого замыкания. Такой процесс нарастания имел бы место, если бы выключатель был замкнут во время процесса короткого замыкания. Графики изменения напряжения на отдельных промежутках делаются с помощью принятой кривой изменения тока во времени  $i_1 = f(t)$  и зависимостей  $t_2 = f(i_{t1})$  и  $U_a = f(i_{t1})$ . Напряжение на дуге выключателя определяется путем сложения напряжений на отдельных промежутках (рис. 9). Предполагается, что дуга не отключается во все промежутки между пластинами. Более детально вопрос о построении графика напряжения на дуге рассмотрен в помещенном ниже примере. Имея график изменения напряжения на дуге выключателя, можно перейти к расчету тока в цепи во втором приближении. Кривая результирующего напряжения на дуге, построенная на рис. 9, может быть разбита на участки и на каждом из участков предположить приближенным аналитическим выражением  $U_{an}(t)$ . Тогда дифференциальное уравнение для  $n$ -ного интервала времени примет вид:

$$L \frac{di_n}{dt} + Ri_n = U - U_{an}(t). \quad (2)$$

Наиболее простое решение уравнения (2) получается в том случае, если кривую напряжения на

дуге разбить на ряд участков такой величины, чтобы на отдельных участках с достаточной точностью можно было принять напряжение на дуге, меняющимся по закону прямой линии, проведенной через две точки с координатами  $[t_{no}; U_{no}]$  и  $[t_{нк}; U_{нк}]$ , где  $t_{no}$  и  $t_{нк}$  — моменты времени, соответствующие началу и концу  $n$ -ного интервала. Уравнение прямой, проходящей через две точки, может быть приведено к виду:

$$U_{an}(t) = at + b, \quad (3)$$

где

$$a = \frac{U_{нк} - U_{no}}{t_{нк} - t_{no}}; \quad b = U_{no} - at_{no}.$$

Подставляя значение  $U_{an}(t)$  из уравнения (3) в уравнение (2) и производя интегрирование уравнения при начальных условиях  $t = t_{no}, i = i_{no}$ , получим следующее выражение для тока:

$$i_n = \left[ \frac{U}{R} - \frac{b}{R} + \frac{aL}{R^2} \right] \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{no})} \right] - \frac{at}{R} + \left( \frac{at_{no}}{R} + i_{no} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-t_{no})}. \quad (4)$$

В случае постоянного напряжения на дуге  $U_{an}$  в формуле (4) нужно принять:  $a = 0, b = U_{an} = const$ .

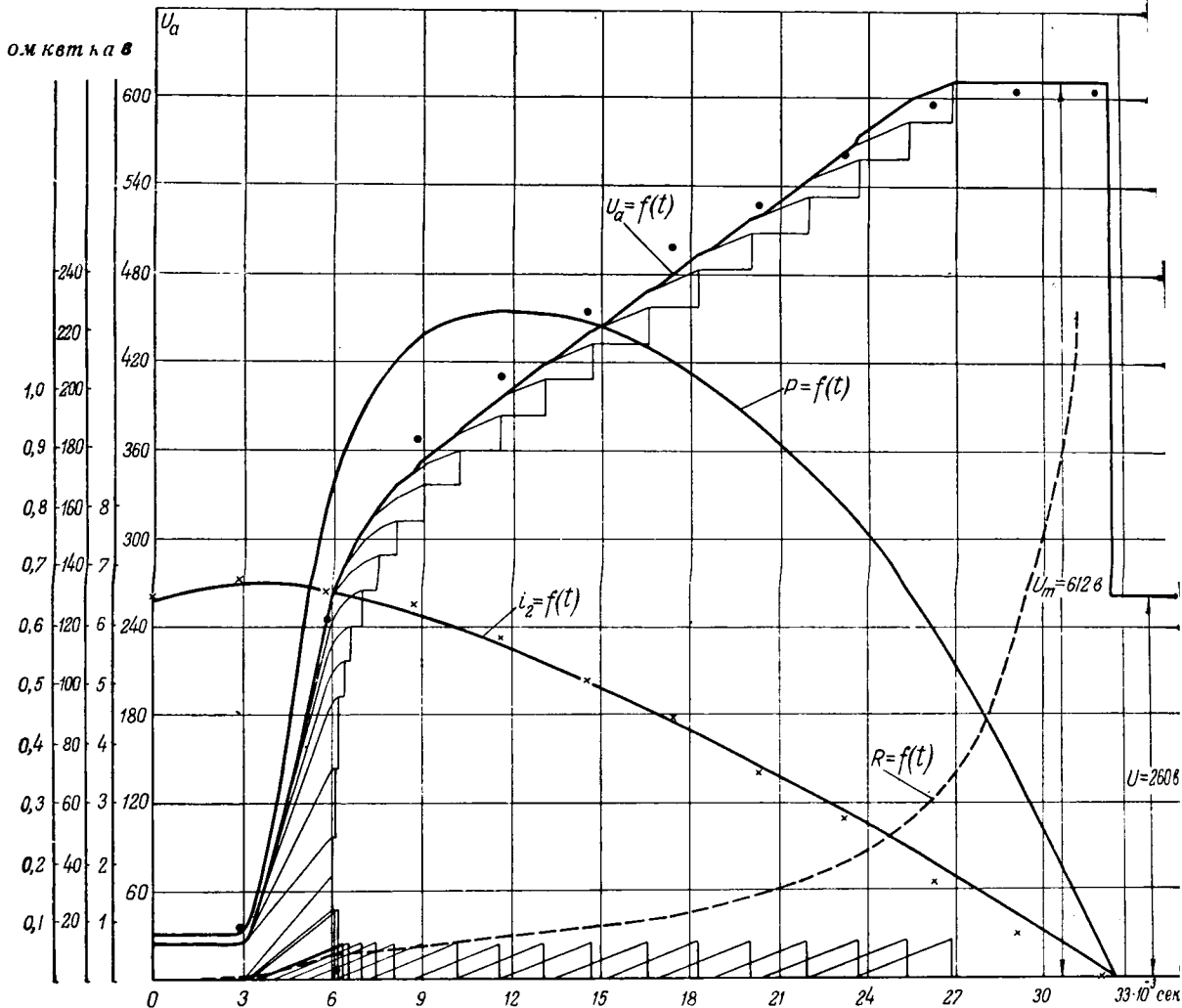


Рис. 10. Ток в цепи, напряжение на дуге, сопротивление дугового промежутка и мощность, выделяемая в дуге, в зависимости от времени (во втором приближении).

С помощью уравнения (4) можно построить кривые изменения тока для отдельных участков. В процессе гашения ток уменьшается до нуля. При построении же кривой напряжения на дуге было принято, что ток нарастает по экспоненциальному закону. Таким образом, произведенный нами расчет напряжения на дуге является лишь первым приближением. Имея зависимость тока от времени  $i_2 = f(t)$ , можно построить новую кривую изменения напряжения на дуге выключателя в зависимости от времени  $U_{a2} = f(t)$  уже с учетом изменения тока в процессе отключения по кривой  $i_2 = f(t)$ . Как и раньше, полученную в результате построения кривую напряжения на дуге можно разбить на ряд участков и считать, что на этих участках напряжение на дуге меняется по линейному закону. В этом случае ток в цепи для отдельных интервалов времени может быть рассчитан по формуле (4), и, таким образом, мы получим новую кривую изменения тока в цепи  $i_3 = f(t)$ . По этой новой кривой изменения тока в цепи можем построить новую кривую изменения напряжения на дуге  $U_{a3} = f(t)$  и т. д. Расчет должен производиться до тех пор, пока в результате его не будут получаться близкие между

собой кривые изменения напряжения на дуге. Ряд расчетов, сделанных таким образом, показывает, что уже второе приближение дает вполне удовлетворительное совпадение с опытом.

Таким образом, используя метод последовательных приближений, можно определить зависимость изменения тока в цепи и напряжения на дуге от времени. Произведение тока на напряжение на дуге дает мощность, освобождаемую в выключателе, а их отношение — сопротивление дуги. Время  $t_a$  гашения дуги определится промежутком времени от момента появления напряжения на дуге выключателя до момента прекращения тока  $i = 0$  (рис. 10). Проводя вертикаль через точку на оси абсцисс  $t = t_a$  до пересечения с кривой напряжения на выключателе, определим перенапряжение, сопровождающее процесс отключения (рис. 10). При значительной индуктивности цепи и малой скорости убывания тока динамическая характеристика дуги будет близка к статической и при угасании дуги будет иметь место дополнительное перенапряжение в виде пика при угасании дуги. Величина этого перенапряжения может быть определена с помощью рис. 7 по известным индуктивности цепи и с

убывания тока при подходе его к нулю. Время гашения дуги  $t_a$  по числу и размеру пик на графике напряжения на дуге, записанных в интервале от 0 до  $t_a$ , можно определить число промежутков, в которое заходит ток в процессе отключения.

Представляет интерес установить критерий отключающей способности решетчатой решетки, чтобы иметь возможность на основании расчетов предсказать, выключит ли решетка отключение цепи с заданными параметрами. Отключающая способность решетки определяется тем, что при больших токах и достаточно большой длительности горения наблюдается сильное оплавление нижних пластин и возможно их сваривание. По данным автора при отключении тока 37 000 а вдали от краев пластин, однако нормальная рабочая дугогасительная решетка не была нарушена. Расчеты по осциллограммам отключения показывают, что при этом в дугогасительной камере выделялась энергия 45 кдж. Таким образом, по этому можно утверждать, что если ток в цепи больше 37 000 а и в процессе отключения в дугогасительной камере будет выделяться меньшая энергия, то выключатель обеспечит отключение цепи. Энергия, выделенная в дугогасительной решетке, может быть определена расчетным путем, как площадь, ограниченная кривой мощности по осям координат. Возможно также, что отключение будет обеспечиваться и при больших токах в местах выделенной энергии, так как энергия дуги не является предельной. Предельная энергия при которой наступают недопустимые разрушения решетки, в опытах автора не была определена.

При коротких замыканиях в электрических цепях, обладающих значительной индуктивностью и большим сопротивлением, размыкание контактов автомата может происходить еще до того, как ток достигнет установившегося значения. Под воздействием электрической дуги, возникающей на контактах, ток в цепи начинает уменьшаться, не достигнув установившегося значения; автоматический выключатель ограничивает ток короткого замыкания в цепи. Ниже на примере будет показано, что предлагаемый метод расчета позволяет определить и это ограничение тока.

Таким образом, изложенным выше методом предлагается возможным определить ряд существующих характеристик дугогасящего устройства. Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим следующий пример.

**Пример.** Произвести расчет гашения дуги постоянного тока для случая отключения цепи автоматом А250, имеющим в качестве дугогасящего устройства стальную дугогасительную решетку. Номинальное напряжение цепи 24 в. Сопротивление цепи  $R = 20 \cdot 10^{-3}$  ом. Индуктивность  $L = 1,2 \cdot 10^{-3}$  гн. Будем считать, что генератор имеет постоянную мощность и напряжение на его зажимах при коротком замыкании остается практически неизменным.

Дугогасительные контакты автомата начинают раскрываться через промежуток времени  $t_p = t_y + t_c$  после наступления короткого замыкания, где  $t_y$  — время достижения током расчетной тока установки максимального реле автомата; собственное время автомата. Время  $t_p$  может быть определено расчетным путем; для автомата А250 оно было

определено экспериментально и для условий рассматриваемой цепи получилось равным  $t_p = 40 \cdot 10^{-3}$  сек. Будем считать, что, начиная с момента короткого замыкания, ток возрастает от нуля по экспоненциальному закону:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}). \quad (5)$$

Так как размыкание контактов и образование дуги происходят в момент времени  $t_p = 40 \cdot 10^{-3}$  сек, то отсчет времени при расчете гашения дуги будем вести именно с этого момента. На рис. 9 построена часть кривой тока  $i = f(t)$  по уравнению (5) при  $t \geq 40 \cdot 10^{-3}$  сек. В первом приближении будем считать, что в процессе отключения ток меняется по этой кривой. В момент  $t = 0$  в новой системе отсчета времени дугогасительные контакты выключателя расходятся и на них возникает дуга. Величина тока в момент размыкания  $t = 0$  может быть определена по кривой  $i = f(t)$  (рис. 9) и равна  $i_0 = 6400$  а. Напряжение  $U_{a0}$ , которое установится на дуге выключателя в момент размыкания контактов, определяется по кривой  $U_a = f(i)$  (рис. 5) и при токе  $i_0 = 6400$  а равно  $U_{a0} = 24$  в. Это напряжение будет существовать на выключателе в течение времени  $t_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  сек (рис. 3). В момент времени  $t_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  сек дуга подходит к 3, 4 и 5 пластинам решетки, расположенным над контактами. Величина тока в этот момент определится из графика  $i_1 = f(t)$  и будет равна при  $t = 3 \cdot 10^{-3}$  сек,  $i_{t1} = 6700$  а. Подойдя к промежуткам между пластинами, дуга не может сразу в них войти, а будет гореть у входа в течение времени  $t_2 = 3 \cdot 10^{-3}$  сек, определяемому из кривой  $t_2 = f(i_{t1})$  (рис. 4) по току  $i_{t1} = 6700$  а. В течение времени  $t_2$  напряжение на дуге выключателя будет нарастать по линейному закону от величины  $U_{a0} = 24$  в в момент  $t_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  сек до величины  $2U_{a0} + 2U_{a1}$  при  $t_{a1} = t_0 + t_2 = 6 \cdot 10^{-3}$  сек. В момент времени  $t_{a1}$  дуга войдет в промежутки между 3—4 и 4—5 пластинами. Ток в цепи в этот момент будет  $i_{t1} = 7000$  а (рис. 9). Напряжение  $U_a$  на промежутке между пластинами определяется по кривой  $U_a = f(i_{t1})$  и при  $i_{t1} = 7000$  а будет  $U_a = 24$  в. Напряжение на выключателе находится посредством графического сложения, а именно нужно сложить постоянное напряжение  $U_{a0} = 24$  в (прямая  $ab$ ) с напряжением, меняющимся по графику рис. 4 (ломаная  $cde$ ). В результате получим ломаную  $ac'd'e'$  (рис. 9).

После того как дуга подошла к промежуткам между 3—4 и 4—5 пластинами, участки ее от неподвижного и подвижного контактов к пластинам начинают быстро перемещаться под действием электродинамических сил в разные стороны вдоль нижнего края пластин. В момент  $t_1 = 3,1 \cdot 10^{-3}$  сек (рис. 3) эти дуги подойдут к промежуткам между 2—3 и 5—6 пластинами. В связи с малостью интервала  $t_1 - t_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  сек, как можно видеть из соответствующих графиков, ток  $i_{t1}$ , время  $t_2$ , ток  $i_{t2}$  и напряжение  $U_a$  остаются практически неизменными. Начиная с момента  $t_1 = 3,1 \cdot 10^{-3}$  сек, напряжение на промежутках 3—2 и 5—6 начинает нарастать по линейному закону и достигает установившегося значения к моменту времени  $t_1 + t_2 = (3,1 + 3) \cdot 10^{-3} = 6,1 \cdot 10^{-3}$  сек. Складывав графически это линейно растущее напряжение (ломаная  $fgk$ ) с напряжением, уже имеющимся на выключателе (ломаная  $ac'd'e'$ ), получим результирующее напряжение при вхождении дуги в 4 промежутка (ломаная  $ac'f'a''g'k'$ ). Совершенно аналогично были проведены построения при вхождении дуги в остальные промежутки между пластинами и в результате был получен график результирующего напряжения на выключателе, соответствующий принятому в первом приближении графику изменения тока  $i_1 = f(t)$ . Чтобы определить характер изменения тока во втором приближении, кривую результирующего напряжения на дуге можно разбить на восемь участков и считать, что на каждом участке напряжение меняется по линейному закону (см. пунктирные прямые). На первом и восьмом участках напряжение на дуге сохраняется постоянным.

**Первый участок** начинается с момента размыкания дугогасительных контактов  $t_{10} = 0$  и кончается в момент  $t_{1к} = 3 \cdot 10^{-3}$  сек. Напряжение на дуге в течение этого интервала времени остается постоянным, равным  $U_{10} = 24$  в. Начальное значение тока в момент  $t_{10} = 0$   $i_{10} = 6400$  а. Ток на первом участке может быть рассчитан

по уравнению (4), которое в данном случае примет вид:

$$i_1 = \frac{260 - 24}{20 \cdot 10^{-3}} \left( 1 - e^{-\frac{20 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-6}} t} \right) + 640 e^{-\frac{20 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-6}} t}.$$

Кривая изменения тока на участке от  $t_{10} = 0$  до  $t_{1к} = 3 \cdot 10^{-3}$  сек, построенная с помощью этого уравнения, показана на рис. 9. Величина тока в момент  $t_{1к} = 3 \cdot 10^{-3}$  сек равна  $i_{1к} = 6690$  а.

Второй участок начинается с момента времени  $t_{20} = 3 \cdot 10^{-3}$  сек и кончается в момент времени  $t_{2к} = 4,2 \cdot 10^{-3}$  сек (рис. 9). Мы примем, что в течение этого промежутка времени напряжение на дуге нарастает по линейному закону от величины  $U_{20} = 24$  в до величины  $U_{2к} = 97$  в. Уравнение прямой, которой представляется напряжение на дуге, имеет вид [уравнение (3)]:

$$U_{22} = 60,8 \cdot 10^3 t - 158.$$

Конечное значение тока в первом интервале времени является начальным для второго, поэтому  $i_{20} = 6690$  а. Ток во втором интервале времени может быть вычислен по уравнению (4), которое в данном случае примет вид:

$$i_2 = \left[ \frac{260}{20 \cdot 10^{-3}} + \frac{158}{20 \cdot 10^{-3}} + \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{20^2 \cdot 10^{-6}} 60,8 \cdot 10^3 \right] \times \\ \times \left[ 1 - e^{-\frac{20 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-6}} (t - 3 \cdot 10^{-3})} \right] - \frac{60,8 \cdot 10^3 t}{20 \cdot 10^{-3}} + \\ + \left( \frac{60,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} + 6690 \right) e^{-\frac{20 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-6}} (t - 3 \cdot 10^{-3})}.$$

Величина тока в момент  $t_{2к} = 4,2 \cdot 10^{-3}$  сек будет  $i_{2к} = 6700$  а. Изменение тока на втором участке также показано на рис. 10.

Аналогичным образом производится расчет и для остальных участков. В результате расчетов на рис. 10 построена кривая изменения тока в цепи во время процесса гашения дуги  $i_2 = f(t)$  во втором приближении. Мы видим, что в процессе гашения ток вначале несколько возрастает, а затем падает до нуля. Имея зависимость тока от времени  $i_2 = f(t)$  во время процесса гашения дуги, теперь можно построить кривую изменения напряжения на дуге в зависимости от времени во втором приближении. Расчет напряжения на дуге производится совершенно так же, как и в первом приближении, только токи  $i_{t1}$  и  $i_{t2}$  определяются уже по кривой  $i = f(t)$ , приведенной на рис. 10. Кривая напряжения на дуге во втором приближении, полученная методом графического сложения, приведена на рис. 10. На этом рисунке, наряду с расчетными кривыми тока и напряжения на дуге во втором приближении, также точками нанесены значения тока и напряжения, взятые из осциллограммы рис. 2, полученной при тех же параметрах цепи, что и в расчете. Расчет и опыт показали удовлетворительное совпадение. Из рис. 10 видно, что гашение дуги произойдет через  $32,5 \cdot 10^{-3}$  сек после размыкания дугогасительных контактов. Максимальное напряжение на выключателе, которое имеет место в момент гашения,  $U_{макс} = 612$  в. Из расчета скорость убывания тока при подходе его к нулю получается равной  $\left( \frac{di}{dt} \right)_{i \rightarrow 0} = 315 \cdot 10^3$  а/сек, т. е. значительно больше указанных на рис. 7, поэтому при подходе тока к нулю напряжение будет меняться по динамической характеристике, и дополнительных напряжений в момент гашения наблюдаться не будет.

Произведенный расчет показывает, что автомат дает ограничение тока короткого замыкания. Установившийся ток короткого замыкания в рассматриваемой цепи  $I_y =$

$$= \frac{U}{R} = 13000 \text{ а.}$$

Максимальный же ток, который имеет место в процессе отключения цепи, как видно из  $i = f(t)$  (рис. 10), равен  $i_{макс} = 6700$  а, иначе автомат ограничивает максимальный ток короткого замыкания в цепи приблизительно в 2 раза. Сопоставление полученных результатов с опытной осциллограммой позволило заключить, что между опытом и расчетом имеется удовлетворительное совпадение. Согласно рис. 2 дуга в процессе отключения должна зайти во все межзубчатое пространство между пластинами. Такой же результат получается и из опыта. На рис. 10 также нанесены расчетная кривая мощности, выделяемой в дуге выключателя, и кривая изменения сопротивления дугового промежутка во время процесса отключения. Энергия, выделяемая в гасительной решетке, из расчета получилась равной  $W = 46,5$  квтсек, из опыта  $A = 46,2$  квтсек. Энергия, выделяемая в выключателе, близка к  $A_{макс} = 45$  квтсек. этому автомат А2050, повидимому, должен обеспечить отключение такой цепи. Это и подтверждается опытами автомат отключал цепь, правда с оплавлением краев пластин решетки.

Так же были проделаны расчеты отключения токов 37000, 23000, 7500 и 1500 а. При больших токах короткого замыкания напряжение на зажимах генератора падает благодаря влиянию реакции якоря и увеличивается напряжение в сопротивлении обмотки якоря. Видно из верхней осциллограммы (рис. 2), в момент замыкания дугогасительных контактов напряжение цепи несколько ниже номинального, а потом оно становится номинальным. Чтобы не вводить излишних осложнений в расчеты производились в предположении, что в момент отключения напряжение питающей сети не меняется равно номинальному. Такое допущение, конечно, вносит некоторую погрешность в расчет. Тем не менее все расчеты также дали удовлетворительное совпадение с опытом. Во всех проделанных примерах расхождение расчетных с опытными значениями находилось в пределах разброса, получаемого при повторных опытах отключения в одних и тех же условиях. Вышеописанный метод расчета был применен автором также для анализа вопроса о влиянии скорости расхождения дугогасительных контактов на процесс гашения дуги.

В заключение необходимо отметить, что предложенный приближенный метод расчета гашения дуги не может считаться универсальным, так как он требует знания некоторых экспериментальных зависимостей. Тем не менее дальнейшее совершенствование этого метода и применение его, по нашему мнению, могут дать положительные результаты в вопросе создания методов расчета дугогасительных устройств низковольтных выключателей.

## Литература

1. О. Б. Брон. Движение электрической дуги в искровом поле. Госэнергоиздат, 1944.
2. О. Б. Брон и В. С. Александров. Автомат с искрогасительной решеткой. Электричество, № 19, 1947.
3. Н. А. Бабаков. Движение электрической дуги в узких щелях. Госэнергоиздат, 1948.
4. Н. А. Бабаков. Вхождение электрической дуги в искрогасительную решетку. ВЭП, № 10, 1947.
5. E. W. Boehne. Geometry of Arc Interruption. IEEE Trans. on AP, v. 44, № 4, 1941.
6. E. W. Boehne, W. A. Atwood. Anode Circuit Breaker. Design and Performance Criteria, El. Eng., № 1, 1945.

# Воспламеняющая способность электрического искрения

Кандидат техн. наук В. С. КРАВЧЕНКО

Институт горного дела Академии наук СССР

Вопросы борьбы с отрывом электрическим ток в воспламеняющейся рудничной атмосфере приобрели в последнее время особое значение в связи с успешным развитием комплексной механизации угольных шахт. Насыщение подземных выработок механизмами требует зна-

чительного расширения электрических маломощных цепей сигнализации, дистанционного управления и автоматики. В этих цепях использование принципа *искробезопасности* [Л. 2] наиболее эффективно. Здесь должны проявиться в полной мере все преимущества искробезопасности системы — портативность оборудования, простота эксплуатации, малый вес и дешевизна.

Особое значение приобретает выдвигаемый принцип искробезопасности в связи с обеспечением взрывобезопасности мощного рудничного электрооборудования (главным образом силовых цепей) по методу электрических блокировок и автоматического отключения. Наконец, в цепях большого тока искробезопасные системы уже нашли широкое применение: подземная безатарейная телефонная связь, шахтофон, сигнализация, контроль непрерывности заземления и т. д.

Применение искробезопасных систем представляет интерес не только для шахт, опасных по газу и пыли, но и для предприятий химической, текстильной, лакокрасочной промышленности, где существует опасность взрыва производственной среды.

Основное затруднение, с которым приходится сталкиваться при внедрении искробезопасных систем, заключается в отсутствии надежных данных о пределе зажигания (о минимальной воспламеняющей энергии искрения или значении тока). Не остался также открытым вопрос о связи между воспламеняющей способностью искрения и параметрами электрической цепи — напряжением, сопротивлением, индуктивностью и емкостью цепи, в которых происходит это искрение.

Оба эти вопроса представляют большой практический интерес для расчета искробезопасных систем.

Энергия электрического искрения как единственный параметр, определяющий возможность зажигания рудничного газа. Воспламеняющая

Устанавливается, что единым критерием, определяющим воспламенение рудничного газа электрическими искрами размыкания в смешанных (индуктивных и безреактивных) цепях, является энергия, рассеянная в искре. Показан закон распределения энергии при массовом искрении. Даны уравнения, определяющие величину энергии, рассеянной в искре размыкания, и ее максимум. Уравнения вскрывают связь между параметрами цепи и воспламеняющей способностью искрения, а также определяют роль энергии магнитного поля цепи и источника тока в процессе искрового зажигания. По формулам максимума построены характеристики искробезопасности, необходимые при проектировании рудничных искробезопасных цепей.

способностью искрения при размыкании индуктивных цепей тем выше, чем больше размыкаемый ток, чем выше напряжение источника тока и индуктивность цепи. Эти же факторы определяют энергию электрического искрения. Естественно предположить, что энергия, рассеянная в искре,

является единым критерием, определяющим искровое зажигание.

Однако экспериментальное сравнение зажигающей способности искр, возникающих при разряде конденсатора и при размыкании индуктивной цепи, показало, что фактор времени также должен учитываться [Л. 4]. При одной и той же величине рассеиваемой энергии разряда короткие емкостные искры воспламеняли взрывчатую газовую смесь, а более продолжительные искры индуктивной цепи не были в состоянии произвести зажигание. Таким образом, возникло предположение о мощности искрового разряда как о едином параметре, определяющем зажигание.

В целях выяснения роли фактора времени и энергии в процессе искрового зажигания и было предпринято настоящее исследование.

Исследовалась воспламеняющая способность искрения при размыкании цепи безреактивного сопротивления и индуктивной катушки без стального сердечника (рис. 1), питаемой от источника постоянного тока. Эта схема была принята для исследования, как наиболее близкая к практическим случаям. Искропроизводящее устройство  $K$  (рис. 1) состояло из платинового стержня и остро заточенной стальной пластинки, соскакивающей с острия стержня при размыкании [Л. 2]. Искрение производилось во взрывной камере, заполненной наиболее легко воспламеняющейся смесью

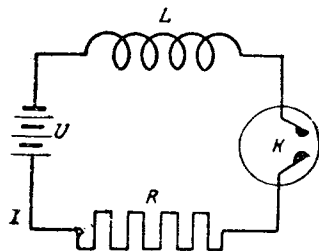


Рис. 1. Исследуемая схема.

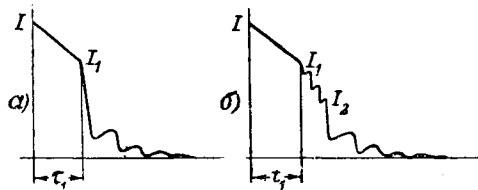


Рис. 2. Типичные осциллограммы тока при размыкании индуктивной цепи.

метана и воздуха (8,5%) при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 18 . . . 20°С.

Методика исследования состояла в сравнении между собой энергий (и продолжительностей) искрения для различных случаев искрообразования (различных  $U, L, R, I$ ), обеспечивающих равновероятное воспламенение.

Параметры цепи, при которых обеспечивалось равновероятное воспламенение, определялись заранее, на основании массового искрения во взрывной камере. Статистическая вероятность воспламенения определялась как частное от деления числа взрывов на общее число искр. Определение энергии искр и измерение продолжительности производились по осциллограммам токов.

Вследствие того что электрические искры отличались друг от друга, хотя и возникали в одинаковых условиях, для каждого случая искрообразования снималась серия осциллограмм (от 10 до 30) и устанавливалась средняя арифметическая энергия и средняя арифметическая продолжительность искрения, характеризующие данную совокупность искр.

Осциллографирование токов выполнялось с помощью специального электронного осциллографа с усилителем постоянного тока при форсированном анодном напряжении и барабанной развертке.

Осциллограммы тока в искрах размыкания можно было свести к осциллограммам двух типов (рис. 2, а и б).

Характерной особенностью всех снятых осциллограмм является плавное по закону прямой снижение тока в начальный период  $\tau$ , размыкания от значения  $I$  до  $I_1$  — точки излома. От точки излома ток резко падает. Осциллограмма заканчивается колебательным процессом.

В большинстве осциллограмм точка излома  $I_1$  явно выражена. В ряде осциллограмм она менее ясна, однако может быть определена приблизительно по другим признакам (например, по „узлам“ позторного искрения).

Точка излома свидетельствует о качественном изменении процесса. Повидимому, именно здесь заканчивается процесс электрической дуги и начинается стадия тлеющего разряда.

Воспламеняющая способность искры определяется дуговой стадией разряда, отличающейся высокой температурой и высокой концентрацией энергии.

В ряде осциллограмм дуговой разряд обрывается не сразу (рис. 2, б). Полному прекращению дуги предшествует прерывистое искрение (участок  $I_1 - I_2$ ). Повидимому, здесь проскакивает несколько искр, образующихся при пробое ионизированного искрового промежутка повышенным

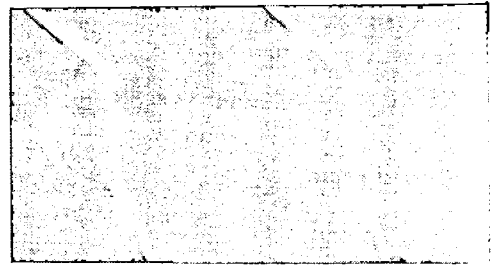


Рис. 3. Примеры осциллограмм токов при размыкании индуктивной цепи.

напряжением размыкания. В точке  $I_2$  размерного промежутка настолько возрастает, что скакивание искр прекращается. Остатки магнитной энергии, не успевшей рассеяться в разряде, рассеиваются в линии в колебательном процессе зарядки и разрядки емкостей.

Ряд типичных осциллограмм токов приведен на рис. 3, 4 и 5.

Изучение осциллограмм позволило дать простую расчетную формулу для определения энергии рассеянной в дуговой стадии искры размыкания.

При спаде тока от полного значения  $I$  до значения  $I_1$ , при котором дуговой разряд прекращается (рис. 2, а), величина энергии  $A$ , рассеянной в электрической дуге, определится формулой:

$$A = \int_0^{\tau_1} u i dt,$$

где  $u$  — мгновенное значение напряжения на искровом промежутке, равное при размыкании:

$$u = U - L \frac{di}{dt} - iR;$$

$i$  — мгновенное значение тока в искре, определяемое по закону прямой, как

$$i = I - \frac{di}{dt} t;$$

$\tau_1$  — продолжительность электрической дуги размыкания.

Совместное решение (1) и (3) дает расчетную формулу:

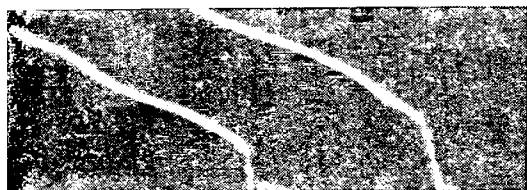
$$A = \frac{LI^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} + \frac{(I - I_1)(U + 2I_1R)\tau_1}{6}.$$

Результаты измерений и вычислений приведены в табл. 1 и 2.

Первая серия опытов (табл. 1) была проведена при следующих условиях: искровой промежуток зашунтирован входным сопротивлением электронного осциллографа; быстрое размыкание индуктивной цепи постоянного тока; остроконечные контакты из стали и платины; концентрация метана в воздухе 8,5%; давление 760 мм рт. ст. температура 18 . . . 20°С.

Во второй серии опытов (табл. 2) промежуток не шунтировался. В остальном условия опытов были те же, что и в первой серии.

Первая серия опытов показала, что для различных случаев искрообразования всегда



4. Примеры осциллограмм токов при размыкании индуктивной цепи.

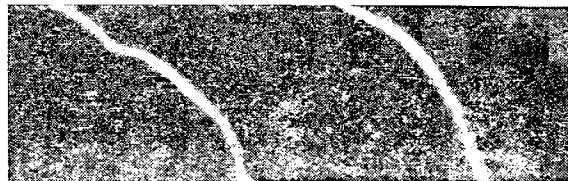


Рис. 5. Примеры осциллограмм токов при размыкании индуктивной цепи.

алось, что равным средним энергиям искрения соответствовали равные вероятности воспламенения независимо от продолжительности искрения и от параметров цепи.

Приведенные значения средней зажигающей энергии значительно завышены вследствие потерь энергии в шунтирующих цепях электронного осциллографа, включавшегося для осциллографирования напряжений при размыкании.

Опыты второй серии (с раскрытым искровым промежутком) дали более высокий разброс измеренных значений энергии, чем опыты первой серии, что следует отнести за счет погрешности измерений. В этих опытах благодаря удалению цепей, поглощавших часть энергии разряда, значительно снизился воспламеняющий ток и сократилась продолжительность искрения (до десятков микросекунд), что значительно осложнило фотографирование.

**Таблица 1**  
Вероятность воспламенения рудничного газа в зависимости от средней энергии, рассеянной в электрической искре размыкания, при различных условиях искрообразования

Условия искрообразования		Энергия, рассеянная в искре (мдж), и продолжительность разряда (мксек) при вероятностях воспламенения		
Напряжение, в	Размыкаемый ток, а	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>
200	0,4	18,3 (303)	—	—
	0,35	—	15,0 (350)	—
	0,3	—	—	10,0 (283)
30	0,45	18,0 (199)	—	—
	0,39	—	14,9 (180)	—
200	0,34	—	—	11,9 (171)
	0,136	17,5 (430)	—	—
	0,114	—	14,0 (338)	—
	0,098	—	—	9,3 (241)

Примечание. Продолжительность разряда указана в скобках.

Среди полученных данных обращает внимание неоспоримый факт, что понижение вероятности воспламенения всегда было связано с понижением средней воспламеняющей энергии как в серии опытов, относящихся к одним и тем же условиям (к одной и той же индуктивности), так и в общей сумме опытов, независимо от условий искрообразования. Так, с уменьшением вероятности воспламенения от  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $10^{-5}$  средняя воспламеняющая энергия искрения постепенно убывала от 1,34 до 0,42 мдж.

Наиболее важным является наблюдение, что при разных условиях искрообразования одна и та же средняя энергия, рассеиваемая в искре, обеспечивает одну и ту же вероятность воспламенения. Так, для четырех различных случаев искрообразования при изменении индуктивности

**Таблица 2**  
Вероятность воспламенения рудничного газа в зависимости от средней энергии, рассеянной в электрической искре размыкания, при различных условиях искрообразования

Условия искрообразования			Энергия, рассеянная в искре (мдж), и продолжительность разряда (мксек) при вероятностях воспламенения						
Напряжение, в	Размыкаемый ток, а		2·10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	7·10 <sup>-3</sup>	1,6·10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>
200	0,69	—	—	0,76 (53)	—	—	—	—	—
	0,22	0,99—1,14 (54—63)	—	—	—	—	—	—	—
	0,185	—	—	—	—	0,4—0,78 (57—76)	—	—	—
	0,126	—	0,63—1,59 (73—123)	—	—	—	—	—	—
	0,110	—	—	—	0,79 (83)	—	—	—	—
	0,082	—	—	0,78 (99)	—	—	—	—	—
	0,071	—	—	—	—	0,52 (78)	—	—	—
	0,066	1,34 (86)	—	—	—	—	—	—	—
	0,0575	—	—	0,93 (75)	—	—	—	—	—
	0,0500	—	—	—	—	—	—	0,57 (45)	—
50	0,69	—	—	0,71 (50)	—	—	—	—	—
	0,59	—	—	—	—	0,49 (49)	—	—	—
	0,40	—	—	—	—	—	—	—	0,42 (39)

Примечание. Продолжительность разряда указана в скобках. В тех случаях, когда пленка малоразборчива, указаны два предельных значения энергии и времени.



в 5 000 раз (от 0,0001 до 0,5 гн) и тока в 8,4 раза (от 0,082 до 0,69 а) и при одной и той же вероятности воспламенения ( $10^{-1}$ ) отмечаются сравнительно небольшие колебания измеренной средней энергии (0,76, 0,63, 0,73 и 0,71 мдж). Средняя продолжительность искрения в этих опытах изменялась не более чем в два раза, несмотря на значительное различие условий искрообразования. В опытах отмечены продолжительности искрения 53, 73, 99 и 50 мксек.

В трех других случаях искрообразования при изменении индуктивности более чем в 100 раз и тока более чем в 8 раз при одной и той же вероятности воспламенения ( $10^{-2}$ ) также отмечаются сравнительно небольшие колебания средней энергии (3,52; 0,49 и 0,79 мдж). Средняя продолжительность искрения в этих опытах составляла 79, 49 и 83 мксек.

Главным выводом из проведенного экспериментального исследования является то заключение, что воспламенение рудничного газа определяется дуговой стадией разряда размыкания и что энергия этой стадии разряда является единым критерием, определяющим зажигание. При различных случаях искрообразования в смешанных (индуктивных и безреактивных) электрических цепях. Равным средним энергиям электрического искрения всегда соответствуют равные вероятности воспламенения.

С этим выводом хорошо согласуются результаты опытов Н. Н. Зенгера [Л. 1], показавшего что при зажигании смеси гептана с воздухом от емкостных искр, энергия этих искр, измеренная калориметром и необходимая для зажигания, оставалась постоянной при изменении индуктивности цепи в широких пределах (от 5 до 1 500 мкгн).

В дальнейшем этот вывод подтвердился на большом количестве других опытов, поставленных в самых различных условиях.

Продолжительность искрения в проведенных опытах с индуктивными и безреактивными цепями не изменялась сколько-нибудь заметно, что не позволило обнаружить влияния фактора времени на воспламеняющую способность искрения подобно тому, как это было обнаружено в сравнительных опытах с емкостными цепями. Фактор времени вошел лишь множителем в уравнение (4), определяющее энергию разряда.

Объяснение особой роли фактора времени в процессе электрического зажигания в опытах с емкостными и индуктивными искрами следует искать, повидимому, не только во влиянии этого фактора на величину притока электрической энергии в электрическую искру, но и во влиянии свойств самой газовой среды на скорость рассеяния энергии разряда в газовой смеси.

**Энергетический состав электрической искры размыкания.** Формула (4) позволяет определить энергетический состав дуговой стадии электрической искры размыкания.

Первые два члена этого уравнения определяют часть энергии, поступившей в электри-

ский разряд из магнитного поля индуктивной катушки:

$$A_m = \frac{LI^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2}.$$

Третий член дает энергию, поступившую в электрическую искру из источника тока:

$$A_0 = \frac{(I - I_1)(U + 2I_1R)}{6} \tau_1.$$

Представление о роли каждой из составляющих разряда в процессе воспламенения при различных случаях искрообразования дают опытные данные, приведенные в табл. 3.

Табл. 3 показывает, что средняя энергия искрения складывается из энергии магнитного поля составляющей приблизительно  $\frac{1}{3}$  от общей магнитной энергии цепи  $\left(\frac{LI^2}{2}\right)$ , и из энергии, поступающей из источника, доля которой зависит от индуктивности цепи. С увеличением индуктивности энергия от источника падает от 99% (при  $L=0$ ) до относительно малых величин (при  $L > 2$  гн), и воспламенение определяется только магнитной составляющей.

Табл.

Энергетический состав искр при размыкании электрических цепей со смешанной нагрузкой (напряжения 200 в)

Индуктивность, гн*	Среднее значение энергии электрической искры размыкания мдж при вероятности воспламенения $10^{-1}$						Общая энергия цепи
	Полная энергия		Магнитная составляющая		Энергия от источника		
	мдж	%	мдж	%	мдж	%	
0,0001	0,758	100	0,0083	1	0,75	99	0,758
0,22	0,63	100	0,51	81	0,12	19	0,75
0,5	0,78	100	0,64	82	0,14	18	0,75
2,01	1,35	100	1,27	94	0,078	6	1,35

\* Значения энергии при индуктивности 2,01 гн даны для вероятности воспламенения  $2 \cdot 10^{-1}$ .

**Распределения энергии при электрическом искрении.** Опыты показали, что искры, возникающие при размыкании одной и той же цепи с одними и теми же параметрами, не похожи друг на друга в силу ряда случайных влияющих на искрообразование.

Наблюдающиеся отклонения от среднего значения энергии для большого количества измерений (всего 270 осциллограмм) хорошо описываются несимметричной кривой распределения (рис. 1). Слева эта кривая имеет своим пределом энергию равную нулю (относительное отклонение 100%). Справа кривая асимптотически приближается к оси абсцисс, „касаясь“ ее при двухкратном среднем значении энергии. Как искрение, было отмечено среди ряда коротких искр одно затяжное искрение, давшее увеличение энергии разряда до 420% от среднего значения.

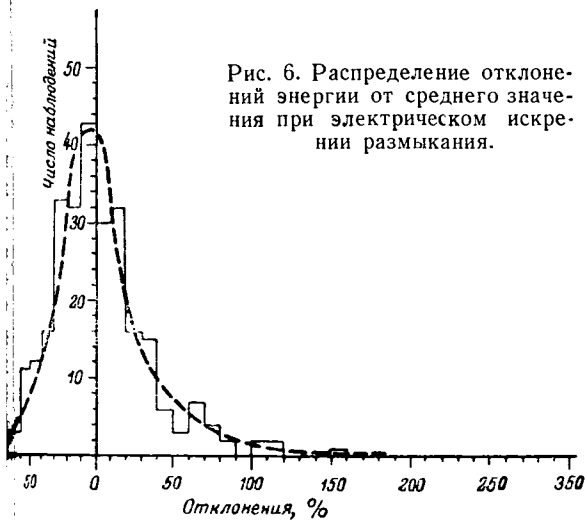


Рис. 6. Распределение отклонений энергии от среднего значения при электрическом искрении размыкания.

Наблюдавшийся разброс измеренных значений энергии показывает, что при слабом искрении, взрыв газа то происходит, то не происходит, вероятность воспламенения газовой смеси определяется главным образом вероятностью появления искр с достаточной энергией (правая часть кривой распределения). Чем меньше вероятность воспламенения, тем меньше встречается в данной серии с достаточной энергией.

Весьма низка вероятность появления искр, обладающих максимальной энергией (правый угол кривой распределения). Очевидно, что при слабом искрении, когда вероятность воспламенения весьма низка, взрывы происходят лишь тогда, когда появляются одиночные искры с максимальной энергией. В этом случае величина максимальной энергии соответствует минимальной воспламеняющей энергии.

Чем меньше вероятность воспламенения, тем ближе равенство между максимальной энергией при данном искрении и значением минимальной воспламеняющей энергии.

Этот вывод открывает пути для получения простых расчетных формул, определяющих искрозажигание.

**Расчетные уравнения, определяющие искроопасность электрических цепей.** Теоретический максимум энергии, рассеиваемой в искре при размыкании электрической цепи, может быть выделен как максимум функции (4).

При постоянстве параметров этой цепи  $L$ ,  $R$ , и  $I$  величины  $I_1$  и  $\tau_1$ , входящие в (4), могут принимать самые различные значения, в зависимости от условий искрообразования.

Значение  $I_1$ , при котором  $A = f(I_1)$  приобретает максимум при постоянстве  $\tau_1$ , определится (4):

$$I_1 = \frac{\tau_1}{6 \frac{L}{R} + 4 \tau_1} I = aI, \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{6 \frac{\tau_1}{R} + 4}; \quad \tau = \frac{L}{R} \text{ — постоянная времени.}$$

Теоретический максимум энергии, рассеянной в искре размыкания, определится путем подстановки (7) в (4):

$$A_m = \frac{(1-a)^2}{12a} P \tau_{1m}, \quad (8)$$

где  $P = UI$  — мощность цепи;

$\tau_{1m}$  — максимальная продолжительность дуговой стадии разряда.

Для безреактивных цепей при  $L = 0$  (9) приобретает вид:

$$A_m = 0,1875 P \tau_{1m}. \quad (9)$$

Совместное решение (8) или (9) с уравнением (10):

$$U = IR \quad (10)$$

дает возможность рассчитать максимальную энергию, рассеиваемую в электрической искре при размыкании данного воспламеняющего тока или рассчитать минимальную воспламеняющую энергию искры  $A_{мин}$ , если известно из опыта значение минимального воспламеняющего тока  $I_{мин}$ .

**О пределе зажигания.** Вопрос о пределе зажигания до сих пор не получил положительного разрешения. Экспериментальные данные о минимальной воспламеняющей энергии противоречивы. Так, по Д. Моргану [Л. 4] минимальная воспламеняющая энергия при зажигании метано-воздушных смесей от искры разряда конденсатора была определена в 2 мдж; по Б. Наугольнику, К. Скрынникову и Д. Маляру [Л. 5] — 1,6 мдж и по М. Бланку, Б. Льюису и Г. Эльбе [Л. 7] — 0,5 мдж для тех же условий зажигания.

Главное затруднение, с которым приходится сталкиваться при определении величины минимальной воспламеняющей энергии, заключается в вероятностном характере процесса зажигания. Статистический подход к решению задачи о пределе зажигания привел к обнаружению вероятностной закономерности, показывающей, что чем большее количество опытных искрений выполняется, тем меньшее значение воспламеняющего тока удается обнаружить [Л. 3]. Для того чтобы получить зажигание при малых вероятностях воспламенения, необходимо выполнить миллионы опытных искрений, что встречает технические трудности, связанные с поддержанием постоянства условий искрения на контактной паре.

Автору удалось получить воспламенение с вероятностью менее  $10^{-4}$  и не удалось исследовать воспламенение при токах, которым на продолжении вероятностной кривой соответствуют условные вероятности воспламенения  $10^{-5}$  и ниже [Л. 2]<sup>1</sup>.

При искрении с такой низкой условной вероятностью воспламенения, как  $10^{-5}$ , минимальная воспламеняющая энергия приближается к максимальному значению энергии данного искрения.

<sup>1</sup> Лежит ли именно здесь предел воспламенения или же факт отсутствия взрывов объясняется несовершенством опытов (затуплением контактов) еще не установлено. Этот вопрос, ввиду большой практической важности, должен быть предметом специального исследования.

Подсчет по формуле (9) максимальной энергии искрения при условной вероятности воспламенения  $10^{-5}$  для одной произвольно взятой серии опытов ( $U=60$  в;  $L=0,0001$  гн;  $I_{мин}=1,12$  а;  $\tau_{1m}=85$  мксек) дал значение максимальной энергии искрения  $1,07$  мдж.

Для других опытов, поставленных в других условиях и с той же низкой условной вероятности воспламенения, получались значения энергии, близкие к данному значению. Поэтому в дальнейшем величина  $1,07$  мдж была принята, как минимальная воспламеняющая энергия — константа  $A_{мин}$  в формулах (8) и (9).

**Построение характеристик искробезопасности.** Попытки установить математическую связь между воспламеняющей способностью электрического искрения и параметрами искрящей цепи, предпринятые Р. Уилером (1926 г.), П. Пироцким (1935 г.), Г. Олсопом (1947 г.), привели лишь к определению эмпирических соотношений.

В основу этих эмпирических соотношений было положено предположение, что при электрическом зажигании главную роль играет магнитная энергия  $A_m = \frac{LI^2}{2}$ , накопленная в индуктивной цепи и рассеивающаяся в искре при размыкании этой цепи, и что наблюдающееся на опыте отклонение от  $A_m = const$  зависит от конструкции размыкающего устройства.

В соответствии с этим фактическое постоянство отыскивалось для уравнения:

$$LI_{мин}^n = C, \quad (11)$$

где  $L$  — индуктивность цепи;  $I_{мин}$  — минимальный воспламеняющий ток. Значения  $n$  и  $C$  — искомые постоянные, зависящие от конструкции контактного устройства, быстроты размыкания, наличия искрогасящих шунтов, величины напряжения и от других условий искрообразования [Л. 6]. Постоянные  $n$  и  $C$  удалось найти эмпирически лишь для нескольких частных случаев искрения.

Настоящее исследование показало, что в основу эмпирического уравнения (11) были положены неверные предпосылки и что это уравнение не отражает фактической связи между параметрами электрической цепи и воспламеняющей способности искрения. Как было показано, эта связь определяется более сложной зависимостью — уравнения (8) и (9). Воспользовавшись этими уравнениями и зная минимальную воспламеняющую энергию — константу  $A_{мин}$ , можно построить расчетным путем характеристики искробезопасности:  $I_{мин} = f(L)$  при  $U = const$  или  $I_{мин} = f(U)$  при  $L = 0$ .

С целью сверки теории с опытом на рис. 7 построены такие характеристики и отмечены опытные точки (кружки), полученные: автором (6 и в, 1949 г. [Л. 2]), Г. Олсопом (а, 1947 г. [Л. 6]), П. Пироцким (г, 1935 г. [Л. 4]), Р. Уилером (з, 1926 г. [Л. 9]) и В. Торнтоном (д, 1914 г. [Л. 8]). Кривые а, б и в относятся к одним и тем же механическим условиям размыкания — со- скакивание острия платиновой (или стальной)

пластинки с острия платинового стержня (на- жения 24, 60 и 200 в, изменение индуктивности от 0,0001 до 2 гн).

Принятая в расчетах минимальная воспла- няющая энергия  $1,07$  мдж была постоянной: всех трех кривых. Значения максимальной продолжительности искрения  $\tau_{1m}$ , входящие в формулы (8) и (9), показаны в табл. 4. Эти дан- ные получены приближенно, на основании экстрапо- лации и сопоставления средних времен искре- ния (табл. 2) с наблюдавшимся опытным фактом. Максимальная продолжительность искрения при условной вероятности воспламенения  $10^{-5}$  при индуктивности  $0,005$  гн (с детекторным шунтом) составляла  $80$  мксек. Неточность определения максимальной продолжительности искрения, до- щенная ввиду отсутствия более достоверных дан- ных, учтена в дальнейшем при оценке резуль- татов сравнения.

Табл. 4

**Продолжительность искрения размыкания в зависимости от индуктивности размыкаемой цепи. Напряжение 200 в; быстрое размыкание остроконечных контактов из стали и платины; воздушная среда**

Индуктивность, гн	0,005 (с детекторным шунтом)	0,0001	0,005	0,049	0,22	0,5
Средняя продолжительность искрения при вероятности воспламенения $2 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-1}$ , мксек . . . . .	50	53	—	58	98	99
Кратность средних времен . . . . .	1	1,06	—	1,16	1,96	1,98
Максимальная продолжительность искрения при условной вероятности воспламенения $10^{-5}$ , мксек	80	85	88	93	157	158

Кривая г (рис. 7) относится к новым механи- ческим условиям искрообразования — размыкание контактов из медной проволоки диаметром  $0,4$  мм (безреактивная цепь, изменение напряжения от 20 до 300 в). Для новых механических условий было определено новое значение константы, под кото- рой в данном случае подразумевалось произве- дение:

$$UI = \frac{A_{мин}}{0,1875 \tau_{1m}} \approx const, \quad (12)$$

полученное на основе расчетной формулы (9).

Значение новой константы было определено равным 60 по данным одной, произвольно взятой опытной точки ( $U=200$  в,  $I_{мин}=0,3$  а).

Кривая д (фиг. 7) относится к случаю размы- кания стальных контактов диаметром  $2,5$  мм при концентрации метано-воздушной смеси  $7,5\%$  (без реактивная цепь, изменение напряжения от 4 до 400 в).

В новых механических условиях значение кон- станты (12) было определено равным 120 на ос- новании одной произвольно взятой опытной точки ( $U=200$  в,  $I_{мин}=0,6$  а).

Оценивая результаты сопоставления теоретических и опытных данных, прежде всего следует иметь в виду, что во всех вычислениях знание максимальной продолжительности искрения, введенное в расчетные формулы, устанавливалось приблизительно, так как точные значения  $\tau_{1m}$  отсутствовали.

Учитывая это, следовало ожидать, что если цифровых данных и будут наблюдаться некоторые расхождения, то общий ход теоретических и экспериментальных закономерностей при вильности теории должен быть одним и тем же. Той точки зрения следует признать, что изменение хода опытных и теоретических кривых весьма удовлетворительное совпадение. Если к этому учесть, что упомянутое совпадение наблюдалось при изменении индуктивности в весьма широких пределах от 0,0001 гн до 2,01 гн (20000 раз) и при изменении напряжения от 25 до 100 в (4 раз), а также, что сравнивались или положительное совпадение данные различных исследователей, полученные в различных условиях, то правильность предлагаемой теории и общий характер становятся очевидными.

Предложенные формулы могут быть рекомендованы для выполнения практических расчетов по безопасным цепям.

**Заключение.** Предпринимавшиеся до сего времени попытки дать теоретическое решение вопроса о воспламеняющей способности электрической цепи не увенчались успехом.

Вследствие чрезвычайной сложности явления прогового разряда и не меньшей сложности самого процесса воспламенения отдельным исследователям удалось дать лишь эмпирические формулы, определяющие воспламеняющую способность электрических искр в некоторых частных случаях.

Благодаря успехам советской экспериментальной техники в настоящей работе сделан шаг вперед в изучении самого искрового процесса и в изучении воспламеняющей способности искры и даны уже не эмпирические, а теоретические уравнения, определяющие искровое значение для широкого ряда практических случаев.

### Литература

1. Н. Н. Зенгер. Исследование воспламенения в искровом разряде. Сборник „Сгорание в транспортных поршневых двигателях“. Академиздат, 1951.
2. В. С. Кравченко. Открытое электрическое искровое воспламеняющей рудничной атмосфере. Электричество, № 2, 1950.
3. В. С. Кравченко. Сборник „Рудничная аэрология и безопасность труда в шахтах“. Углетехиздат, 1949.

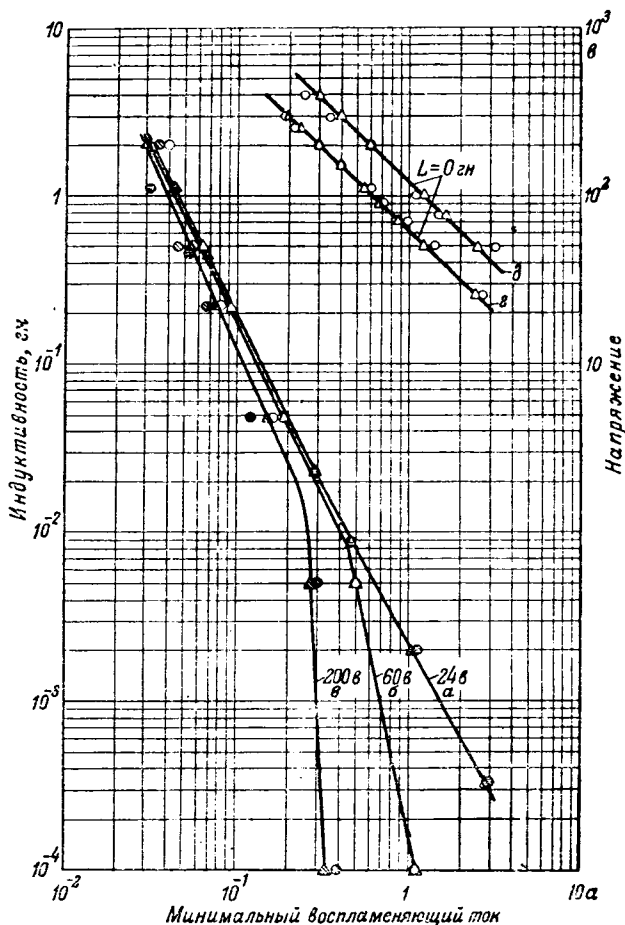


Рис. 7. Зависимость минимального воспламеняющего тока от индуктивности и напряжения при различных условиях искрообразования.

$\circ$  — точки из опыта;  $\Delta$  — точки по расчету.

4. П. П. Пирочкий. Искробезопасные системы электрической сигнализации и связи и воспламенение рудничного газа. ДНТВУ. 1937.

5. Б. Наугольников, К. Скрынников и Д. Маляр. Известия Днепропетровского горного института, т. XIX, 1948.

6. G. Allsop, F. I. Hartwell, E. M. Guenault, A. R. Baker. Safety in Mines Research, № 106, 1947.

7. M. B. Blanc, P. G. Guest, G. Elbe, B. Lewis. Journal of Chemical Physics, Vol. 15, pp. 798—802, № 11, 1947.

8. W. M. Thornton. Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A, 90, 1914.

9. R. V. Wheeler. Safety in Mines Research Board. Paper, № 20, 1926. Stationery Office. London.

[18.7.1951]



# Вопросы электроснабжения сельского хозяйства в зонах великих строек коммунизма

Инж. М. И. ГИТМАН

Гипросельэлектро

Широкое развитие орошения и электрификации сельского хозяйства в связи с сооружением гидроэлектростанций на Волге, Днепре и Дону требует создания централизованного электроснабжения на громадных территориях орошаемого земледелия. Способы распределения электроэнергии на этих территориях будут иметь особенности, вытекающие из характера и размещения на-

*Статья представляет собой изложение доклада, прочитанного автором на совещании, созванном 24—26 марта 1952 г. Комитетом содействия великим стройкам коммунизма при Президиуме Академии наук СССР. В основу статьи положены материалы, относящиеся к орошаемым районам зоны Куйбышевской гЭС. В статье дается краткая характеристика сельскохозяйственных электрических нагрузок в районах орошаемого земледелия. Сравниваются варианты централизованного распределения электроэнергии в сельском хозяйстве при различных степенях напряжения. Рассматриваются параметры сельских сетей и подстанций 10 и 35 кв. Дается метод приближенных технико-экономических расчетов для сравнения вариантов размещения нагрузок. Формулируются задачи, стоящие перед научными организациями и промышленностью. Статья печатается в порядке обсуждения.*

грузных процессов сельскохозяйственного производства. Преобладающую часть их приходится на долю колхозов. В зонах великих строек нагрузка колхозов составляет около 75% всех нагрузок сельской электрификации.

При широкой электрификации наиболее трудоемких работ и быта колхозах Поволжья южной Украины годовая потребность энергии:

**Размещение и характер электрических нагрузок.** Особенность сельскохозяйственных электрических нагрузок в районах орошаемого земледелия состоит в их большой рассредоточенности и раздробленности, а также в более или менее равномерном распределении по территории, тяготеющей к источникам энергоснабжения. Так, например, размещены нагрузки электрифицированных стационарных процессов сельскохозяйственного производства. Для обеспечения электроснабжения этих процессов необходимо иметь по крайней мере одну потребительскую подстанцию в каждом колхозе, совхозе, МТС и т. п. Такой же характер имеют нагрузки насосных станций системы орошения, основанной на местном стоке, так как в этом случае поливные участки гарантированного урожая должны иметься почти в каждом колхозе.

Количество и местонахождение мощных насосных станций на протяженных водоподводящих каналах крупных оросительных систем, создаваемых для орошения больших массивов, будут зависеть от размещения орошаемых площадей, количества ступеней водоподъема на водоподводящих каналах и их высотного расположения. Мощность этих станций может колебаться от 1 до 30 тыс. квт.

Нагрузки электропахоты, можно рассматривать как равномерно распределенные на площади. Однако плотность этих нагрузок будет значительно выше, чем нагрузок электрифицированных стационарных процессов.

В настоящее время наиболее изученными являются нагрузки электрифицированных стацио-

1 колхозный двор на шинах потребительских подстанций составит 1 000 ... 1 500 квтч, а расчетный максимум нагрузок — 350 ... 500 вт. Верхний предел относится к колхозам с большей площадью пашни, приходящейся на 1 колхозный двор, и значительным применением электротепловых процессов.

Наибольший максимум нагрузок имеет место как правило, зимой (рис. 1). Летне-осенний график, соответствующий периоду молотбы или переработки хлопка, по своему максимуму близок к зимнему графику. Ввиду того что в летнее время отсутствуют животноводческие нагрузки стойлового периода и снижаются нагрузки орошения, ординаты летнего графика значительно меньше. Характерной особенностью графиков являются резкие колебания нагрузок в течение суток.

Плотность нагрузок электрифицированных стационарных процессов, определенная по максимуму на шинах потребительских подстанций, составляет 1,5 ... 2,5 квт на 1 км<sup>2</sup>. При такой плотности на 100 км<sup>2</sup> территории должно приходиться 3 ... 4 потребительских подстанции со средней нагрузкой 50 ... 60 квт.

При орошении на местном стоке высота подема воды обычно равна 20 ... 40 м. На 1 га орошаемой площади в этом случае требуется 250 ... 350 вт мощности и 350 ... 450 квтч электроэнергии в год. Если считать, что участки гарантированного урожая составляют около 10% общей площади пашни, или около 6% всей территории, то плотность нагрузки орошения равна 1,5 ... 2,5 квт на 1 км<sup>2</sup>.

При среднем размере поливного участка 150 ... 200 га мощность одной насосной стан-

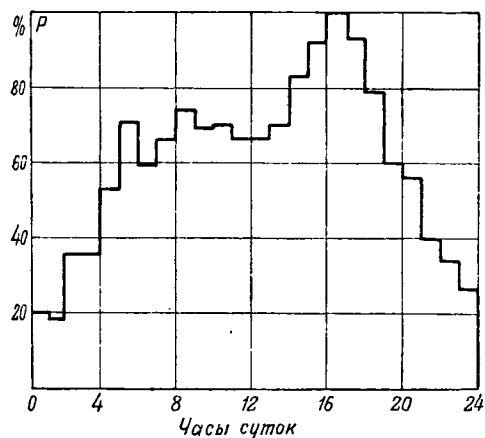


Рис. 1. Зимний суточный график нагрузки колхоза.

авляет большей частью 30...80 квт. Насосостанции оборудуются асинхронными электродвигателями напряжением 380 в. Для облегчения пуска от маломощных трансформаторов двигатели должны иметь улучшенные пусковые характеристики.

При орошении больших массивов с водозаборами крупных рек высота подъема воды обычно значительно больше, чем при орошении на месторождении. Поэтому потребная мощность на 1 га пахотной земли увеличивается до 500 вт и более, а потребление энергии до 1,5...2 тыс. квтч. Нагрузки насосных станций в этом случае сосредоточены. Мощность отдельных насосов колеблется от 0,1 до 5 тыс. квт и более. Для электропитания таких насосов требуются высоковольтные электродвигатели. Следует указать на крайнюю необходимость выпуска для этой цели двигателей напряжением 10 кв, так как для питания рассредоточенных потребителей в сельском хозяйстве напряжение 6 кв совершенно неприемлемо. Опыт эксплуатации первых электротракторов показывает, что наибольшая эффективность их использования может быть достигнута путем создания электромашинно-тракторных станций, обслуживающих обработку главным образом пахотных массивов электроагрегаты больших массивов пахотной земли. Для обработки участков, недоступных электротракторам, электромашинно-тракторная станция должна располагать некоторым количеством тепловых тракторов, которые могут использоваться также для снижения максимальной в период совпадения наибольших нагрузок от стационарных процессов, орошения и электропахоты.

С учетом тепловых тракторов, на 1 га пахотной обрабатываемой электромашинно-тракторными станциями, требуется 50...60 вт электрической мощности и 90...100 квтч энергии в год. Плотность нагрузки составит 3...3,5 квт на 1 км<sup>2</sup>.

Общий размер сельскохозяйственного энергопотребления определяется наложением нагрузок рассредоточенных выше отдельных групп потребителей. На рис. 2 приведены графики мощности, необходимой для электрификации стационарных процессов, орошения и электропахоты

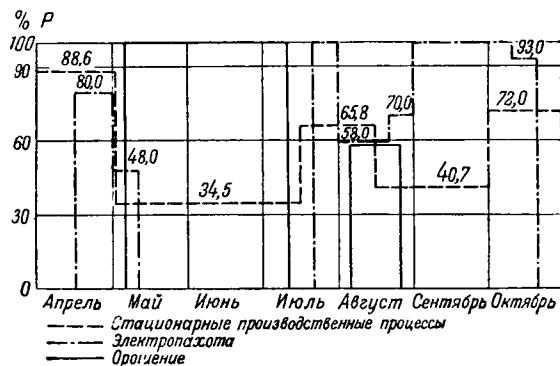


Рис. 2. Совмещенные графики нагрузок электрифицированных стационарных процессов, электропахоты и орошения.

в одном из районов Поволжья. Мощность дана в процентах соответствующих максимумов.

Величина и время прохождения общего максимума зависят от абсолютного значения каждой составляющей. При рассредоточенной нагрузке и отсутствии электропахоты наибольший максимум имеет место зимой (стационарные процессы). В тех случаях, когда в летнее время на нагрузки орошения накладывается около 35% максимума нагрузок стационарных процессов, летний максимум приближается к зимнему или превосходит его. Плотности нагрузок составляют 2...2,5 квт на 1 км<sup>2</sup>. При наличии электропахоты наибольший максимум приходится на лето, когда складываются все виды нагрузок. Плотность нагрузок достигает 5...5,5 квт на 1 км<sup>2</sup>.

При сосредоточенной нагрузке мощных насосных станций летний максимум становится еще более высоким.

**Выбор напряжений для распределения электроэнергии.** Этот вопрос тесно связан с более общим вопросом о пересмотре существующего стандарта номинальных напряжений, о включении в стандарт напряжений 60 и 20 кв. Но, учитывая, что единого мнения по этому вопросу еще не существует [Л. 1] и [Л. 2], а электроснабжение районов орошаемого земледелия от строящихся гэс является задачей ближайшего будущего, следует в первую очередь рассмотреть варианты электроснабжения, исходя из существующего стандарта напряжений. Кроме того, надо иметь в виду, что основные, питающие сети высокого напряжения будут общими для промышленности и для сельского хозяйства. Вследствие этих соображений в статье не затрагивается вопрос о применении системы ДПЗ и напряжения 20 кв.

В отдельных районах, где преобладают сельскохозяйственные нагрузки, напряжение 20 кв и система ДПЗ могли бы оказаться экономически оправданными. Однако этот вопрос требует изучения и выходит за рамки настоящей работы.

Ниже рассматриваются следующие варианты напряжений для централизованного энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: 110/35 кв, 110/10 кв и 110/35/10 кв [Л. 3]. Покажем, что для рассматриваемых условий наиболее приемлемой является система трех напряжений 110/35/10 кв.

Для сельских распределительных электросетей напряжение 10 кв более экономично, чем 35 кв. По данным [Л. 3] расходы на эксплуатацию сетей и подстанций при напряжениях 110/35 кв становятся равными расходам при напряжениях 110/10 кв при нагрузке отдельных подстанций 70 ... 80 квт. Как указывалось выше, средняя нагрузка сельских подстанций равна 50 ... 60 квт. Следовательно, она находится ниже того предела, при котором для распределительных сетей экономически оправдано применение напряжения 35 кв.

В сельских сетях различных напряжений большой удельный вес имеют сети 400/230 в, почти половина которых выполняется проводами из цветного металла. Ввиду этого весьма эффективным является применение глубоких вводов высокого напряжения. Во многих случаях целесообразно устанавливать потребительские трансформаторы у каждой группы хозяйственных строений (животноводческие фермы, молотильные тока и т. п.), а для электроснабжения жилых домов применять однофазные трансформаторы (один трансформатор на 15 ... 20 домов) [Л. 4]. При этом обычная для сельских подстанций средняя нагрузка (50 ... 60 квт) будет распределена между 2 ... 3 и больше подстанциями. Устройство глубоких вводов при напряжении потребительских трансформаторов 10/0,4 кв осуществляется легче, чем при напряжении 35/0,4 кв.

Применение напряжения 35 кв для электропахоты вызовет дополнительные трудности в отношении токоємма и техники безопасности, а также сильно удорожит полевые сети.

По данным [Л. 3] капитальные затраты при трех напряжениях 110, 35 и 10 кв выше, чем при двух (110 и 10 кв) на 5 ... 6%, а эксплуатационные затраты — примерно на 15%. Но такое соотношение затрат имеет место при работе сетей 10 и 35 кв с одинаковым коэффициентом мощности.

Ниже будет показано, что при централизованном энергоснабжении сельскохозяйственных потребителей совершенно необходимо, чтобы коэффициент мощности был близок к единице, так как в противном случае сети будут непомерно тяжелыми. Но установка статических конденсаторов практически возможна только на подстанциях 35/10 кв, имеющих закрытое помещение и дежурный персонал. Ввиду необходимости регулировать реактивную мощность в зависимости от нагрузки эксплуатация статических конденсаторов на потребительских подстанциях без постоянного обслуживания весьма затруднена. Таким образом, отказ от совместного применения напряжений 35 и 10 кв снижает возможность улучшения коэффициента мощности во всех звеньях передачи и распределения энергии. С этой точки зрения напряжение 110/10 кв совершенно неприемлемо, так как при нем протяженность сетей 10 кв значительно возрастает. В этом случае всю сеть 10 кв придется выполнять из цветного металла, что для сельской электрификации исключается.

При наличии промежуточного напряжения 35 кв линии 10 кв в значительной своей части

выполняются стальными проводами. Полное сопротивление таких линий в основном определяется активным сопротивлением, что уменьшает необходимость компенсации в них коэффициента мощности.

Наконец, немаловажным является то обстоятельство, что при трех ступенях напряжения распределительные сети 10 кв могут иметь более легкую аппаратуру, так как общее реактивное сопротивление сети больше, чем при двух ступенях.

Таким образом, распределение энергии на сельскохозяйственных потребителей при трех ступенях напряжения (110/35/10 кв) более приемлемо, чем при двух ступенях (110/35 или 110/10 кв). Следует отметить, что высказанные соображения в значительной мере относятся и к двухступенчатому варианту 110/20 кв.

**Характеристика сетей и подстанций различных напряжений.** Около 40% стоимости всех элементов распределения энергии в районах орошаемого земледелия, не считая сетей 110 кв, приходится на долю сетей 10 кв. Поэтому вопросы рационального проектирования этих сетей являются особо важными. До последнего времени протяженность сельских линий 10 кв принималась в среднем 15 ... 20 км, эти сети рассчитывались только по падению напряжения и не проверялись экономической плотностью тока. В результате применения проводов оказывались выше экономических значений в 2,5 ... 3 раза. Такая практика находила свое оправдание в том, что радиус действия небольших по мощности сельских электростанций ограничивался 20 км. При таком радиусе более экономично применять тяжелые сети 35 кв, чем вводить дополнительно напряжение 10 кв для передачи сравнительно небольшой мощности.

При централизованном электроснабжении несколькими ступенями напряжения такая протяженность сетей 10 кв неприемлема, так как вызывает большой перерасход металла. Расчеты, проведенные для районов орошаемого земледелия, в которых отсутствует электропахота, показали, что при указанных выше плотностях нагрузки радиус действия сетей 10 кв должен быть сокращен примерно до 12 ... 13 км. При удельная длина линии на 1 км<sup>2</sup> территории будет равна 0,18 км, а нагрузка сети — 13,5 квт/км. Если при расчете потерю напряжения принимать равной 6%, то линии на 70% (по длине) будут выполняться стальными проводами и на 30% — цветным металлом. Средневзвешенное сечение стали составит 32 мм<sup>2</sup>, по алюминию — 31 мм<sup>2</sup>.

Ограничение потерь напряжения 6% вызывает наличием многоступенчатой трансформации, при которой регулирование напряжения у потребителей будет крайне затруднено, а также стремление уменьшить потери мощности и энергии.

Следует заметить, что даже при этих условиях плотность тока в сетях 10 кв будет примерно в 1,5 раза меньше экономической плотности. Повидимому, для разветвленных и протяженных сельских сетей 10 кв экономическая плотность тока должна быть ниже. Действительно, уве

плотность тока в сельских сетях 10 кв можно за счет увеличения потерь напряжения допустить, что недопустимо, либо за счет сокращения радиуса сетей и, следовательно, увеличения числа подстанций 35/10 кв. А это последнее мероприятие не принималось во внимание при расчете минимума затрат на материал проводов и потерь энергии для определения экономической плотности тока.

При наличии электропахоты и соответствующем увеличении плотности нагрузок радиус сетей должен быть уменьшен примерно до 10 км. В этом случае допустимая потеря напряжения в более удаленных точках полевых сетей может быть увеличена до 15%. Допущение такой величины потерь объясняется тем, что для нормального токоисъема полевые сети желательно выполнять стальными проводами, что годовое число часов использования максимума в этих сетях не превышает 1 800 и что трансформаторы передвижных подстанций имеют ответвления, позволяющие регулировать напряжение. Однако и при этих условиях плотность тока в полевых сетях будет на 10...15% ниже экономической.

Удельная длина всех линий 10 кв в районах электропахоты составляет 0,35...0,40 км/км<sup>2</sup>, при числе удельная длина полевых линий — 0,15 км/км<sup>2</sup>. Загрузка сети 10 кв равна 14 квт/км. Линии (по длине) выполнены стальными проводами и только 10% — алюминиевыми. Среднее сечение стальных проводов составляет 36 мм<sup>2</sup>, алюминиевых 32 мм<sup>2</sup>.

Приведенные характеристики сетей 10 кв в значительной мере определяют параметры подстанций 35/10 кв. Значения этих параметров без учета мощных насосных станций орошения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	В районах без электропахоты	В районах с электропахотой
среднее расстояние между подстанциями, км	25	20
площадь, обслуживаемая одной подстанцией, км <sup>2</sup>	530	360
плотность нагрузки, квт/км <sup>2</sup>	1 130	400...500
число подстанций	1 000...1 100	1 680
число отходящих линий 10 кв	4...5	4...5

В случае наличия крупных насосных станций орошения мощностью 400 квт и выше подстанции 35/10 кв совмещаются с подстанциями насосных станций. При небольшом расстоянии между насосными станциями только часть из них используется для питания рассредоточенной нагрузки.

В районах электропахоты подстанции 35/10 кв совмещаются с подстанциями электромашинно-насосных станций.

При рассмотрении вопроса о параметрах сетей в общем виде сельскохозяйственную нагрузку

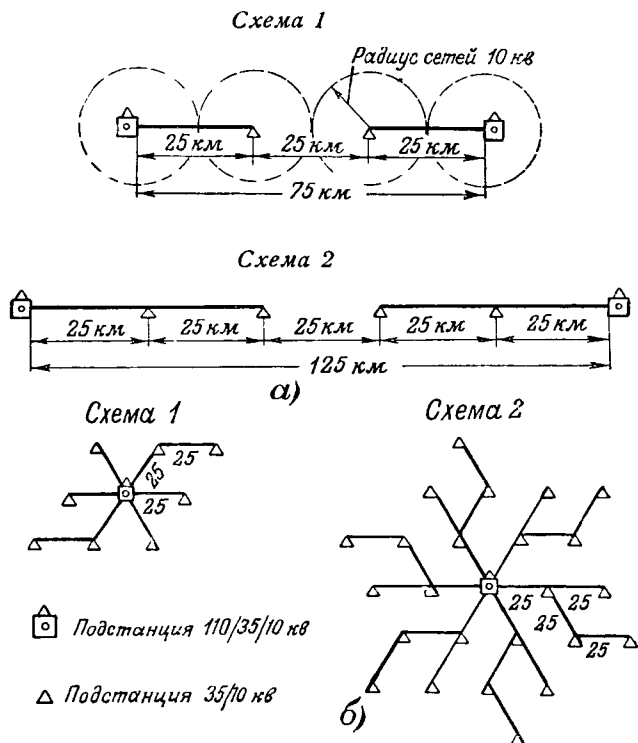


Рис. 3. Схемы сетей 35 кв в линейном изображении (а) и в изображении на плоскости (б).

ку можно принять как равномерно распределенную по площади. Зона, обслуживаемая каждой подстанцией 35/10 кв, может быть представлена в виде правильного шестиугольника, размер которого определяется радиусом сетей 10 кв. Тогда возможны две схемы конфигурации сетей 35 кв, представленные на рис. 3 (применительно к району без электропахоты).

Расстояния между подстанциями 110 кв в схеме 1 равны утроенному диаметру зоны одной подстанции 35 кв, т. е. 75 км, а в схеме 2 — увеличенному в 5 раз диаметру зоны подстанции 35 кв, т. е. 125 км. При той и другой схемах подстанция 110 кв имеет 3 напряжения 110/35/10 кв и свой круг потребителей на напряжении 10 кв. Заполнение территории при обеих схемах представлено на рис. 4. Очевидно, при симметричной схеме промежуточного построения быть не может. Сравнительные показатели схемы 1 и схемы 2 даны в табл. 2.

При экономическом сравнении были приняты три варианта повышения коэффициента мощности: от 0,75 до 0,80; до 0,95 и до 1,0. Статические конденсаторы, с помощью которых осуществляется это повышение, принимались установленными на шинах 10 кв подстанций 35/10 кв. На подстанциях при насосных станциях в качестве компенсирующих устройств могут быть применены синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения.

При сравнении принималось, что при схеме 1 подстанции 110 кв имеют упрощенное оборудование (предохранители вместо масляных выключателей). Сети 35 кв рассчитывались на потерю напряжения 6% и проверялись по экономической



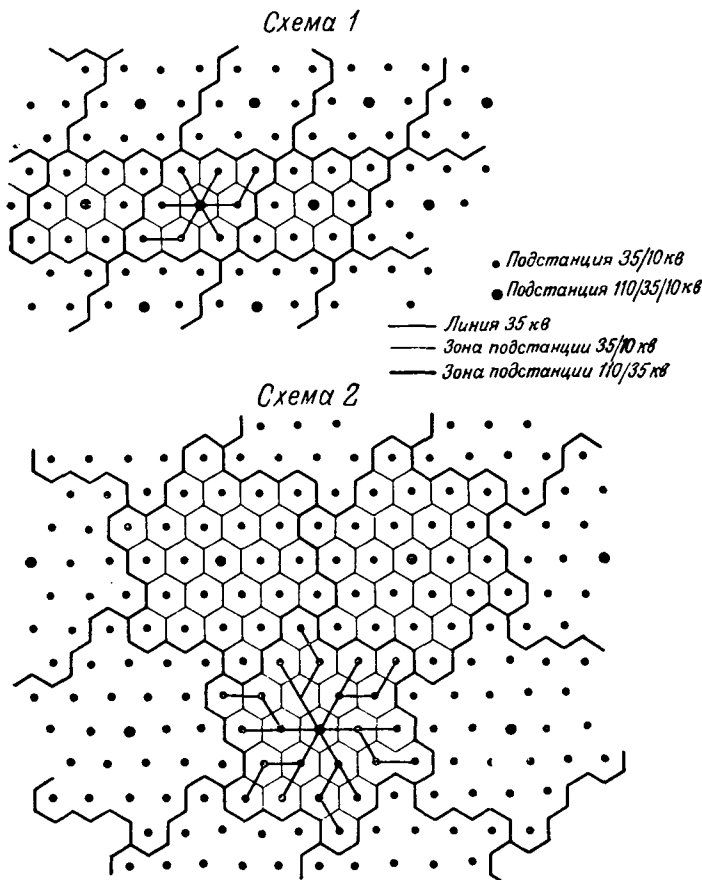


Рис. 4. Схемы размещения подстанций 110/35/10 и 35/10 кв.

Таблица 2

Показатели	Район без электропахоты		Район с электропахотой	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
Количество подстанций 35 кв на одну подстанцию 110 кв, включая подстанцию 110/35/10 кв	9	25	9	25
Расстояние между подстанциями 110 кв, км	75	125	60	100
Зона одной подстанции 110 кв, км <sup>2</sup>	4 850	13 500	3 100	8 600
Нагрузка подстанции 110 кв, тыс. квт	10,0	27,0	15,0	40,0
Наибольшая протяженность линии 35 кв, км	50	75	40	60
Нагрузка одной линии 35 кв, тыс. квт	2,2	4,4	3,3	6,6
Протяженность сетей 35 кв на 100 км <sup>2</sup> территории, км	4,1	4,4	5,2	5,6
Протяженность сети 110 кв на 100 км <sup>2</sup> территории, км	1,55	0,93	1,94	1,16

плотности тока. Результаты сравнения приведены в табл. 3.

Анализ таблицы позволяет сделать следующие основные выводы:

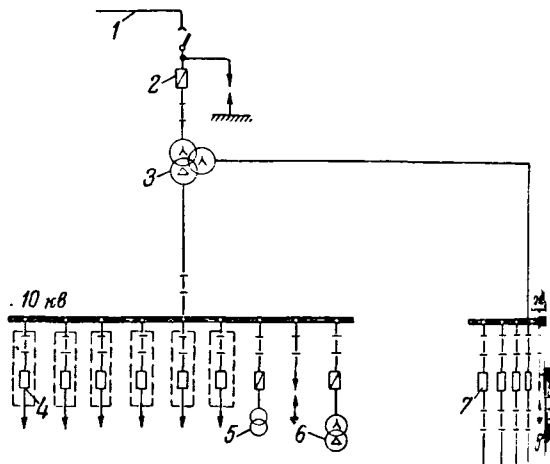


Рис. 5. Упрощенная схема коммутации сельской подстанции.

1 — линия электропередачи 110 кв; 2 — предохранитель 110 кв; 3 — трансформатор 5 600 квт, 110/35/10 кв; 4 — выключатель типа ВНИ; 5 — трансформатор напряжения; 6 — трансформатор 10/0,4...0,13 кв; 7 — выключатель ВМД-35-Н.

1. Единственно приемлемой является схема, которая по всем показателям значительно экономичнее схемы 2.

2. Несомненной является необходимость снижения коэффициента мощности в сетях 35 кв, весьма высокой величины. Применение компенсирующих устройств практически не приводит к увеличению капиталовложений, но дает уменьшение потерь в сетях и трансформаторах. Можно считать, что коэффициент мощности целесообразно довести до 0,97...0,98.

Приведенные выше соображения о размещении понизительных подстанций 110 кв в районе орошаемого земледелия основаны на условиях геометрических построениях, необходимых обоснования параметров сетей 35 кв. На практике не будет необходимости в таком размещении, как подстанции 110 кв промышленного назначения и подстанции, сооружаемые при небольших крупных насосных станциях орошения, поскольку всегда смогут обеспечить питание рассредоточенной сельскохозяйственной нагрузки. Сооружение подстанции 110 кв специально сельскохозяйственного назначения может потребоваться лишь в отдельных случаях. Такие подстанции, обычно трехмоточные, будут иметь, как правило, один трехмоточный трансформатор и простейшую схему, изображенную на рис. 5\*.

Для повышения надежности энергоснабжения целесообразно кольцевание сетей. Из рис. 4 видно, что подстанции 35/10 кв, питающиеся от различных линий и даже от различных подстанций 110/35 кв, будут отстоять друг от друга на расстоянии 20...25 км. Небольшим числом переключений 35 кв может быть обеспечено их двойное питание. Аналогичные возможности существуют и для сети 10 кв. Особо важное значение будет иметь кольцевание в полевых сетях для электропахоты, где наряду с повышением надежности требуется обеспечить большую гибкость и

\* Схема предложена инженером Теплоэлектропроекта Р. П. Бутенко и др.

Таблица 3

Показатели	Схема 1					
	Без электропахоты			С электропахотой		
	При повышении cos φ до					
	0,80	0,95	1,00	0,8	0,95	1,00
взвешенное сечение проводов в сетях	АС-95-25% ПС-87-75%	АС-50-25% ПС-87-75%	АС-50-25% ПС-65-75%	АС-150-25% ПС-103-75%	АС-95-25% ПС-87-75%	АС-50-25% ПС-87-75%
коэффициент тока в сетях в долях от экономической	0,75	0,83	0,87	0,85	0,97	1,04
сечение проводов в сетях 110 кв	АС-70	АС-70	АС-70	АС-70	АС-70	АС-70
затраты на сети и подстанции к 1 км <sup>2</sup> территории	3 130	3 090	3 080	4 900	4 920	4 950

Продолжение

Показатели	Схема 2				
	Без электропахоты			С электропахотой	
	При повышении cos φ до				
	0,80	0,95	1,00	0,95	1,00
взвешенное сечение проводов в сетях 35 кв	АС-158-100%	АС-88-100%	АС-72-75% ПС-95-25%	АС-109-100%	АС-88-75% ПС-120-25%
коэффициент тока в сетях 35 кв в долях экономической	0,27	0,42	0,58	0,50	0,69
сечение проводов в сетях 110 кв	АС-240	АС-240	АС-240	АС-240	АС-240
затраты на сети и подстанции 110 кв, включая компенсирующие устройства, руб.	4 170	3 840	3 650	5 900	5 650

ность в питании подвижных нагрузок. Но при усложнится защита отходящих линий на станциях.

**Использование местных энергетических ресурсов.** Широкое применение централизованного энергоснабжения не исключает необходимости использования для электрификации сельского хозяйства в районах орошаемого земледелия местных энергетических ресурсов. Основным типом должна явиться параллельная работа станций с сетями системы. Эффективность такого объединения вытекает хотя бы из того, что из-за несоответствия годового графика водоток режиму водотока на изолированно работающих сельских гидроэлектростанциях сбрасывается 30...40% межлетнего стока, не считая паводка. Включение сельских гэс в большую систему позволяет увеличить их выработку на 40...60%. Временно упрощаются оборудование и эксплуатация этих станций; в ряде случаев они могут работать с регулированием по водотоку, без личного персонала.

**Метод приближенных технико-экономических расчетов.** На стадии предварительных расчетов возникает необходимость сравнения различных вариантов расположения крупных нагрузок орошения по условиям их энергоснабжения. Кон-

кретное проектирование сетей в этом случае сопряжено со значительными затратами времени, а подчас вообще невозможно из-за отсутствия ряда исходных данных. В связи с этим может оказаться полезным метод приближенных расчетов, позволяющий сравнивать затраты на сети до того, как они спроектированы. Сущность этого метода, который может быть назван методом моментов, сводится к следующему.

Принимается, что все нагрузки питаются на напряжении 110 кв. Объемы работ по сооружению подстанций 110 кв и сетей 35 кв определяются в зависимости от расположения нагрузок. Для каждой нагрузки  $P$  находят ее расстояние  $L$  от источника энергоснабжения и момент  $M = PL$ . Для каждого варианта расположения нагрузок находится сумма нагрузок

$$\sum P = P_1 + P_2 + \dots + P_i, \quad (1)$$

сумма моментов

$$\sum M = P_1 L_1 + P_2 L_2 + \dots + P_i L_i \quad (2)$$

и расстояние центра тяжести всех нагрузок от источника питания

$$L_{cp} = \frac{\sum M}{\sum P}. \quad (3)$$

По нормированному значению экономической плотности тока  $j_э$  определяется экономическая плотность по мощности:

$$p_э = \sqrt{3} j_э U \cos \varphi. \quad (4)$$

Для каждого варианта находится суммарное экономическое сечение:

$$s_э = \frac{\sum P}{p_э}. \quad (5)$$

Для перехода к объемам работ принимается среднее сечение  $s_{cp}$  проводов линии. Возможная при этом ошибка может несколько исказить абсолютную величину полученного результата, но она не изменит результатов сравнения вариантов.

Затем находится условное количество параллельных цепей  $n$ , необходимое для передачи всей мощности на расстояние  $L_{cp}$ :

$$n = \frac{s_э}{s_{cp}}. \quad (6)$$

Для определения общей протяженности сетей  $\sum L$  при данном варианте вводится коэффициент  $k$ , учитывающий конфигурацию сети; тогда

$$\sum L = knL_{cp}. \quad (7)$$

После преобразования формула (7) приобретает вид:

$$\sum L = k \frac{\sum M}{s_{cp} p_э}.$$

Сравнение вариантов производится после того, как величина  $\sum L$ , полученная для каждого из вариантов, будет умножена на стоимость 1 км линии с принятым сечением проводов  $s$ .

В табл. 4 приведены результаты расчета сетей 110 кВ для трех вариантов расположения мощных насосных станций орошения. В каждом варианте, кроме орошения, учтены неизменные нагрузки электрифицированного сельского хозяйства, условно приложенные в центрах районов. При расчете принимались  $k=1,2$  и провод марки АС-185.

Описанный метод нельзя, конечно, рекомендовать для определения параметров сетей и их стоимости. Но он может быть использован при необходимости для предварительного анализа вариантов размещения большого числа нагрузок на значительной территории.

**Выводы.** 1. При централизованном электроснабжении сельского хозяйства в районах орошения необходимо применение трех ступеней напряжения: 110/35/10 кВ. Радиус сетей 10 кВ должен быть значительно ниже, чем это применяется обычно в сельских сетях. Экономическая плотность тока для сельских сетей 10 кВ должна быть

Табл.

Показатели	Вариант	
	I	II
Количество насосных . . . . .	53	25
Количество сельскохозяйственных районов . . . . .	21	21
Сумма нагрузок орошения, тыс. квт	344	247
Сумма сельскохозяйственных нагрузок, тыс. квт . . . . .	142	142
Сумма моментов орошения, млн. квт·км . . . . .	37,9	30,5
Сумма моментов сельскохозяйственных нагрузок, млн. квт·км . . . . .	17,5	17,5
Среднее расстояние $L_{cp}$ , км . . . . .	114	123
Суммарное экономическое сечение, мм <sup>2</sup> . . . . .	2 560	2 050
Число цепей . . . . .	13,8	11,1
Протяженность сетей 110 кв, км . . . . .	1 890	1 640
Стоимость сетей 110 кв, млн. руб. . . . .	142	123

снижена против существующих норм. В сельских сетях 35 кВ необходимо применение компенсирующих устройств для повышения коэффициента мощности.

2. Задача централизованного распределения электроэнергии в районах орошаемого земледелия ставит перед научными и проектными организациями и промышленностью ряд задач, требующих разрешения. К таким задачам относятся:

а) установление способа регулирования напряжения при многоступенчатой трансформации большой протяженности сетей и резком изменении нагрузок во времени;

б) разработка конструкций и освоение производства автоматически регулируемых статических конденсаторов, рассчитанных на наружную установку на потребительских подстанциях;

в) разработка простейших схем коммутации и коммутационных аппаратов для сельских станций 110 и 35 кВ (без масляных выключателей) и для сельских электростанций, работающих в системе;

г) организация производства электродвигателей напряжением 10 кВ для крупных насосных станций и массового выпуска электродвигателей мощностью до 100 квт с улучшенными пусковыми характеристиками.

#### Литература

1. А. А. Глазунов и С. А. Геликонский. Экономически целесообразная шкала стандартных напряжений в диапазоне 10... 220 кВ. Электричество, № 11, 1948.
2. Дискуссия по статье А. А. Глазунова и С. А. Геликонского. Электричество, № 6, 1949.
3. А. А. Глазунов и С. А. Геликонский. Наиболее выгодное число промежуточных напряжений в трехступенчатых системах. Электричество, № 7, 1946.
4. А. Г. Захарин и И. А. Будзко. Смешанная система распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах. Электричество, № 1, 1939.

# Частотные характеристики энергосистем

Кандидат техн. наук А. Г. МОСКАЛЕВ

ЦНИЭЛ МЭС

Частотные характеристики энергосистемы, дающие связь между частотой нагрузки, имеют огромное значение для правильной организации эксплуа-

ции энергосистемы и для правильного выбора методов разнообразной частотной автоматизации в больших масштабах применяющейся в энергосистемах.

Как известно, потребители электроэнергии по своим частотным характеристикам делятся на две группы:

1. Электрическое освещение, электрические сопротивления, дуговые электроды. Мощность, забираемая этими потребителями из сети, зависит от частоты последних.

2. Механизмы с постоянным моментом на валу (молоткопрессные станки, поршневые насосы и компрессоры, шаровые мельницы и др.). Мощность, забираемая этими потребителями из сети, пропорциональна частоте в первой степени.

3. Механизмы с вентиляторным моментом сопротивления (центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры). Мощность, забираемая этими потребителями из сети, пропорциональна частоте в третьей степени.

4. Центробежные насосы, работающие на сетевом статическом напоре сопротивления, например, питающие насосы тепловых электростанций. Мощность, забираемая из сети этими потребителями, пропорциональна частоте в степени выше третьей.

5. Потери в сетях, представляющие собой особый род потребителей. Мощность, забираемая из сети, в некоторых энергосистемах пропорциональна квадрату частоты.

На основании сказанного нагрузка системы может быть выражена уравнением

$$P_{нагр} = P_0 + a\omega + b\omega^2 + c\omega^3 + d\omega^4,$$

$\omega$  — угловая частота;

$a, b, c, d$  — постоянные величины.

Частотную статическую характеристику энергосистемы можно получить как сумму характеристик отдельных потребителей. Однако такая характеристика не дает полного представления о характере зависимости нагрузки от частоты, так в ней не могут быть учтены все факторы, влияющие на эту зависимость. Она не будет учитывать снижения нагрузки из-за понижения напряжения при снижении частоты, отклонения фазовых характеристик от идеальных и других

*Приведены результаты исследования установившихся и переходных процессов изменения частоты в энергосистеме при нарушении баланса мощностей. Дано уравнение динамики турбоагрегата, значительно упрощающее исследования и расчеты переходных процессов.*

факторов. Кроме того, данные о процентном соотношении нагрузок, на основании которых может быть построена характеристика нагрузки энерго-

системы, обычно бывают весьма приближенными. Наибольшая точность получается при определении характеристики энергосистемы опытным путем.

Центральной научно-исследовательской электротехнической лабораторией Министерства электростанций была разработана методика опытного определения характеристики энергосистемы, а в течение 1948—1951 гг. определены частотные характеристики ряда энергосистем.

**Методика определения частотной статической характеристики.** Частотная статическая характеристика нагрузки энергосистемы  $P_{нагр} = \psi(f)$  выражает зависимость мощности, забираемой потребителями из энергосистемы, от частоты при неизменной величине номинальной мощности присоединенной нагрузки. Различают еще так называемую статическую характеристику энергосистемы  $f = \varphi(P_{нагр})$ , которая выражает зависимость частоты в энергосистеме от величины нагрузки при неизменном числе и мощности турбоагрегатов и неизменном количестве поступающего в турбины энергоносителя (пара, воды). Если не меняется характер нагрузки, обе характеристики выражают один и тот же закон:

$$\frac{P_1}{P_2} = \psi\left(\frac{f_1}{f_2}\right), \quad (1)$$

где  $P_1$  — нагрузка при частоте  $f_1$ ;

$P_2$  — нагрузка при частоте  $f_2$ .

Частотные статические характеристики нагрузки энергосистемы определялись путем уменьшения генерирующей мощности при неизменной номинальной мощности присоединенных к энергосистеме потребителей. Перед началом опытов в работе оставлялось минимально необходимое по условиям нагрузки количество турбоагрегатов. Уменьшение генерирующей мощности, а следовательно, и снижение частоты достигались посредством уменьшения поступления пара или воды в одну или несколько турбин. Частота снижалась ступенями через 1 гц, начиная с 50 (51) и до 45 (46) гц. Для наибольшего приближения к условию неизменности нагрузки опыты проводились в часы наименьших ее колебаний. При наличии колебаний нагрузки во время испытаний ступени

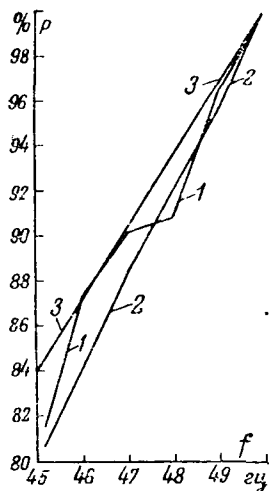


Рис. 1. Частотные статические характеристики энергосистемы А.  
1 — опыт № 1; 2 — опыт № 2;  
3 — опыт № 3.



Рис. 2. Частотные статические характеристики энергосистемы Б.  
1 — опыт № 1; 2 — опыт № 2.

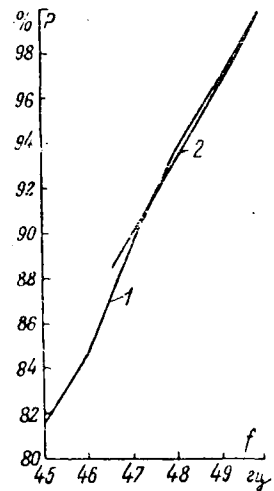


Рис. 3. Частотные статические характеристики энергосистемы В.  
1 — опыт № 1; 2 — опыт № 2.

снижения частоты увеличивались до 2...5 гц. Опыт повторялся от двух до четырех раз. Критерием истинности характеристик служило их совпадение в разных, следующих друг за другом, опытах. Для повышения точности время каждого опыта обычно ограничивалось 10...30 мин. Во время опытов производились записи частоты, генерирующей мощности (нагрузки генераторов), напряжения на шинах станций и в узловых точках системы, а также определялись характеристики основных механизмов собственного расхода электростанций. Одновременность записей по всей энергосистеме обеспечивалась централизованной подачей команды.

**Частотные статические характеристики.** Ниже приводятся результаты опытов по определению частотных характеристик в четырех энергосистемах с различными нагрузками и с различными типами первичных двигателей. Три энергосистемы имели только паровые турбины и одна — только гидротурбины.

На рис. 1 приведены характеристики энергосистемы А, имеющей турбины с отбором пара и противодавлением. Среди потребителей системы преобладает химическая и машиностроительная промышленность.

Для анализа опытных характеристик заменим уравнение (1) в диапазоне частот  $f_1 \dots f_2$  уравнением

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^n. \quad (2)$$

Несмотря на резкие колебания нагрузки в энергосистеме при испытаниях, характеристики, полученные в результате каждого из трех опытов, имеют хорошее совпадение между собой. Среднюю опытную характеристику энергосистемы А можно представить уравнением

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^{1,82}.$$

На рис. 2 представлены полученные в результате двух опытов характеристики энергосистемы Б,

состоящей из гидроэлектростанций. Потребителями энергосистемы являются электрометаллургическая, химическая, машиностроительная и добывающая промышленность. В уравнении средней опытной характеристики показатель степени  $n \approx 2$ .

На рис. 3 представлены полученные из опытов характеристики энергосистемы В, состоящей только тепловые электростанции. Среди потребителей системы преобладает машиностроительная промышленность. Показатель степени в уравнении средней характеристики  $n \approx 1,91$ .

На рис. 4 представлены характеристики энергосистемы Г, определенные в различные дни суток (кривые 1, 2 и 3 — днем, а кривые 4 и 5 — ночью). Уравнение средней дневной характеристики имеет показатель степени  $n \approx 2$ . Если кривую 3 не принимать во внимание, то показатель степени в уравнении средней ночной характеристики  $n = 1,2$ .

Опыты, проведенные в других энергосистемах, показывают, что показатель степени  $n$  уравнения (2) лежит в пределах 1...2 и может меняться в зависимости от времени суток.

При исследовании переходных процессов можно получить большую точность, если зависимость между нагрузкой и частотой энергосистемы представить в виде уравнения:

$$P_{нагр} = C\omega + D\omega^2.$$

При наличии двух известных точек опытных характеристик  $P_1, \omega_1$  и  $P_2, \omega_2$  постоянные С и D определяются с помощью выражений:

$$C = \frac{P_2 - P_1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}{\omega_2 \left( 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)},$$

$$D = \frac{P_1 - P_2 \frac{\omega_1}{\omega_2}}{\omega_1 (\omega_1 - \omega_2)}.$$

ражение для частоты при переходном режиме и отсутствии резерва. При анализе переходного режима рассматривается энергосистема, состоящая из одного эквивалентного турбогенератора и одного эквивалентного потребителя. Как известно, уравнение переходного режима генератора может быть представлено в следующем виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{op} - M_{нагр}, \quad (6)$$

- угловая частота;
- $J$  — момент инерции вращающихся масс турбогенератора и нагрузки ( $J = J_{мг} + J_{нагр}$ );
- вращающий момент;
- момент сопротивления нагрузки.

Трудно показать, что момент вращения машины

$$M_{op} = A - B\omega, \quad (7)$$

$A$  и  $B$  — постоянные величины, определяемые параметрами турбины. Согласно уравнению (3) момент сопротивления нагрузки

$$M_{нагр} = C + D\omega. \quad (8)$$

На основании выражений (7) и (8) переходный процесс в энергосистеме выражается линейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$J \frac{d\omega}{dt} + (B + D)\omega = A - C. \quad (9)$$

Уравнение (9) имеет следующее решение:

$$\omega = \frac{A - C}{B + D} + C_1 e^{-\frac{B + D}{J} t}. \quad (10)$$

Видно, что первый член правой части уравнения (10) представляет собой угловую частоту. Значения постоянных, входящих в первый член и постоянной  $C_1$  определяются из граничных условий.

Пусть начальный режим характеризуется частотой  $\omega_0$ , а установившийся —  $\omega_2$ . Согласно уравнению (10) при установившемся режиме частота равняется:

$$\omega_2 = \frac{A - C}{B + D}.$$

Для простоты, что мощность турбины висит от частоты. Тогда новое значение частоты  $\omega_2$  может быть выражено через параболу статической характеристики<sup>1</sup>. Взяв уравнение исходного режима

$$P_0 = C\omega_0 + D\omega_0^2$$

уравнение установившегося режима

$$P_2 = C\omega_2 + D\omega_2^2,$$

и:

$$\omega = -\frac{C}{2D} + \sqrt{\left(\frac{C}{2D}\right)^2 + \frac{P_2}{P_0} \left(\frac{C}{D}\omega_0 + \omega_0^2\right)}. \quad (11)$$

Вместо выражения (7) выражением  $M_{op} = \frac{P_2}{\omega}$  при изменении частоты на +10% от номинального значения ошибка не более 1%.

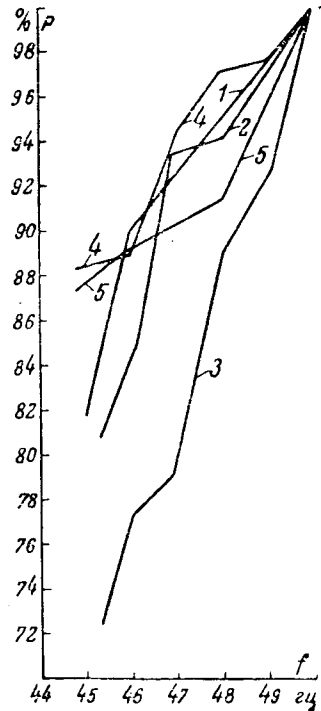


Рис. 4. Частотные статические характеристики энергосистемы Г.

1, 2 и 3 — характеристики, определенные днем; 4 и 5 — характеристики, определенные ночью.

Подставив вместо первого члена правой части уравнения (10) выражение (11) для  $\omega_2$ , получим:

$$\omega = -\frac{C}{2D} + \sqrt{\left(\frac{C}{2D}\right)^2 + \frac{P_2}{P_0} \left(\frac{C}{D}\omega_0 + \omega_0^2\right)} + C_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}},$$

где  $\tau_1 = \frac{J}{B + D}$ .

Значение  $C_1$  найдем из граничного условия, соответствующего  $t = 0$ , на основании последнего уравнения:

$$C_1 = \omega_0 + \frac{C}{2D} - \sqrt{\left(\frac{C}{2D}\right)^2 + \frac{P_2}{P_0} \left(\frac{C}{D}\omega_0 + \omega_0^2\right)}.$$

Окончательно уравнение для частоты при переходном режиме примет вид:

$$\omega = \left[ -\frac{C}{2D} + \sqrt{\left(\frac{C}{2D}\right)^2 + \frac{P_2}{P_0} \left(\frac{C}{D}\omega_0 + \omega_0^2\right)} \right] \times \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + \omega_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (12)$$

или

$$f = f_0 \left\{ \left[ -\frac{C'}{2D'f_0} + \sqrt{\left(\frac{C'}{2D'f_0}\right)^2 + \frac{P_0 - \Delta P}{P_0} \left(\frac{C'}{D'f_0} + 1\right)} \right] \times \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right\}, \quad (13)$$

где  $C' = \frac{C}{2\pi}$ ;  $D' = \frac{D}{2\pi}$ ,  $\Delta P = P_0 - P_2$  — величина отключенной генерирующей мощности.

При  $C = 0$

$$f = f_0 \left[ \sqrt{\frac{P_0 - \Delta P}{P_0}} + \left( 1 - \sqrt{\frac{P_0 - \Delta P}{P_0}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right]; \quad (14)$$

при  $D = 0$

$$f = f_0 \left[ \frac{P_0 - \Delta P}{P_0} + \left( 1 - \frac{P_0 - \Delta P}{P_0} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right]. \quad (15)$$

На практике расчеты ведутся для небольшого диапазона частоты и не требуют особой точности. Поэтому можно пользоваться упрощенным уравнением переходного режима, которое получится, если при определении постоянных частотную статическую характеристику нагрузки заменить прямой линией

$$P = P_{нач} + kf. \quad (16)$$

В уравнениях реальных характеристик, у которых, как показали опыты и расчеты,  $k$  всегда больше единицы,  $P_{нач}$  имеет знак минус. Поэтому при отклонениях частоты более чем на 10% от начального значения уравнением (16) пользоваться нельзя.

Поступая так же, как при выводе уравнения (13), найдем:

$$f = f_0 \left[ 1 - \frac{\Delta P}{kP_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \right], \quad (17)$$

где  $k$  — коэффициент, который в заданном диапазоне частот характеризует с некоторым приближением изменение нагрузки на 1% изменения частоты:

$$k = \frac{\frac{P_0 - P_2}{P_0}}{\frac{f_0 - f_2}{f_0}}.$$

Определим постоянную времени  $\tau_1$  через известные параметры турбоагрегата и нагрузки. Согласно статическим характеристикам турбоагрегата и нагрузки при установившемся режиме всегда имеет место равенство:

$$A - C = (B + D) \omega,$$

где  $C$  — постоянная, определяемая с помощью выражения (4); для упрощения примем

$$C = aM_{ном};$$

$A$  представляет собой момент вращения турбины, когда ее обороты (частота) стремятся к нулю:

$$A = M = k_1 M_{ном},$$

где  $M_{ном}$  — момент вращения при номинальной частоте;

$k_1$  — отношение максимального момента к номинальному;

Учитывая сказанное, постоянная времени близкого к нулю избыточного момента

$$\tau_1 \approx \frac{J_{\omega}}{(k_1 - a) M_{ном}}. \quad (18)$$

Для избыточного момента, существенно отходящего от нуля, постоянная времени  $\tau_1$  в зависимости от знака избыточного момента будет или меньше определенной по уравнению (18). Поэтому в большинстве практических случаев, в зависимости от качества расчетной величины  $\tau_1$ , можно принять определенную по формуле (18).

Как известно, постоянная времени системы

$$\tau = \frac{J_{\omega_{ном}}^2}{P_{ном}} = \frac{J_{\omega_{ном}}}{M_{ном}},$$

или

$$\tau = \frac{2,74GD^2 n^3 10^{-3}}{P_{ном}},$$

где  $GD^2$  — маховой момент,  $m \cdot \text{л}^2$ ;

$n$  — скорость вращения;

$P$  — мощность, тыс. квт.

Из уравнений (18) и (19) найдем:

$$\tau_1 = \frac{\tau}{k_1 - a} \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}}$$

или, если новому установившемуся режиму соответствует частота  $\omega_{ном}$ ,

$$\tau_1 = \frac{\tau}{k_1 - a}.$$

Коэффициент  $k_1$  современных турбин колеблется от 1,8 до 2,3. Коэффициент  $a$  зависит от характера нагрузки и для энергосистем лежит в пределах от 0 (при квадратичной зависимости частоты от нагрузки) до 1 (при линейной зависимости).

Из уравнения (22) следует, что для большинства энергосистем, у которых зависимость частоты от нагрузки близка к квадратичной, постоянная времени примерно в два раза меньше расчетной. Это соотношение полностью подтверждается опытами, проведенными ЦНИЭЛ в энергосистемах.

**Методика определения частотной динамической характеристики.** Частотная динамическая характеристика энергосистемы  $f = \psi(t)$  выражает зависимость частоты от времени при внезапном нарушении баланса мощностей. Практически интерес представляет динамическая характеристика при выключении генерирующей мощности и отсутствии вращающегося резерва. Она определяется следующим образом.

На основании статической характеристики определялась генерирующая мощность, которую следовало выключить. На одном из агрегатов устанавливалась нагрузка, равная этой мощности. Остальные агрегаты системы нагружались полностью. Если какой-либо из агрегатов полностью загрузить было нельзя, поступление энергоносителя в турбину этого агрегата ограничивалось мощностью механизма ограничителя открытия направляющего аппарата (на гидротурбинах) или задвижки (на паровых турбинах). При помощи недогруженного агрегата устанавливалась номинальная частота в системе. Затем выключался генератор, на котором была установлена нагрузка, равная подготавливаемой к выключению генерирующей мощности.

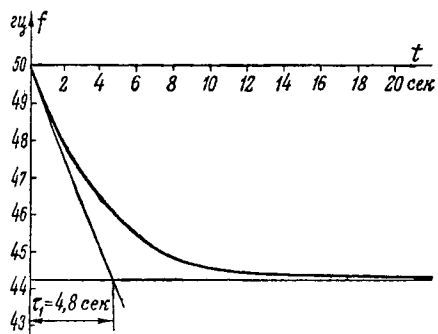


Рис. 5. Частотная динамическая характеристика энергосистемы Б.

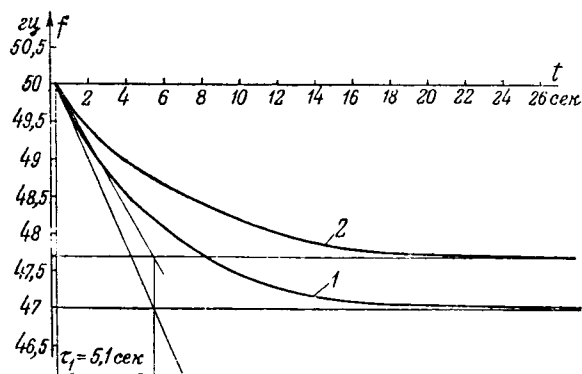


Рис. 6. Частотная динамическая характеристика энергосистемы В.

1 — опыт № 1; 2 — опыт № 2.

осциллографировалась частота. До выключения генератора и после того, как устанавливался нормальный режим, записывались нагрузка на всех генераторах и частота в системе. Осциллографирование частоты производилось с помощью специально разработанного для этой цели устрой-

ства для получения более достоверных данных в этой энергосистеме производилось от двух до трех опытов. Величины выключаемых мощностей выбирались таким образом, чтобы частота снижалась до 48...44 гц.

**Частотные динамические характеристики.** Энергосистеме В при частоте 49,9 гц был отключен генератор с нагрузкой, равной 21,8% мощности системы. При этом согласно уравнению (20) частота должна была понизиться до 44,1 гц:

$$f_2 = 49,9 \sqrt{\frac{100 - 21,8}{100}} = 44,1 \text{ гц.}$$

Фактически же она снизилась до 44,25 гц (рис. 5). Постоянная времени, определенная по касательной, составила 4,8 сек. Расчетная постоянная времени, подсчитанная по уравнению (2) без учета маховых масс нагрузки, составила 7,7 сек. Средневзвешенное значение коэффициента  $k_1$  в уравнениях (21) и (22) равно 2,23.

Интересно, собрать сведения о маховых массах и оборотах механизмов потребителей не удалось возможным. Однако и без этого результаты опыта подтверждают сделанные выше выводы об уравнении переходного режима и времени установившейся частоты. Если предположить, что маховые массы нагрузки на 50% увеличивают время переходного процесса, то согласно уравнению (21) установившаяся частота

$$\frac{1,5\tau}{k_1 - a} \cdot \frac{f}{f_{ном}} = \frac{1,5 \cdot 7,7}{2,23 - 0} \cdot \frac{49,9}{50} = 5,16 \text{ сек.}$$

близко к полученной величине 4,8 сек. Энергосистеме В, при нагрузке 128,4 тыс. квт частоте 50 гц, была отключена генерирующая мощность 14 тыс. квт. Согласно уравнению (11) произошло понижение частоты до 47,1 гц. Фактически же частота снизилась до 47 гц (рис. 6, кривая 1). Опытная постоянная времени составила 5,1 сек. Постоянная времени, определенная

с помощью уравнения (20) без учета некоторых турбогенераторов, параметры которых неизвестны, и нагрузки, составила 8,5 сек. Если принять  $k_1 = 2,2$  и такое же, как и в предыдущем примере, влияние нагрузки на длительность переходного процесса, то согласно уравнению (22)\*

$$\tau_1 = \frac{1,5 \cdot 8,5}{2,2} \approx 5,8 \text{ сек.}$$

Расхождение между этим и опытным значениями постоянной времени хотя и имеется, но не столь значительное.

Повторение того же опыта в энергосистеме В, но при других мощностях, дало полное совпадение результатов (рис. 6, кривая 2). Постоянная времени оказалась также равной 5,1 сек.

Все опытные частотные динамические характеристики имеют хорошее совпадение с экспоненциальной кривой, которая описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка.

**Выводы.** 1. Уравнение динамики турбоагрегата, которое до последнего времени записывалось в форме

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta M,$$

где  $\Delta M$  — избыточный момент, и решалось численным интегрированием, можно представить с большой степенью точности линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Это значительно облегчает подсчеты при решении практических задач и создает условия для решения задач в общем виде, чего раньше не делалось.

2. Действительная постоянная времени переходного процесса при изменении генерирующей мощности и отсутствии резерва в энергосистеме, как правило, меньше механической постоянной времени, полученной по известному уравнению (20). Это явление практически хотя и наблюдали раньше, но не давали ему объяснения.

3. Произведенные исследования показывают, что при расчете и конструировании систем регулирования турбину нужно заменять инерционным звеном, а не интегрирующим, как это делается в настоящее время. В этом случае значительно упрощается задача получения устойчивой системы регулирования.

[15. 3. 1952]

\* Для данной энергосистемы С близко к нулю.





# Расчет предельных пролетов воздушных линий

Инж. Б. А. ПРЫСТАЙ

г. Станислав

При расчете механической части проектируемых воздушных линий в большинстве случаев имеют следующие данные:  $l$  — длина пролета,  $m$ ;  $h$  — разность высот точек подвеса провода,  $m$ ;  $s$  — сечение провода,  $мм^2$ , и его материал (марка провода),  $\sigma_m$  — допускаемое напряжение материала провода,  $кг/мм^2$ ;  $g$  — удельная нагрузка провода,  $кг/м \cdot мм^2$ . По этим данным определяются параметр  $h_0$  цепной линии, определяющий геометрическую форму линии провисания провода, и другие интересующие нас величины, например: положение наинизшей точки  $O$  провода, стрела провисания, длина подвешенного провода, тяжения по проводу и их направления и т. д.

При заданных величинах  $h$ ,  $\sigma_m$  и  $g$  длина пролета не должна превышать предельного значения  $l_n$ , так как в противном случае реального решения задачи не существует. Поэтому в случае больших пролетов следует предварительно проверить, не превышает ли заданный пролет предельного.

Из теории цепной линии известны следующие основные формулы: уравнение цепной линии  $MON$  (рис. 1)

$$y = h_0 \operatorname{ch} \frac{x}{h_0}; \quad (1)$$

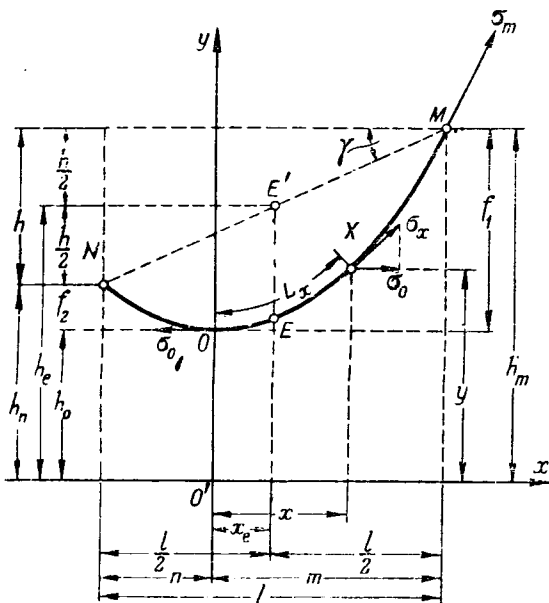


Рис. 1. Кривая провисания провода, подвешенного в точках, расположенных на неодинаковой высоте.

Приведены эмпирические формулы, основанные на уравнениях цепной линии, пользуясь которыми можно просто и с высокой точностью определять предельные пролеты воздушных линий, имеющих различные высоты точек подвеса

напряжение материала провода в произвольной точке  $X$  цепной линии

$$\sigma_x = yg,$$

напряжение в верхней

ке провода  $M$

$$\sigma_m = h_m g;$$

напряжение в наинизшей точке  $O$  провода лежащееся одновременно горизонтальной составляющей напряжения материала провода в произвольной точке  $X$ ,

$$\sigma_0 = h_0 g;$$

длина провода между наинизшей точкой ( $O$ ) произвольной точкой  $X$  линии провисания

$$L_x = h_0 \cdot \operatorname{sh} \frac{x}{h_0}.$$

Согласно уравнению (1) ординаты точек веса

$$h_m = h_0 \operatorname{ch} \frac{m}{h_0}$$

и

$$h_n = h_0 \operatorname{ch} \frac{n}{h_0}.$$

Из уравнения (6) получаем:

$$m = h_0 \operatorname{arch} \frac{h_m}{h_0}.$$

Функцию  $\operatorname{arch} x$  удобно вычислять на логарифмической счетной линейке по формуле

$$\operatorname{arch} x = 2,303 \lg (x + \sqrt{x^2 - 1}).$$

При абсциссе  $n = x_n$  следует учитывать Если наинизшая точка  $O$  провода лежит в пределах пролета, то  $n < 0$ ; если же точка  $O$  находится вне пролета, то  $n > 0$ . Абсцисса  $m$  всегда положительна. Имея, кроме того, в виду что  $\operatorname{sh}(\pm x) = \pm \operatorname{sh}(x)$  и что  $\operatorname{ch}(\pm x) = \operatorname{ch}(x)$  получим общие формулы, справедливые для случаев положения точки  $O$ : в пределах пролета или вне его.

Согласно рис. 1 с учетом знаков абсциссы, выраженная через составляющие  $m$  и  $n$  длина пролета

$$l = m - n,$$

и горизонтальное расстояние от середины пролета до наинизшей точки провода  $O$

$$x_e = m - \frac{l}{2} = \frac{m+n}{2}.$$

Для удобства расчета вводим вспомогательную величину, равную отношению полупролета к параметру цепной линии:

$$\varphi = \frac{l}{2h_0}. \quad (11)$$

Из формул (6), (7), (9), (10) и (11), пользуясь известными формулами для суммы и разности гиперболических функций, получим:

$$+h_n = h_0 \left[ \operatorname{ch} \frac{m}{h_0} + \operatorname{ch} \frac{n}{h_0} \right] = 2h_0 \operatorname{ch} \frac{m+n}{2h_0} \times$$

$$\operatorname{ch} \frac{m-n}{2h_0} = 2h_0 \operatorname{ch} \frac{x_e}{h_0} \operatorname{ch} \frac{l}{2h_0} = l \operatorname{ch} \frac{x_e}{h_0} \cdot \frac{\operatorname{ch} \varphi}{\varphi} \quad (12)$$

$$h = h_m - h_n = h_0 \left[ \operatorname{ch} \frac{m}{h_0} - \operatorname{ch} \frac{n}{h_0} \right] =$$

$$= 2h_0 \operatorname{sh} \frac{m-n}{2h_0} \operatorname{sh} \frac{m+n}{2h_0} = l \operatorname{sh} \frac{x_e}{h_0} \cdot \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi}. \quad (13)$$

На основании формулы (5) с учетом уравнений (9), (10) и (11) длина провода, подвешенного к точкам  $M$  и  $N$  (рис. 1),

$$L = L_{OM} + L_{ON} = h_0 \left[ \operatorname{sh} \frac{m}{h_0} + \operatorname{sh} \frac{n}{h_0} \right] =$$

$$= 2h_0 \operatorname{sh} \frac{m-n}{2h_0} \cdot \operatorname{ch} \frac{m+n}{2h_0} = l \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi} \operatorname{ch} \frac{x_e}{h_0}, \quad (14)$$

удаленная

$$\operatorname{ch} \frac{x_e}{h_0} = \frac{L}{l} \frac{\varphi}{\operatorname{sh} \varphi}. \quad (15)$$

Возведя уравнения (13) и (14) в квадрат и вычитая квадрат первого из квадрата второго, получим:

$$L^2 - h^2 = l^2 \left( \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi} \right)^2, \quad (16)$$

куда длина провода, подвешенного в двух точках, расположенных на неодинаковой высоте,

$$= \sqrt{l^2 \left( \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi} \right)^2 + h^2} = h \sqrt{\left( \frac{l}{h} \cdot \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi} \right)^2 + 1}. \quad (17)$$

Функция  $\frac{\operatorname{sh} x}{x}$  для значений аргумента  $x \leq 1,5$  достаточно точно вычисляется на логарифмической шкале по формуле

$$\frac{\operatorname{sh} x}{x} = 1 + \frac{x^2}{6} \left( 1 + \frac{x^2}{20} \right). \quad (18)$$

Согласно рис. 1 стрела провисания провода относительно верхней точки подвеса  $M$

$$f_1 = h_m - h_0; \quad (19)$$

и относительно нижней точки подвеса  $N$

$$f_2 = h_n - h_0 = h_m - h - h_0 = f_1 - h; \quad (20)$$

горизонтальное расстояние средней точки  $E'$  хорды  $MN$  от оси  $x$

$$h_e = h_m - \frac{h}{2} = h_m - \frac{h_m - h_n}{2} = \frac{h_m + h_n}{2}.$$

Подставляя в последнее уравнение соответствующие величины из уравнений (12) и (15), получим:

$$h_e = \frac{L}{2 \operatorname{th} \varphi}. \quad (21)$$

Ордината верхней точки подвеса согласно уравнению (3) и рис. 1

$$h_m = \frac{\sigma_m}{g} = h_e + \frac{h}{2}.$$

Подставив в последнее уравнение  $h_e$  из формулы (21) и  $L$  из формулы (17), получим уравнение, выражающее зависимость величин  $l$ ,  $h$ ,  $\sigma_m$ ,  $g$  и параметра данной цепной линии  $h_0$ :

$$\frac{\sigma_m}{g} = \frac{h \sqrt{\left( \frac{l}{h} \cdot \frac{\operatorname{sh} \varphi}{\varphi} \right)^2 + 1}}{2 \operatorname{th} \varphi} + \frac{h}{2},$$

откуда, после преобразования, следует:

$$\frac{l}{h} = \sqrt{\left( \frac{2\sigma_m}{gh} - 1 \right)^2 \frac{\varphi^2}{\operatorname{ch}^2 \varphi} - \frac{\varphi^2}{\operatorname{sh}^2 \varphi}}. \quad (22)$$

Учитывая, что наибольшее напряжение провода  $\sigma_m$  имеет место именно в верхней точке подвеса  $M$  и что это напряжение не должно превышать допустимого для данного материала напряжения  $\sigma_m$ , условимся считать

$$\sigma_m = \sigma_m.$$

Для удобства дальнейших расчетов введем величины:

$$A = \frac{2\sigma_m}{gh} - 1 \quad (23)$$

и

$$B = \sqrt{A^2 \frac{\varphi^2}{\operatorname{ch}^2 \varphi} - \frac{\varphi^2}{\operatorname{sh}^2 \varphi}}. \quad (24)$$

Величина  $A$  зависит от прочности материала ( $\sigma_m$ ), климатических условий ( $g$ ) и разности высот точек подвеса ( $h$ ), но не зависит от длины пролета  $l$ . Величина  $B$  определяется условиями трассы ( $l$  и  $h$ ) и является мерой крутизны заданного пролета, так как согласно рис. 1

$$B = \frac{l}{h} = \operatorname{ctg} \gamma.$$

Подставляя величины  $A$  и  $B$  в уравнение (22), получим:

$$l = hB. \quad (25)$$

Из уравнения (25) следует, что пролет  $l$  будет предельным, если при заданном значении  $h$  величина  $B$  будет максимальной:

$$l_n = hB_m. \quad (26)$$

Найдем условие максимума функции  $B$  при  $A = \text{const}$ , для чего первую производную от этой функции (24) по переменной  $\varphi$  приравняем нулю. Если значение переменной  $\varphi$ , удовлетворяющее уравнению

$$\frac{dB}{d\varphi} = \frac{A^2 \frac{\operatorname{ch} \varphi - \varphi \operatorname{sh} \varphi}{\operatorname{ch}^3 \varphi} - \frac{\operatorname{sh} \varphi - \varphi \operatorname{ch} \varphi}{\operatorname{sh}^3 \varphi}}{\sqrt{A^2 \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \varphi} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \varphi}}} = 0,$$

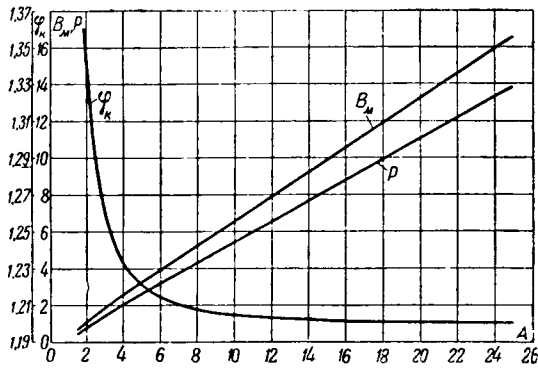


Рис. 2. Графики функций  $\varphi_{\kappa} = f(A)$ ,  $B_m = F(A)$  и  $P = g(A)$ .

обозначим через  $\varphi_{\kappa}$ , то получим условие максимума функции  $B$ :

$$A = \sqrt{\left(\frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{\operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}\right)^3 \frac{\varphi_{\kappa} \operatorname{ch} \varphi_{\kappa} - \operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}{\varphi_{\kappa} \operatorname{sh} \varphi_{\kappa} - \operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}}. \quad (27)$$

Предварительно заметим, что реальное решение уравнения (27) возможно только при

$$\varphi_{\kappa} \geq 1,19968.$$

По формуле (27) вычисляется значение  $\varphi_{\kappa}$ , для которого при данном значении  $A$  функция  $B$  будет максимальной. Подставляя значение  $\varphi_{\kappa}$  в уравнение (24), получим:

$$B_m = \frac{\varphi_{\kappa}}{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}} A \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{A \operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}\right)^2}. \quad (28)$$

Параметр цепной линии при предельной длине пролета определится на основании формул (11) и (26):

$$(h_0)_{l_n} = \frac{l_n}{2\varphi_{\kappa}} = \frac{hB_m}{2\varphi_{\kappa}} = \frac{1}{2} hP, \quad (29)$$

где

$$P = \frac{B_m}{\varphi_{\kappa}}. \quad (30)$$

Таким образом, для разных значений величины  $A$  (в пределах, которые уточним в последующем) пролет  $l_n$  при заданных значениях  $\sigma_m$ ,  $h$  и  $g$  можно определить в следующем порядке: посредством уравнения (27) находим значение  $\varphi_{\kappa}$  и, подставляя его в уравнение (28), определяем соответствующее значение  $B_m$ ; затем по формуле (26) вычисляем  $l_n$  и по формуле (29)  $(h_0)_{l_n}$ .

Но этот метод непрактичен, так как решить трансцендентное уравнение (27) можно только подбором, что связано с громоздкими вычислениями. Кроме того, при решении уравнений (27) и (28) придется пользоваться таблицами гиперболических функций. Однако этого можно избежать, если для вычисления величин  $B_m$  и  $P$  применить эмпирические формулы, выведенные на основе следующих соображений.

Для ряда соответственно подобранных рациональных значений  $\varphi_{\kappa}$  в пределах  $1,19968 \dots 1,3$  помощью уравнения (27) найдены значения  $A$  помощью уравнения (28) — значения  $B_m$  и с помощью уравнения (30) — значения  $P$ . Найдены таким путем  $\varphi_{\kappa}$ ,  $A$ ,  $B_m$  и  $P$  сведены в таблицу (см. приложение), на основании которой построены (рис. 2) графики функций  $\varphi_{\kappa} = f(A)$ ,  $B_m = F(A)$  и  $P = g(A)$  для интервала  $1,5 \leq A \leq 25$ .

Переходя к анализу названных функций, заметим, что значению аргумента  $x = 1,19968$  соответствуют значения гиперболических функций  $\operatorname{sh} x = 1,50888$  и  $\operatorname{ch} x = 1,81017$ ; для этих значений справедливо уравнение

$$x \operatorname{sh} x - \operatorname{ch} x = 0.$$

Следовательно, для  $\varphi_{\kappa} = 1,19968$  из уравнения (27) получим:

$$\lim_{\varphi_{\kappa} \rightarrow 1,19968} A = \infty.$$

Учтя, что  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{sh} x} = 1$  и представив уравнение (27) в виде

$$A = \sqrt{\left(\frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{\operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}\right)^3 \frac{\frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{\operatorname{sh} \varphi_{\kappa}} - \frac{1}{\varphi_{\kappa}}}{1 - \frac{1}{\varphi_{\kappa}} \frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{\operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}}}.$$

получим из него:

$$\lim_{\varphi_{\kappa} \rightarrow \infty} A = 1.$$

Следовательно, кривая  $\varphi_{\kappa} = f(A)$  (рис. 2) имеет горизонтальную асимптоту  $\varphi_{\kappa} = 1,19968$  и вертикальную асимптоту  $A = 1$ , т. е.  $A$  лежит в пределах  $1 < A < \infty$ , а  $\varphi_{\kappa}$  соответственно в пределах  $\infty > \varphi_{\kappa} > 1,19968$ .

Из уравнения (28) известным способом найдем уравнение асимптоты кривой  $B_m = F(A)$ :

$$\begin{aligned} y_{B_m} &= A \lim_{A \rightarrow \infty} \left(\frac{B_m}{A}\right) = A \left(\frac{\varphi_{\kappa}}{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}\right)_{\varphi_{\kappa} = 1,19968} = \\ &= \frac{1,19968}{1,81017} \cdot A = 0,66274A. \end{aligned}$$

Учитывая формулы (30) и (28), напишем уравнение функции  $P = g(A)$ :

$$P = \frac{A}{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}} \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}{A \operatorname{sh} \varphi_{\kappa}}\right)^2}. \quad (31)$$

Кривая  $P = g(A)$  (рис. 2) имеет асимптоту, которая может быть выражена уравнением

$$\begin{aligned} y_P &= A \lim_{A \rightarrow \infty} \left(\frac{P}{A}\right) = \left(\frac{A}{\operatorname{ch} \varphi_{\kappa}}\right)_{\varphi_{\kappa} = 1,19968} = \\ &= \frac{A}{1,81017} = 0,55243 \cdot A. \end{aligned}$$

По формуле (27) для  $\varphi_{\kappa} = 1,20100$  вычисляем  $A = 19,97959 \approx 20$ . Значениям  $A$  в интервале

$1,2010 < A < \infty$  соответствуют значения  $\varphi_\kappa$  в интервале  $1,2010 > \varphi_\kappa > 1,19968$ . В свою очередь этому интервалу значений  $\varphi_\kappa$  соответствуют значения  $\frac{\text{ch } \varphi_\kappa}{\text{sh } \varphi_\kappa}$ , находящиеся в интервале

$$1,19910 < \frac{\text{ch } \varphi_\kappa}{\text{sh } \varphi_\kappa} < 1,19968.$$

Параметр  $\frac{\varphi_\kappa}{\text{ch } \varphi_\kappa} = 0,66274$  не изменяется. Поэтому значений  $A \geq 20$  можно принять:

$$\frac{\varphi_\kappa}{\text{ch } \varphi_\kappa} = 0,66274 \text{ и } \frac{\text{ch } \varphi_\kappa}{\text{sh } \varphi_\kappa} = 1,2.$$

В уравнение (28) примет вид:

$$B_m = 0,66274A \sqrt{1 - \frac{1,44}{A^2}}$$

После известных упрощений:

$$B_m = 0,66274 \cdot A \left(1 - \frac{0,72}{A^2}\right) = 0,66274 \cdot A - \frac{0,4772}{A}.$$

По этой формуле значения  $B_m$  для  $A \geq 10$  являются практически точно. Такая же точность возможна и для  $A < 10$ , но за счет увеличения числа формул и их усложнения.

Чтобы иметь возможность пользоваться минимальным количеством возможно несложных, но достаточно точных и удобных для вычисления формул, примем для определения величины  $B_m$  следующие эмпирические формулы:

в интервала  $1,5 \leq A < 3,5$

$$B_{mэ} = 0,6625 A - \frac{0,4825}{A} - \frac{0,13}{A^4}; \quad (32)$$

в интервала  $3,5 \leq A < \infty$

$$B_{mэ} = 0,6625 A - \frac{0,4775}{A}. \quad (33)$$

Параметр  $(h_0)_{l_n}$  цепной линии провода, подвешенного в двух точках, расположенных на разной высоте, определяется по формуле (29); при необходимости знать величину  $P$ . Для вычисления последней принимаем следующие эмпирические формулы:

в интервала  $1,5 \leq A < 3,5$

$$P_s = 0,555 \cdot A - \frac{0,6975}{A} + \frac{0,145}{A^2}; \quad (34)$$

в интервала  $3,5 \leq A < \infty$

$$P_s = 0,5525 \cdot A - \frac{0,640}{A}. \quad (35)$$

Таким образом, для всех возможных значений  $A$  можно определить  $B_m$  по формулам (32) и (33),  $P$  — по формулам (34) и (35), предельную длину пролета  $l_n$  — по формуле (26) и параметр  $(h_0)_{l_n}$  — по формуле (29).

На основании формул (17) и (26) длина пролета подвешенного в точках, расположенных на одной высоте при предельном пролете,

$$(l)_{l_n} = h \sqrt{\left(B_m \frac{\text{sh } \varphi_\kappa}{\varphi_\kappa}\right)^2 + 1}. \quad (36)$$

При симметричной подвеске, т. е. подвеске в точках, расположенных на одинаковой высоте,  $h=0$ , и следовательно, на основании формулы (23)  $A = \infty$ . В этом случае, как показано выше,  $\varphi_\kappa = 1,19968$ ,  $\text{sh } \varphi_\kappa = 1,50888$ ,  $\text{ch } \varphi_\kappa = 1,81017$  и предельный пролет на основании формул (26), (28) и (23)

$$\begin{aligned} l_{nc} &= \lim_{A \rightarrow \infty} \left[ h A \frac{\varphi_\kappa}{\text{ch } \varphi_\kappa} \sqrt{1 - \left(\frac{\text{ch } \varphi_\kappa}{A \text{sh } \varphi_\kappa}\right)^2} \right] = \\ &= \frac{1,19968}{1,81017} \left(\frac{2\tau_m}{g} - h\right)_{h=0} = 1,3255 \frac{c_m}{g}. \quad (37) \end{aligned}$$

Параметр симметричной цепной линии при предельной длине пролета  $l_{nc}$  определяется на основании формул (29) и (31) из уравнения

$$\begin{aligned} (h_0)_{l_{nc}} &= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{hP}{2}\right) = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{A \rightarrow \infty} \left[ \frac{hA}{\text{ch } \varphi_\kappa} \sqrt{1 - \left(\frac{\text{ch } \varphi_\kappa}{A \text{sh } \varphi_\kappa}\right)^2} \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 1,81017} \left(\frac{2\tau_m}{g} - h\right)_{h=0} = 0,55243 \frac{c_m}{g}. \quad (38) \end{aligned}$$

Длина провода, подвешенного в двух точках, расположенных на одинаковой высоте ( $h=0$ ,  $A = \infty$ ), при предельном пролете  $l_{nc}$  на основании формул (17) и (37) определяется из уравнения

$$\begin{aligned} (l)_{l_{nc}} &= l_{nc} \left(\frac{\text{sh } \varphi_\kappa}{\varphi_\kappa}\right)_{\varphi_\kappa = 1,19968} = \\ &= \frac{1,3255 \cdot 1,50888}{1,19968} \cdot \frac{c_m}{g} = 1,6671 \frac{c_m}{g}. \quad (39) \end{aligned}$$

Отношение длины провода, подвешенного в двух точках, расположенных на одинаковой высоте, к предельному пролету

$$\frac{(l)_{l_{nc}}}{l_{nc}} = \frac{1,6671}{1,3255} = 1,2577. \quad (40)$$

Значения  $A$ ,  $B_m$  и  $P$ , приведенные в таблице (приложение), и требующиеся для их вычисления значения гиперболических функций  $\text{sh } \varphi_\kappa$  и  $\text{ch } \varphi_\kappa$  (в таблице не приведены) вычислены с помощью семизначных логарифмов. Значения  $A$ ,  $B_m$  и  $P$  округлены до пяти десятичных знаков.

Точные значения  $B_m$ , вычисленные по формуле (28), и значения  $P$ , вычисленные по формуле (30), в таблице сопоставлены со значениями  $B_{mэ}$ , вычисленными по эмпирическим формулам (32) и (33), и значениями  $P_s$ , вычисленными по эмпирическим формулам (34) и (35). Последние два значения вычислены на нормальной логарифмической линейке.

Как видно из этого сопоставления, погрешность  $\Delta B_m$  не превышает 0,25%, а погрешность  $\Delta P$  — 0,2%. Погрешности пролета и параметра соответственно равны погрешностям  $B_m$  и  $P$ .

Таким образом, вычисление предельного пролета  $l_n$  и параметра  $(h_0)_{l_n}$  по эмпирическим формулам сочетает простоту расчета с высокой точностью.

**Пример.** Рассчитать предельную длину пролета  $l_n$ , параметр цепной линии  $(h_0)_{l_n}$ , стрелы провисания  $f_1$  и  $f_2$ , напряжение  $\sigma_0$  в наинизшей точке провода, положение этой точки и длину  $(L)_{l_n}$  провода марки М-50. Допускаемое напряжение материала провода  $\sigma_m = 13 \text{ кг/м.м}^2$ , удельная нагрузка  $g = 41,73 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м.м.м}^2$  (IV район климатических условий), разность высот точек подвеса провода  $h = 100 \text{ м}$ .

Определяем характерную величину  $A$  по формуле (23):

$$A = \frac{2 \cdot 13 \cdot 10^3}{41,73 \cdot 100} - 1 = 5,23.$$

Вычисляем по формуле (33):

$$B_{мэ} = 0,6625 \cdot 5,23 - \frac{0,4775}{5,23} = 3,374;$$

по формуле (26):

$$l_n = 100 \cdot 3,374 = 337,4 \text{ м};$$

по формуле (35):

$$P_э = 0,5525 \cdot 5,23 - \frac{0,640}{5,23} = 2,766;$$

по формуле (29):

$$(h_0)_{l_n} = 50 \cdot 2,766 = 138,3 \text{ м};$$

по формуле (4):

$$\sigma_0 = 138,3 \cdot 41,73 \cdot 10^{-3} = 5,78 \text{ кг/м.м}^2;$$

по формуле (3):

$$h_m = \frac{13 \cdot 10^3}{41,73} = 311 \text{ м};$$

по формулам (18) и (19):

$$f_1 = 311 - 138,3 = 172,7 \text{ м}$$

и

$$f_2 = 172,7 - 100 = 72,7 \text{ м};$$

по формуле (8):

$$m = 138,3 \cdot \text{arch} \frac{311}{138,3} = 138,3 \cdot 2,303 \lg [2,25 + \sqrt{2,25^2 - 1}] = 138,3 \cdot 2,303 \cdot 0,63 = 201 \text{ м};$$

по формуле (30):

$$\varphi_k = \frac{3,374}{2,766} = 1,22;$$

по формуле (18):

$$\frac{\text{sh } \varphi_k}{\varphi_k} = 1 + \frac{1,49}{6} \left( 1 + \frac{1,49}{20} \right) = 1,267$$

и, наконец, по формуле (36):

$$(L)_{l_n} = 100 \cdot \sqrt{(3,374 \cdot 1,267)^2 + 1} = 439 \text{ м}.$$

Приложение. Таблица значений  $\varphi_k, A, B_m, B_{мэ}, P$  и  $F$

$\varphi_k$	$A$	$B_m$	$B_{мэ}$	$P$	$F$
1,500 00	1,497 45	0,644 55	0,645	0,429 70	0
1,450 00	1,606,86	0,745 14	0,745	0,513 89	0,1
1,420 00	1,691 78	0,820 00	0,820	0,577 46	0,2
1,400 00	1,759 69	0,878 28	0,878	0,627 34	0,3
1,385 00	1,818 27	0,927 58	0,928	0,669 73	0,4
1,375 00	1,861 74	0,963 65	0,963	0,700 84	0,5
1,360 00	1 934 93	1,023 52	1,024	0,752 59	0,6
1,348 30	2,000 03	1,075 95	1,076	0,798 00	0,7
1,335 00	2,084 62	1,143 07	1,143	0,856 23	0,8
1,320 00	2,197 21	1,230 92	1,231	0,932 52	0,9
1,305 00	2,334 40	1,336 04	1,336	1,023 79	1,0
1,290 00	2,505 12	1,464 47	1,464	1,135 25	1,1
1,280 00	2,645 70	1,568 59	1,568	1,225 46	1,2
1,270 00	2,816 09	1,693 23	1,693	1,333 25	1,3
1,261 20	3,000 10	1,826 20	1,825	1,447 99	1,4
1,252 60	3,223 37	1,985 84	1,985	1,585 37	1,5
1,250 00	3,302 13	2,041 74	2,04	1,633 39	1,6
1,244 50	3,491 05	2,175 13	2,17	1,747 79	1,7
1,238 80	3,728 18	2,341 32	2,34	1,889 99	1,8
1,233 50	4,001 03	2,531 22	2,53	2,052 06	2,0
1,226 25	4,500 92	2,876 10	3,88	2,345 44	2,3
1,221 10	5,002 47	3,219 37	3,22	2,636 45	2,6
1,217 45	5,484 14	3,547 13	3,55	2,913 57	2,9
1,214 49	6,000 11	3 896 68	3,90	3,208 49	3,2
1,212 25	6,506 85	4,238 79	4,24	3,496 63	3,5
1,210 50	7,008 50	4,576 56	4,58	3,780 72	3,8
1,209 10	7,506 86	4,911 40	4,91	4,062 03	4,0
1,207 94	8,012 78	5,250 74	5,25	4,346 85	4,3
1,207 02	8,496 90	5,575 01	5,57	4,618 82	4,6
1,206 20	9,012 42	5,919 89	5,92	4,907 88	4,9
1,204 95	10,015 76	6,590 18	6,59	5,469 26	5,4
1,204 04	10,993 87	7,242 68	7,24	6,015 32	6,0
1,203 35	11,997 38	7,911 39	7,91	6,574 47	6,5
1,202 58	13,491,86	8 906 27	8,90	7,405 97	7,4
1,202 00	15,080 06	9,962 56	9,96	8,288 32	8,3
1,201 50	17,020 34	11,252 09	11,25	9,365 04	9,3
1,201 00	19,979 59	13,217 46	13,22	11,005 38	11,0
1,200 52	25,033 38	16,571 65	16,57	13,803 73	13,8
1,200 00	40,492 00	26,824 03	26,8	22,353 36	22,3
1,199 79	68,719 72	45,536 64	45,5	37,953 84	38,0
1,199 73	100,950 53	66,899 60	66,9	55,762 21	55,9
1,199 70	156,590 90	103,776 51	103,8	86,502 05	86,5
1,199 69	213,122 89	141,243 55	141,2	117,733 37	117,7
1,199 68	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

<sup>1</sup> См. А. А. Глазунов. Сети электрических систем. Госэнергиздат, 1947.



# Вопросы электрооборудования быстроходных лифтов постоянного тока

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Москва

Историческая справка. Первые подъемники с приводом от паровой машины появились во второй половине прошлого столетия. Лифт с гидравлическим приводом был изобретен в 1872 г., с электрическим приводом —

в 1880 г. (Маннгейм, Германия). В 1887 г. появились лифты с электрическим приводом и червячным редуктором. Безредукторный электрический лифт был впервые применен в 1902 г. в здании Чикагского театра. Установки с широко автоматизированным управлением лифта, послужившая образцом для дальнейших разработок, появилась в 1924 г. Выход пор в систему управления лифтами внесло много усовершенствований. В сочетании со шкивом генератор—двигатель эти улучшения позволили довести скорость современных пассажирских лифтов до 1 м/сек.

В нашей стране основы лифтостроения были заложены давно. Известно, что еще в XIX в. в Петербургский металлический завод долгое время был изготовителем гидравлических лифтов. Электрические лифты изготовлялись рядом русских заводов, на технических традициях которых на основе собственного опыта развивается в наше время советское лифтостроение.

Широкое строительство многоэтажных зданий интенсивно реконструируемых и восстанавливаемых городов создает предпосылки для успешного развития этой отрасли привода в Советском Союзе. В высотных жилых и административных зданиях запроектированы наиболее совершенные лифты. В Московском государственном университете число лифтов<sup>1</sup> в учебных и жилых зданиях этого здания достигает 102; суммарная установленная мощность лифтов составляет около 1000 квт.

Схематическая схема и скоростные характеристики лифтов. Различают три категории лифтов: 1) пассажирские; 2) грузовые, в которых предусмотрено, однако, наличие сопровождающего

Электрооборудование быстроходных лифтов для высотных зданий является сравнительно новой отраслью техники, успешное развитие которой проходит в СССР на высоком техническом уровне. Статья является обзором, отражающим современную практику в этой области электропривода и дающим анализ основных вопросов проектирования, электрооборудования лифтов — выбора рациональной диаграммы работы лифта и характеристики двигателя, величин ускорения и замедления и т. д.

персонала и имеются нормальные предохранительные средства; 3) служебные или специального назначения лифты с высотой кабины около 0,75 м, предусмотренные для транспорта, например книг, медицинской одежды и т. п.

Наибольшая скорость пассажирских лифтов в Европе доведена до 3 ... 3,5 м/сек. Скорость грузовых лифтов редко превосходит 0,75...1 м/сек.

Раньше передача движения от электродвигателя к кабине осуществлялась посредством барабана с прикрепленными к нему двумя канатами — от кабины и от противовеса. По мере увеличения высоты зданий увеличивались длина канатов и ширина барабанов. В современных лифтах высотных зданий взамен барабанов применяются канатопроводящие шкивы. Усилие, необходимое для подъема кабины или противовеса, передается трением между шкивом и канатами. Для увеличения угла обхвата и силы трения, кроме основного канатопроводящего шкива, применяется еще второй отводный шкив (рис. 1). Угол обхвата шкивов получается около 360°; такой способ расположения канатов называется системой «двойного обхвата».

По ряду причин наиболее целесообразно располагать машинное помещение лифта над шах-

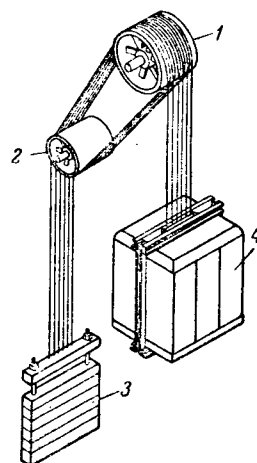


Рис. 1. Схема расположения лифта при установке привода сверху.

1 — канатопроводящий шкив; 2 — отводный шкив; 3 — противовес; 4 — кабина.

Для сравнения укажем, что наиболее мощное в лифтовое оборудование здания „Рокфеллер — центр“ из 75 лифтов.

той лифта. В частности, при таком расположении машин канаты оказываются короче, чем при расположении их внизу; число отводов (обходов в сторону) канатов сводится к минимуму, в связи с чем уменьшается число шкивов и общая стоимость лифта снижается.

Для пассажирских лифтов расчетная нагрузка изменяется от 300 кг для лифта с четырьмя пассажирами до 2000 кг для лифта с 26 пассажирами. Иногда по специальным условиям задаются еще более высокими расчетными нагрузками. Номинальная грузоподъемность пассажирского лифта в СССР определяется, исходя из веса одного пассажира 80 кг; в США принята близкая величина в 75 кг. Площадь кабины лифта колеблется от 0,2 м<sup>2</sup> на одного пассажира в лифте с номинальной грузоподъемностью 300 кг до 0,15 м<sup>2</sup> на одного пассажира в лифте с номинальной грузоподъемностью 2000 кг. В небольших жилых зданиях достаточна скорость кабины пассажирских лифтов в 0,5 м/сек, в больших жилых зданиях, административных, в гостиницах и т. п. необходимы более высокие скорости.

Представление о соотношении между числом этажей здания и применяемой скоростью кабины дает следующая таблица:

Число этажей	Скорость, м/сек
4	0,75 . . . 1
5 . . . 6	1 . . . 1,5
7 . . . 10	1,5 . . . 2
10 . . . 12	2 . . . 2,5
больше 12	не менее 2,5 . . . 3

Вопрос о скоростных характеристиках лифта, обеспечивающих надлежащую его работу, является основным, а потому на нем следует остановиться подробнее.

*Скоростные характеристики лифта в функции его нагрузки.* Существуют два уровня скорости приводного двигателя лифта: а) скорость нормального движения  $v_n$ ; и б) остановочная скорость  $v_0 \approx 0,1 \cdot v_n$ ; она же обычно и скорость при ревизии канатов. В некоторых системах лифтов вводятся еще 1...2 предварительные ступени скорости для замедления. Скорость при нормальном движении должна оставаться, по возможности, постоянной как при двигательном, так и при генераторном режиме независимо от нагрузки кабины и двигателя. Другими словами, механическая характеристика двигателя должна быть возможно более жесткой, приближаясь к горизонтальной линии. При обычном регулировании по системе генератор — двигатель механическая характеристика при пониженной (остановочной) скорости остается подобной характеристике на основной скорости, т. е. смещается параллельно самой себе.

Для компенсации изменения скорости с нагрузкой в электродвигателях и в технике электропривода лифтов получили широкое применение схемы с обратной связью по току, осуществляемые бустерными схемами с использованием электромашинных усилителей (см. ниже).

*Оптимальный график движения.* Из возможности строго аналитически подойти к вопросу о выборе рациональной с точки зрения производительности диаграммы скорости и перемещения кабины  $h$ , максимальной скорости  $v_{\max}$ , продолжительности перемещения  $T$  мы рассмотрим следующую общую задачу. Требуется совершить подъем на высоту  $h$  за время  $T$  максимальной скорости  $v_{\max}$ , скорости в начале и в конце подъема должны быть равны нулю. Каким должен быть закон движения, т. е. функция  $v=f(t)$ , чтобы на протяжении всего пути ускорение  $a = \frac{dv}{dt}$  наименее уклонялось от нуля. Предполагая кривую скорости для всего пути симметричной, нужно найти минимум  $a$ , при этом функция  $a(t)$  подчинена следующим условиям [Л. 2]:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} a(t) dt = v_{\max}, \quad \int_0^{\frac{T}{2}} t a(t) dt = \frac{T}{2} v_{\max} - \frac{h}{2},$$

причем

$$a(t) \geq 0, \quad 0 < t < \frac{T}{2}.$$

Первая задача такого рода была поставлена и решена знаменитым русским математиком П. Л. Чебышевым и впоследствии обобщена акад. А. А. Марковым. На основании выводов А. А. Маркова можно утверждать, что из всех возможных подчиненных условий кривых скорости  $v=f(t)$  наименьший пик ускорения обеспечивает разрывная функция:

$$a(t) = a_0 \text{ в интервале } 0 \leq t \leq aT,$$

$$a(t) = 0 \text{ в интервале } aT < t \leq \frac{T}{2}.$$

По этим данным на рис. 2 построен график  $a(t)$ , а по нему — и график  $v=v(t)$ , представляющий собой равнобокую трапецию. Величины  $a_0$  и  $v_{\max}$  находятся по основным заданиям: так как площадь графика ускорений дает  $v_{\max}$ , а площадь графика скоростей дает половину пути  $\frac{h}{2}$ , то имеем два уравнения:

$$a_0 a T = v_{\max},$$

$$\frac{1}{2} v_{\max} T (1 - a) = \frac{h}{2}.$$

Исключая из обоих уравнений величину  $a$ , получим связь между  $a_0$  и  $v_{\max}$  в такой форме:

$$v_{\max} = \frac{a_0 T}{2} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{h}{a_0 T^2}} \right\} = f(a_0).$$

Из двух знаков нужно сохранить плюс. Когда подкоренное выражение в формуле (3) обращается в нуль,

$$v_{\max} = \frac{a_0 T}{2}.$$

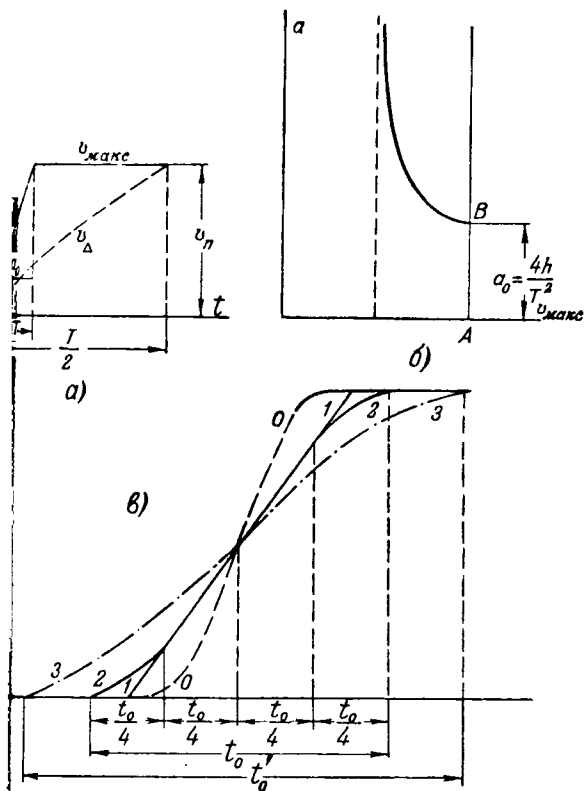


Рис. 2.

этих значениях  $a_0$  и  $v$  график скорости ( $t$ ) превращается из трапеции в треугольник. Если заданы  $h$ ,  $T$  и  $v_{\max}$ , то из уравнений (1) и (2) найдем:

$$a = 1 - \frac{h}{T \cdot v_{\max}}, \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{v_{\max}^2}{T v_{\max} - h}. \quad (6)$$

Зависимость между  $a_0$  и  $v_{\max}$  по (6) представлена на рис. 2, б.

Если заданы  $h$ ,  $v_{\max}$  и  $a_0$ , то из уравнений (1) и (2) найдем:

$$a = \frac{v_{\max}^2}{h \tau_0 + v_{\max}^2}, \quad (7)$$

$$T = \frac{h}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{a_0}, \quad (8)$$

При треугольном графике скорости и  $v_n = v_{\max}$  имеют место очевидные соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \text{путь } h &= v_n t_0, \\ \text{ускорение } a &= \frac{v_n}{t_0}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для полного использования преимуществ быстрого лифта необходимо, чтобы его разгон и торможение совершались в возможно более короткое время. Однако этому противоречат требования плавности и комфортабельности движения и

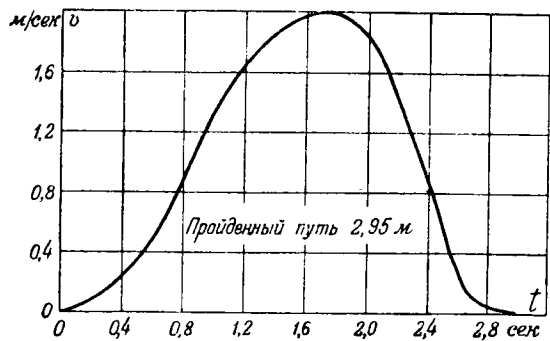


Рис. 3. Примерная кривая скорости в функции времени безредукторного электропривода при системе генератор—двигатель.

отсутствия неприятных ощущений для пассажиров.

Многочисленные наблюдения показали, что ощущения пассажиров зависят не от величины скорости и не столько от величины ускорения (в известных пределах), сколько и главным образом от темпа изменения ускорения или от так называемого „рывка“,  $r = \frac{d^2 a}{dt^2}$ . Оптимальная величина этого физиологического фактора еще окончательно не выяснена. Однако установлены следующие положения:

1. Допустимое ускорение зависит от вида диаграммы скорости и «рывка». В лифтах, управляемых по наиболее совершенной схеме с двигателями постоянного тока, могут быть допущены ускорения порядка 2...3 м/сек<sup>2</sup>.

2. Замедление может быть несколько выше ускорения, примерно в 1,25...1,5 раза. Следовательно, при максимально допустимых ускорениях 2...3 м/сек<sup>2</sup> замедление может составить 3...3,75 м/сек<sup>2</sup>, что имеет существенное значение для производительности лифта и для расстановки конечных выключателей по высоте. На рис. 3 показана кривая скорости безредукторного привода, для которой максимальное ускорение составляет 2 м/сек<sup>2</sup>, а замедление 3 м/сек<sup>2</sup>. Объяснение тому факту, что для замедления допустимы более высокие значения, следует искать в большем ощущении надежности у пассажира в процессе замедления.

Разумеется, что для полного обоснования этих положений необходима постановка соответствующих опытов и исследований, в том числе физиологических.

Возможные кривые ускорения и замедления лифтов представлены на рис. 4. Пуктирная кривая В изображает ту кривую скорости, которая чаще всего имеет место на практике у действующих лифтов: нарастание скорости в начале процесса происходит слишком быстро, а темп изменения ускорения не остается постоянным. Для сохранения комфорта при движении кривая В должна быть растянута ширирь и принять вид, например, кривой С. Но при этом время разгона увеличивается. Аналогичные кривые D и E для процесса замедления показаны в правой части рис. 4.



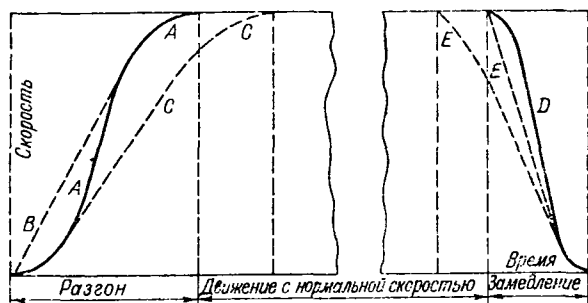


Рис. 4.

Рассмотренный ранее график движения лифта в виде трапеции является оптимальным по продолжительности разгона, однако он не удовлетворяет основному требованию электропривода лифта — комфортабельности, так как «рывок»  $r$  нарастает не плавно, а возникает сразу же в момент пуска лифта. Поэтому оптимальный график требует в этом смысле корректива. Наилучшая кривая, обеспечивающая плавный переход от состояния покоя до полной скорости, должна иметь вид латинской буквы S (кривая естественного роста и насыщения). Были попытки дать аналитическое выражение кривой скорости лифта в функции времени  $v = f(t)$ . Например, предлагались кривые вида:

$$v = k_1 t^2 \text{ (парабола),}$$

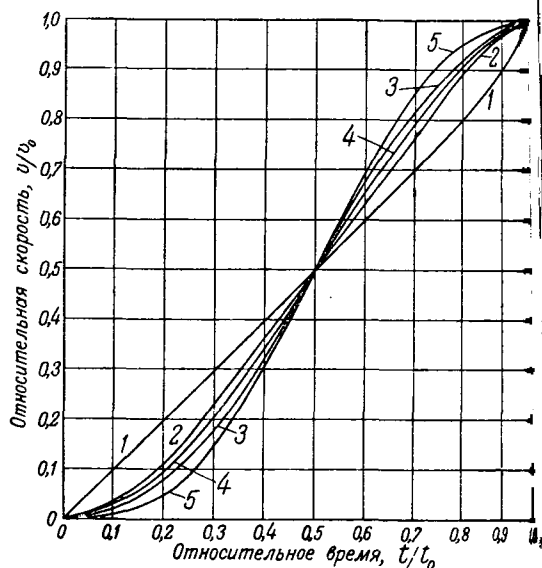


Рис. 5. Сравнение скоростных диаграмм для лифта: 1 — треугольная; 2 — комбинированная (парабола + прямая); 3 — параболическая; 4 — гармоническая; 5 — циклоидальная.

$$v = k_1 t^2 - k_2 t^3 \text{ (кубическая кривая),}$$

$$v = k_1 t^2 - k_2 t^4 + k_3 t^6 \text{ (косинусоида).}$$

При надлежащем подборе коэффициентов три кривые близки. Однако, если построить кривые первой и второй производных по скорости оказывается, что парабола дает наимень-

Сравнение показателей пяти скоростных диаграмм для лифтов

Табл.

Вид диаграммы скорости	1. Треугольная	2. Комбинированная (парабола + прямые)	3. Параболическая	4. Гармоническая	5. Циклоидальная
Аналитическое выражение скорости в относительных единицах $\omega = f(\tau)$	$\omega = \tau$	$\omega = \frac{8}{3}\tau^2, (1 - \omega) = \frac{8}{3}(1 - \tau)^2, \omega = \frac{1}{6}(8\tau - 1)$	$\omega = 2\tau^2, (1 - \omega) = 2(1 - \tau)^2$	$\omega = \frac{1}{2}(1 - \cos \pi\tau)$	$\omega = \tau - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi\tau$
Максимальное ускорение $a_{\max}$	$\frac{v_0}{t_0}$	$1,33 \frac{v_0}{t_0}$	$2 \frac{v_0}{t_0}$	$1,57 \frac{v_0}{\tau_0}$	$\frac{v_0}{2\tau_0}$
Максимальный рывок $r_{\max}$	$\infty$	$\pm 5,33 \frac{v_0}{t_0^2}$	$\pm 4 \frac{v_0}{t_0^2}$	$\pm 4,95 \frac{v_0}{t_0^2}$	$\pm 6,28 \frac{v_0}{t_0^2}$
Путь $h$ до выхода на полную скорость	$0,5 v_0 t_0$	$0,195 v_0 t_0$	$0,167 v_0 t_0$	$0,341 v_0 t_0$	$0,5 v_0 t_0$
Время $t_0$ прохождения пути $h$	$2 \frac{h}{v_0}$	$5,15 \frac{h}{v_0}$	$6 \frac{h}{v_0}$	$2,93 \frac{h}{v_0}$	$2 \frac{h}{v_0}$
Аналитическая характеристика	$v_0^2 = 2ha_{\max}$	$v_0^2 = 3,87 ha_{\max}$ или $v_0^3 = 4,92 h^2 r_{\max}$	$v_0^2 = 3ha_{\max}$ или $v_0^3 = 8,92 h^2 r_{\max}$	$v_0^2 = 1,87 ha_{\max}$ или $v_0^3 = 1,74 h^2 r_{\max}$	$v_0^2 = ha_{\max}$ или $v_0^3 = 0,636 h^2 r_{\max}$

Обозначения:  $\omega = \frac{v}{v_0}, \tau = \frac{t}{t_0}, v_0$  — максимальная или установившаяся скорость;

$t_0$  — время, за которое кабина достигает установившейся скорости.

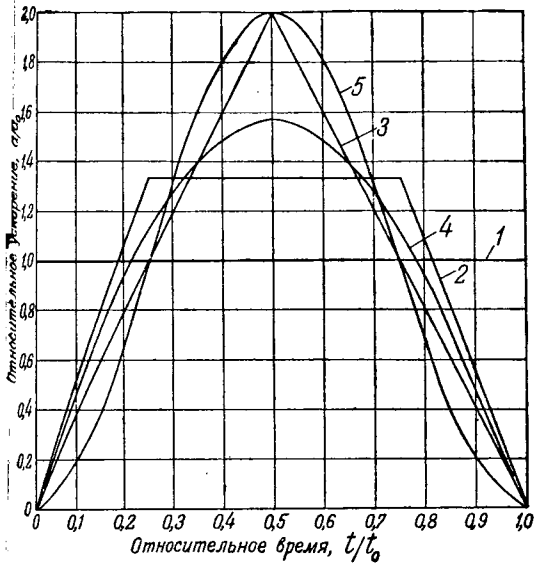


Рис. 6. Сравнение диаграмм ускорений для пяти вариантов рис. 5.

рение и наименьший рывок; кубическая кривая — наименьшее ускорение и наибольший рывок, а косинусоида занимает среднее положение между параболой и кубической кривой. Таким образом, параболическая кривая обеспечивает большее ускорение при наименьшем рывке и может рассматриваться как оптимальная кривая разгона.

Практически не так уже существенно, чтобы параболическая зависимость соблюдалась во все время разгона. Повидимому, достаточно, если будет сохраняться в течение 0,5 сек в начале разгона и 0,5 сек в конце кривой разгона. Между этими точками скорость может возрастать линейно.

Исходя из этих соображений, практика идет по компромиссному пути: на протяжении первой четверти времени разгона осуществляется параболическая диаграмма, а на протяжении второй и третьей четверти — линейная диаграмма скорости (кривая 2-2 на рис. 2, в).

Из предыдущего ясно, что правильный выбор диаграммы скорости  $v = f(t)$  и ее соблюдение на протяжении лифта имеют решающее значение качества работы лифта. Для анализа этого вопроса было исследовано 5 диаграмм  $v = f(t)$ , данных в относительных единицах на рис. 5. Выше ускорения для этих диаграмм показаны на рис. 6, кривые рывка — на рис. 7.

Сопоставление результатов приведено в табл. 1. Из табл. 1 и из рис. 5, 6 и 7 следует важный вывод: несмотря на большую близость и чуть ли полную идентичность кривых скорости 2, 3, 4 и 5 кривые их ускорения (рис. 6) существенно отличаются между собой, а кривые рывка (рис. 7) — совершенно расходятся.

Наименьшее максимальное ускорение (наименьшую крутизну в диаграмме скорости) имеет прямая линия, за ней следует комбинированная парабола, затем гармоническая и за ней — параболическая и циклоидальная, имеющие одина-

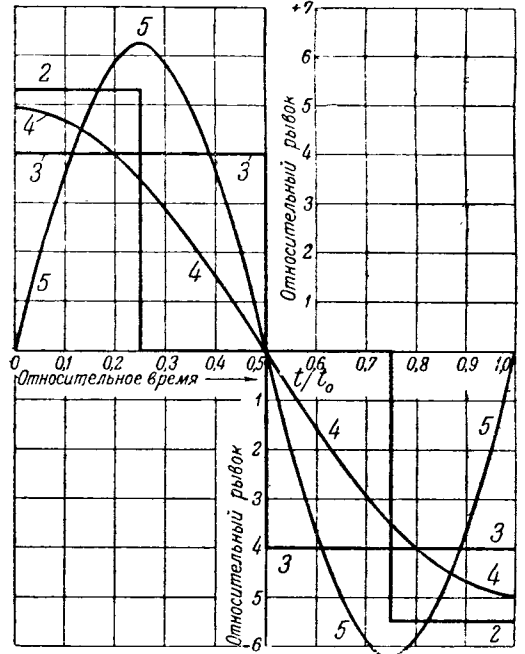


Рис. 7. Сравнение диаграмм рывков для пяти вариантов рис. 5.

ковую наибольшую крутизну. Рывок, наблюдающийся в треугольной диаграмме, совершенно неприемлем; наиболее равномерно рывок распределяется в гармонической и циклоидальной диаграммах.

**Оборудование лифтов.** Электродвигатели для лифтов могут быть снабжены редуктором (при скорости кабины  $< 1,75$  м/сек) или непосредственно связаны с рабочим валом лифта.

Безредукторные машины представляют собой тихоходные двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, с номинальной скоростью вращения от 50 до 150 об/мин. Типовые показатели электропривода лифтов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характерные показатели некоторых существующих установок лифтов**

Тип привода	Нагрузка, кг	Скорость кабины, м/сек	Диаметр шкива, мм	Передач-ное отно-шение ре-дуктора	Скорость двигателя, об/мин	Мощность двигателя, л. с.
Редуктор-ный	300	0,5	400	54:1	1 300	3,25
	450	0,75	600	50:1	1 200/1 900	5,5
	600	1,0	675	28,5:1	800/1 900	9
	1 250	1,5	750	21,25:1	800*	25
Безредук-торный	1 000	2	750	—	102*	19,5
	2 000	3	900	—	64*	56

\* Управление по системе генератор—двигатель.

Вал якоря двигателя должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать веса тормозного барабана, движущего канатного шкива, якоря, кабины, противовеса и канатов, а также выдерживать тяжение канатов от вспомогательного шкива и

динамическую нагрузку на вал при пуске лифта в ход, при толчках и т. д. Тормозной обод является неотъемлемой составной частью движущего шкива, который часто бывает непосредственно приболчен к фланцу, высаженному на валу двигателя, что делает излишним шпоночное крепление.

Наиболее совершенной системой электропривода лифта в сети переменного тока является система генератор — двигатель с приводным двигателем постоянного тока, питаемым от преобразовательного агрегата. В современных лифтовых установках, питаемых от сети переменного тока, встречается применение тиратронов и ртутных выпрямителей. Например, в 1948 г. в Англии было выполнено электрооборудование лифтов с двигателями постоянного тока в 15 и 18 л. с., управляемыми тиратронами. Известны установки лифтов, в которых применены двигатели постоянного тока, питаемые от ртутных или селеновых выпрямителей. Однако они не получили широкого распространения ввиду невозможности непосредственной рекуперации энергии в сеть при торможении двигателя, а также вследствие относительной сложности ухода за ртутным выпрямителем.

Большинство лифтов работает с противовесами. Обычно принято уравнивать кабину лифта и 40% номинальной полезной нагрузки. Общий механический к. п. д. меняется от 30% для маленьких лифтов до 75% для высокоскоростных лифтов с безредукторным двигателем. Мощность двигателя лифта при установившейся скорости

$$P = \frac{100 - \beta}{100} \frac{Qv}{102} \frac{100}{\eta} \text{ квт,}$$

где  $\beta$  — неуравновешенность, %;  
 $Q$  — номинальная нагрузка, кг;  
 $v$  — скорость кабины, м/сек;  
 $\eta$  — механический к. п. д., %.

Статическое трение и инерция лифта относительно велики, поэтому необходим высокий начальный момент двигателя.

*Управление по системе генератор—двигатель.* При пуске вниз тяжело нагруженной кабины двигатель лифта превращается в генератор, питающий энергией основной генератор, обращаясь в двигатель. Скорость кабины не может расти быстрее, чем напряжение управляющего генератора. При пуске груженой кабины вверх двигатель лифта может получать энергию для ускорения только в таком темпе, в каком нарастает поле генератора. Поэтому, очевидно, что при всех условиях нагрузки характер изменения ускорения остается приблизительно одним и тем же и зависит от скорости нарастания поля генератора.

Темпы ускорения и замедления могут регулироваться путем надлежащего изменения постоянной времени контура возбуждения управляющего генератора. Однако идеальная кривая скорости при разгоне вида S не может быть получена непосредственно при нормальной схеме генератор—двигатель. При включении обмотки возбуждения

генератора на полное напряжение поле генератора вначале растет быстро, затем рост постепенно замедляется, следуя экспоненциальной кривой. Таким образом, при непосредственном включении возбуждения только конечный участок кривой скорости приближается к идеальной; начальный же участок дает слишком резкое нарастание скорости.

Для улучшения кривой скорости в начальной части на практике применялись различные искусственные меры, но они имеют сейчас, после появления электромашинных усилителей, чисто исторический интерес как этапы развития электропривода лифтов.

Применение электромашинных усилителей существенно улучшает систему управления лифтом. Оборудуемые сейчас в СССР скоростные лифты для высотных зданий управляются по системе генератор—двигатель с электромашинным усилителем по оригинальной схеме, разработанной лауреатом Сталинской премии инж. В. С. Турным. В лифтах, обслуживаемых проводным преобразовательным агрегатом системы обычно пускается в ход и останавливается проводник из кабины. Во время работы лифта преобразовательный агрегат находится в постоянном вращении.

Существуют различные способы регулирования возбуждения генератора. Наиболее простое но не вполне совершенное — контактное управление ступенями сопротивления в цепи возбуждения. Индуктивность обмотки возбуждения обуславливает постепенное изменение тока благодаря чему достигается плавное изменение скорости лифта. Регулирование интервалов времени между срабатыванием контакторов может быть достигнуто посредством включения индуктивностей в цепь катушки контактора или с помощью реле времени.

*Применение электромашинных усилителей.* Для быстроходных лифтов со скоростями до 2 м/сек и выше стали применять схемы управления по системе генератор — двигатель с электромашинными усилителями с критическим самовозбуждением. Электромашинные усилители, изготовляемые в СССР, представляют собой более совершенный тип усилителя.

Электрооборудование для скоростных лифтов высотных зданий Москвы обеспечивает скорость кабины, в 5...7 раз превосходящие скорость передвижения в существующих лифтах старых зданий. Электрическая схема построена как система автоматического регулирования по замкнутому контуру с управлением по скорости, ускорению и «рывку».

*Способы регулирования скорости двигателя.* Из основной формулы, определяющей потребляемую мощность двигателя лифта как подъемного механизма, следует зависимость

$$P \propto Qv \propto v;$$

мощность двигателя должна изменяться пропорционально его скорости. Такая зависимость осуществляется системой генератор—двигатель (системой с постоянным моментом), напри-

ригодной системой регулирования в данном случае. Иногда верхнюю часть общего диапазона регулирования осуществляют путем изменения частоты двигателя (шунтовое регулирование). Такое регулирование нецелесообразно для двигателей лифтов, так как оно происходит при постоянной мощности, а не при постоянном моменте. Получающиеся при этом соотношения для ступеней скорости 2,5 и 3,5 м/сек хорошо иллюстрируются следующими цифрами.

Регулирование по схеме генератор—двигатель во всем диапазоне от 0 до 100% скорости:

$$P_a = 100\%, n_a = 140\%, M_a = 71\% = \text{пост.}$$

Смешанное регулирование—до 100% скорости генератор—двигатель, от 100 до 140%—магнитным потоком:

$$P_a = 100\%, n_a = 100/140\%, M_a = 100/71\%.$$

Смешанное регулирование, но момент при полной скорости принят 100%:

$$P_a = 140\%, n_a = 100/140\%, M_a = 140/100\%.$$

Номинальные моменты двигателей для этих ступеней относятся, как 0,71 : 1 : 1,4. Таким образом, при смешанном регулировании двигатель работает приблизительно на 40% больше, чем при регулировании только по системе генератор—двигатель для данных ступеней скорости 2,5 и 3,5 м/сек. Далее, при смешанном регулировании скорость двигателя перестает быть пропорциональной напряжению генератора, что усложняет управление скоростью и систему ее стабилизации. Существенным недостатком является вторым недостатком смешанной системы регулирования.

Следует заметить, что регулирование магнитным потоком использовалось в лифтовых двигателях в дополнение к регулированию по схеме генератор—двигатель для расширения общего диапазона скоростей, который не мог быть переделан только регулированием по этой схеме. При введении схемы управления с электромагнитными усилителями этот недостаток системы генератор—двигатель устраняется, следовательно, возможность в таком невыгодном способе регулирования магнитным потоком для двигателей лифтов отпадает. Регулирование магнитным потоком применяется в лифтах иногда для иных целей—например для создания плавности на некоторых участках диаграммы скорости.

**Система управления лифтом.** Управление лифтом осуществляется в кабине. Это—наиболее удобная система управления и требует активного участия в управлении проводника лифта. При этой системе проводник может управлять движением лифта посредством выключателя, находящегося внутри кабины. Несмотря на свою активность, система за границей имеет широ-

кое распространение. Пассажирские лифты в СССР не имеют находящейся на таком низком уровне системы управления.

Управление выключателем в кабине с автоматической остановкой. Эта система облегчает работу проводника. Кабина лифта пускается в ход посредством кабинного выключателя. Остановка кабины на нужном уровне происходит под действием концевых выключателей, смонтированных на корпусе кабины и управляемых кулачками, установленными в шахте на каждом этаже.

**Индивидуальное кнопочное управление.** При индивидуальном кнопочном управлении проводник не нужен, так как cabina может быть вызвана нажатием кнопки, находящейся у каждого места посадки, или же может быть направлена на тот или иной этаж нажатием соответствующей кнопки внутри кабины лифта. Автоматическая остановка кабины обеспечивается посредством концевых выключателей, установленных в шахте. В каждый момент времени cabina выполняет только какой-нибудь один приказ или вызов. Система имеет наиболее широкое распространение.

**Собирательное кнопочное управление.** Недостаток индивидуального кнопочного управления, особенно для многоэтажных зданий, состоит в том, что cabina лифта проходит по своему назначению, не останавливаясь на промежуточных этажах, где могли бы войти пассажиры. Для устранения этого неудобства было разработано так называемое «собирательное» управление, представляющее собой наиболее совершенную систему управления лифтами для самых высоких зданий. Эта система позволяет собирать, суммировать вызовы, сделанные кнопками как из кабины, так и с этажных площадок. Все вызовы в порядке последовательности этажей выполняются кабиной, останавливающейся на тех этажах, для которых зарегистрирован вызов.

Для того чтобы cabina не останавливалась на этажах без соответствующей надобности, на каждом этаже предусмотрены кнопки «вверх» и «вниз», а на конечных этажах—кнопки только «вверх» или только «вниз». Если лифт останавливается на этажной площадке, на которой одни желают подняться, а другие—спуститься, то cabina сначала забирает пассажиров, сделавших вызовы в направлении ее движения, а вызовы в противоположном направлении остаются зарегистрированными и удовлетворяются лифтом на обратном пути. В СССР собирательное управление будет основным видом управления лифтами для высотных зданий.

**Сигнализация на лифтах и управление группой лифтов.** Для наилучшего использования группы лифтов в современных крупных зданиях необходимо применять кабины с высокой скоростью движения, снабженные дверьми с автоматическим управлением. В таких крупных зданиях с группами лифтов проводники являются необходимыми, по крайней мере, в ча-

сы «пик», но очень важно, чтобы как можно больше нормальных функций проводника было автоматизировано.

При входе в кабину лифта пассажиры сообщают проводнику нужный им этаж, и проводник нажимает соответствующие кнопки. Затем проводник поворачивает пусковую рукоятку, и двери кабины и шахты автоматически закрываются; происходит пуск.

Если сделан заказ на остановку на каком-либо промежуточном этаже по пути движения кабины, то на этом этаже произойдут автоматически остановка кабины и открытие дверей. Порядок, в котором производится нажатие кнопок как в кабине, так и на этажах, не играет роли; кабины лифтов выполняют заказы в порядке следования этажей по пути движения.

Как было уже указано, остановка кабины не зависит от проводника. Однако он может, нажав кнопку безостановочного движения, перекрыть требование (заказ) на остановку, если cabina оказывается заполненной до нормы. В этом случае заказ выполняется соседним лифтом, работающим в том же направлении. При приближении кабины к этажной площадке, на которой должна быть остановка, над дверью шахты загорается светящийся сигнал, и ожидающие пассажиры узнают, какой из группы лифтов останавливается в данном этаже и направление движения лифта; этот сигнал гаснет, как только cabina покидает данную площадку. Описанная система управления и сигнализация лифта имеют много преимуществ. В высотных домах СССР осуществляется именно эта наиболее совершенная система управления.

**Лифты с автоматической точной остановкой.** В большинстве современных методов автоматического приведения в уровень предусматривается такая схема, что при подходе к этажу cabina продолжает двигаться на остановочной (пониженной) скорости до подхода к заданному уровню; если имеет место переход кабины за заданный уровень остановки, приводный двигатель автоматически реверсируется, пока не достигается остановка. Таким образом, всякое смещение, отклонение от заданного уровня, немедленно и автоматически выравнивается. В быстроходных лифтах применяются бесконтактные или индукционные концевые выключатели, укрепленные на корпусе кабины или в определенных местах по высоте шахты. Действие этих выключателей основано на изменении магнитной проницаемости сердечника при прохождении между его полюсами стальных пластин, укрепленных в шахте лифта перед каждой остановкой на этаже. Приблизительное местоположение концевых выключателей в зависимости от скорости кабины и от направления ее движения определяется табл. 3.

**Управление дверями кабины и шахты.** Ранее автоматическое открывание и закрывание дверей кабины и шахты осуществлялось сжатым воздухом. Однако шум и другие неудобства, связанные с пневматикой, привели к тому, что приблизительно с 1925 г. этот способ управления был оставлен. Перешли к чисто электрическому уп-

Табл.

Расстояние кабины от этажа (уровня пола) в момент встречи концевых выключателей кабины и шахты

Скорость кабины, м/сек	Движение вверх, м	Движение вниз, м	Скорость кабины, м/сек	Движение вверх, м	Движение вниз, м
4	5,15	5,46	3	3,24	3,55
3,75	4,65	4,86	2,75	2,94	3,25
3,5	4,13	4,36	2,5	2,64	2,95
3,25	3,65	3,85			

равлению. В некоторых установках лифтов применяются отдельные устройства для привода дверей лифта и шахты. В других установках двери управляются от общего приводного устройства, расположенного в верхней части кабины.

Часто двери кабины и шахты открываются электродвигателем, но закрываются под действием пружины, а конечное движение (замыкание) дверей контролируется масляным демпфером или путем динамического торможения электродвигателя.

У более медленно действующих приводов дверей движение дверей кабины передается дверям шахты посредством эксцентрика, укрепленного на двери кабины; эксцентрик так устроен, что освобождает защелку дверей шахты, как только двери начинают открываться.

**Радиопомехи.** При работе лифта помехи радиоприему могут возникнуть в сети и в проводах управления лифта. В основном эти помехи могут быть устранены путем включения на входе питающего фильтра в главную питающую сеть. Другим источником помех являются высокочастотные колебания, возникающие в гибком многожильном кабеле управления, который тянется от кабины до распределительного щитка. Эти помехи также могут быть устранены путем включения фильтров в цепи гибкого кабеля.

**Расход энергии.** На установках лифтов обычно принято измерять расход энергии количеством полных поездок (с наиболее низкого до самого высокого уровня), которое может совершить cabina лифта с полной нагрузкой, на 1 квтч израсходованной электроэнергии. Однако после введения системы генератор—двигатель для лифтов выяснилось, что этот способ оценки не учитывает потерь энергии холостого хода, а также потерь связанных с пусками и остановками лифта. Был предложен другой способ оценки расхода энергии: определяется количество киловаттчасов, расходуемых на 1 казино-километр при указанном числе остановок на 1 казино-километр. Из практики были получены такие цифры:

Система двигатель—генератор (киловаттчас на 1 казинокилометр)

Путь (км) кабины за 10 час. . . . .	5	8,25	16
240 остановок на 1 казино-километр . . . . .	6,9	5,45	5
60 остановок на 1 казино-километр . . . . .	6	4,2	3

На практике могут быть получены цифры расхода энергии, сильно отличающиеся от расчетов. Малый расход энергии является очевидным преимуществом, было бы ошибкой считать, что ты с наименьшим расходом энергии являются более экономичными или вообще наиболее эффективными.

В высотных зданиях Москвы лифты снабжены индукционными счетчиками, механически регистрирующими путь, проходимый кабиной, и количеством остановок.

**Выводы.** 1. Вопросы электропривода лифтов в высотных зданиях в Европе и в США разрабатываются в течение нескольких десятков лет, однако технический уровень этой отрасли электропривода так и остался невысоким. Ряд важных для разработки электропривода лифтов вопросов, как выбор рациональной диаграммы скорости, установление предельных величин ускорения при пуске, замедления при остановке, рывка и др., не исследован глубоко. Имеющиеся в этом вопросе рекомендации не обоснованы теоретическими, ни опытными материалами и носят эмпирический характер.

2. Если обратиться к вопросам собственно электропривода лифтов, то здесь также можно указать на ряд нецелесообразных решений, полученных, однако, применение в зарубежной практике. К числу таких решений относится смешанное управление — полем генератора и полем двигателя при питании электродвигателя лифта полем генератор — двигатель.

3. В электроприводе лифтов недостаточное внимание уделялось вопросам безопасности. Ос-

новным средством обеспечения безопасности является применение механических защитных аппаратов, сама же электрическая схема выполняется, и в том числе многими фирмами в США, с нарушением таких обязательных требований, как немедленное восстановление точного соответствия между положением кабины и показанием следящего за ним устройства при восстановлении лифтом работы после случайной остановки. Не соблюдается требование нормальной замкнутости элементов схемы, вызывающих замедление кабины на этажах.

4. При освоении производства лифтов в СССР имеется полная возможность не повторять ошибок и нецелесообразных решений, наблюдававшихся в истории лифтостроения в капиталистических странах. Электрооборудование лифтов в СССР разрабатывается на более высоком техническом уровне.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность В. С. Тулину, ценными указаниями которого он пользовался при составлении настоящей статьи.

#### Литература

1. Временные технические условия на лифтовые установки многоэтажных зданий в Москве. Государственное архитектурное издательство, М., 1949.
2. Я. Л. Геронимус. О законе подъема с наименьшим пиком ускорения. Сборник „Прикладная математика и механика“, № 5, 1947.
3. Journal of the Institution of Electrical Engineers of England, стр. 254, № 28, 1945.
4. Elektrotechnik und Maschinenbau, стр. 580—583, 1951.

[19.5.1952]



## Влияние активного сопротивления в цепи статора на характеристики асинхронной машины в генераторном режиме

Кандидат техн. наук А. П. КУБАЕВА

Московский энергетический институт им. Молотова

В ряде областей промышленности получают применение многоскоростные короткозамкнутые синхронные двигатели переключением числа полюсов. Часто переключение производится на ходу

Для иллюстрации этого процесса на рис. 1 приведены механические характеристики  $I$  и  $II$  двухскоростного двигателя. Переключению числа полюсов соответствует переход рабочей точки  $m_1$  в положение  $m_2$ . При этом двигатель переходит в генераторный режим. Последующий процесс торможения заканчивается в точке  $m_3$ , соответ-

*Показано, что в генераторном режиме в определенной зоне значений скольжения машина работает со значительным насыщением магнитной цепи. С введением в цепь статора дополнительного сопротивления степень насыщения может увеличиваться. Даны зависимости, позволяющие для заданного значения дополнительного сопротивления рассчитать кривую э. д. с. и механическую характеристику машины в генераторном режиме и определить величину ограничивающего сопротивления.*

ствующей статическому моменту на валу двигателя  $M_c$ . В процессе торможения при значениях скорости вращения  $n$ , момент принимает наибольшее значение  $M_k$  во много раз (4...6) превосходящее номинальный мо-

мент двигателя, что может оказаться опасным как для механизма, так и для самого двигателя.

В большинстве случаев для ограничения момента  $M_k$  желательно применить обычное сопротивление, включаемое последовательно с обмоткой статора. Правильный выбор сопротивления представляет собой достаточно трудную задачу. Целью

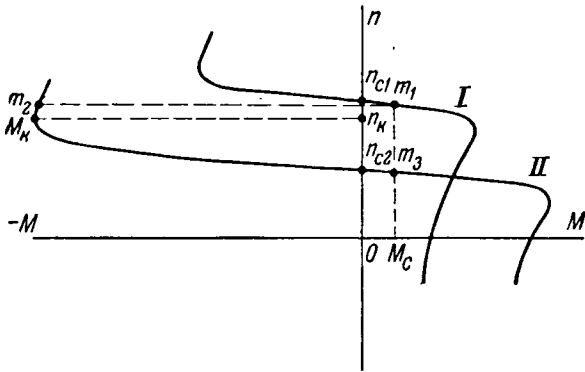


Рис. 1.

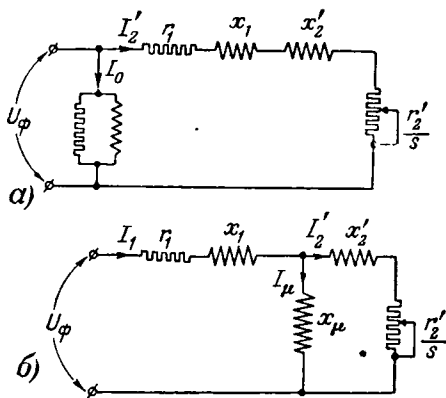


Рис. 2.

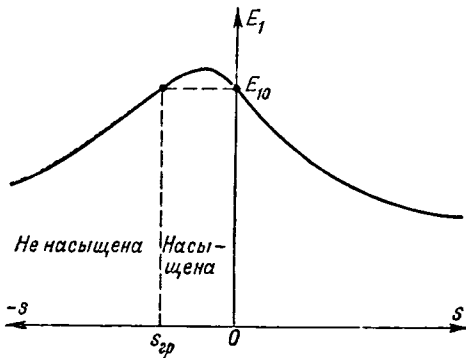


Рис. 3.

данной работы является установление способа решения этой задачи.

Максимальный момент в генераторном режиме (рис. 2,а)

$$M_k = \frac{1,46}{n_c} \cdot \frac{U_\phi^2}{r_1 - \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (1)$$

где  $U_\phi$  — первичное фазное напряжение;

$r_1$  — первичное активное сопротивление;

$x_1, x_2'$  — первичное и вторичное приведенное реактивные сопротивления;

$n_c$  — синхронная скорость двигателя.

$M_k$  растет вместе с  $r_1$ , в пределе при  $r_1 \rightarrow \infty M_k \rightarrow \infty$ .

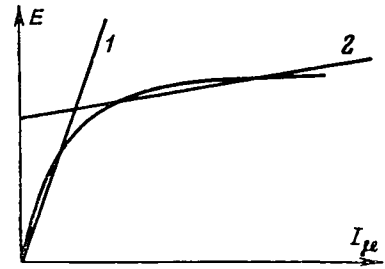


Рис. 4.

Этот абсурдный вывод указывает на неприменимость схемы а для решения поставленной задачи. Основной недостаток этой схемы заключается в пренебрежении влиянием на рабочий процесс намагничивающего тока.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать полную эквивалентную схему замещения (рис. 2,б) и учесть насыщение магнитной цепи машины. Активной составляющей тока в намагничивающей ветви можно при этом пренебречь ввиду ее незначительности.

В целях упрощения целесообразно на участках где магнитная цепь не насыщена, использовать упрощенную эквивалентную схему замещения асинхронной машины. В качестве критерия, определяющего степень насыщения машины, удобно принять величину первичной э. д. с.  $E_1$ . Можно положить, что значение этой э. д. с., лежащее на границе насыщенной и ненасыщенной зоны равно  $E_{10}$  — э. д. с. при холостом ходе двигателя. Таким образом, в зоне, где  $E_1 \leq E_{10}$ , можно использовать приближенную схему, а при  $E_1 \geq E_{10}$  — полную.

Из теории асинхронной машины известно, что кривая  $E_1 = f(s)$  имеет вид, данный на рис. На рисунке  $s_{sp}$  — граничное скольжение, отделяющее насыщенную зону от ненасыщенной.

Согласно упрощенной эквивалентной схеме замещения

$$E_{12p} = E_{10} = U_\phi \frac{-\frac{r_2'}{s_{sp}} + x_2'}{\sqrt{\left(r_1 - \frac{r_2'}{s_{sp}}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (2)$$

где  $s_{sp}$  — абсолютное значение скольжения;

$r_2'$  — вторичное приведенное активное сопротивление.

Отсюда абсолютное значение граничного скольжения

$$s_{sp} = \frac{r_2'(D^2 - 1)}{r_1 - \sqrt{r_1^2 - (D^2 - 1)(D^2 x_2'^2 - r_1^2 - x_k^2)}}, \quad (3)$$

где  $D = \frac{U_\phi}{E_{10}}$ ;  $x_k = x_1 + x_2'$ .

Таким образом, для определения кривых э. д. с.  $E_1$  и момента  $M$  в генераторном режиме при скольжениях больших, чем  $s_{sp}$ , можно использовать приближенную схему, а при меньших

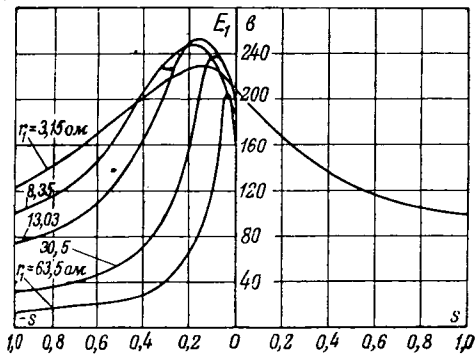


Рис. 5.

многих значениях скольжения — полную схему ветром насыщения.

Для решения удобно кривую намагничивания можно аппроксимировать (рис. 4) двумя отрезками.

Для насыщенной зоны будет использована линия 2 (рис. 3):

$$E = a + bI_{\mu}. \quad (4)$$

Зависимость реактивности намагничивания от намагничивающего тока:

$$x_{\mu} = \frac{E}{I_{\mu}} = \frac{a}{I_{\mu}} + b. \quad (5)$$

Используя это выражение для  $x_{\mu}$ , можно, исходя из полной схемы (рис. 2,б), получить следующую зависимость для определения  $E_1 = f(s)$ :

$$y^2 \left[ A^2 \left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 + A_1 \right] + y \left[ B \left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 + B_1 \right] + \left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 C + C_1 + 2r_1 \frac{r_2'}{s} = 0, \quad (6)$$

$$y = \frac{a}{E_1 \cdot b};$$

$$A = \left( U_{\phi}^2 \frac{b^2}{a^2} - z_1^2 \right); \quad A_1 = Ax_2'^2;$$

$$B = 2 \left( x_1 + \frac{z_1^2}{b} \right);$$

$$B_1 = 2x_2' \left[ x_1 x_2' + z_1^2 \left( 1 + \frac{x_2'}{b} \right) \right];$$

$$C = - \left( 1 + \frac{2x_1}{b} + \frac{z_1^2}{b^2} \right);$$

$$= - \left[ x_2'^2 + 2x_1 x_2' + 2x_1 \frac{x_2'^2}{b} + z_1^2 \left( 1 + \frac{x_2'}{b} \right)^2 \right].$$

Используя это выражение для зоны насыщения, можно, задаваясь соответствующими значениями скольжения, определить  $y$  и  $E_1$  в этой зоне.

Выражение (6) также может быть применено для определения наибольшей э. д. с. (рис. 3),

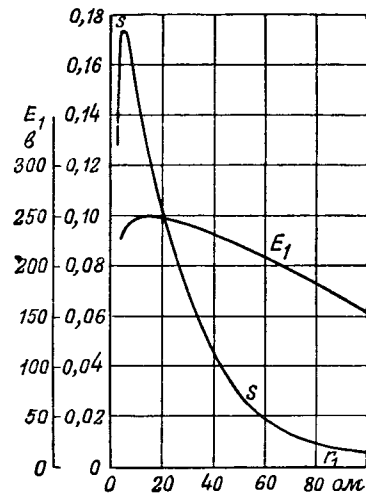


Рис. 6.

которой будет отвечать минимальная величина  $y$ . Значение  $s_{экстр}$ , при котором  $y$  имеет минимум,

$$s_{экстр} = - \frac{r_2'}{r_1} (Ay^2 + By + C). \quad (7)$$

После подстановки  $s_{экстр}$  в (6) получаем:

$$r_1^2 - (Ay_{мин}^2 + By_{мин} + C) (A_1 y_{мин}^2 + B_1 y_{мин} + C_1) = 0. \quad (8)$$

Таким образом, как максимальная величина э. д. с., так и минимальное значение  $y$  и соответствующее значение  $s_{экстр}$  зависят от активного сопротивления первичной цепи  $r_1$ .

Изменение  $r_1$  достигается путем подключения дополнительного внешнего сопротивления

$$r_1 = r_{1c} + r_{1d}.$$

Зависимость э. д. с.  $E_1$  от скольжения при различных значениях  $r_1$  для двигателя  $U 2-30/6$  с первичным активным сопротивлением  $r_c \approx 3,15$  представлена на рис. 5.

Каждому значению  $r_1$  соответствует свой максимум, э. д. с. который с увеличением  $r_1$  сперва растет, а потом падает. Скольжение, при котором э. д. с. имеет максимум, тоже вначале растет, а затем падает. Зависимость максимума э. д. с.  $E_1$  и соответствующего ей скольжения от  $r_1$  для того же двигателя приведены на рис. 6.

На рис. 7 приведены определенные расчетным путем кривые момента  $M$  в зависимости от скольжения  $s$  при различных значениях параметра  $r_1$ . Величина критического скольжения с увеличением  $r_1$  уменьшается, величина же критического момента при увеличении  $r_1$ , как видно, вначале растет, а затем падает. Таким образом, при изменении  $r_1$  величины  $E_{1, макс}$  и  $M_k$  также изменяются и могут достигать при определенных  $r_1$  экстремальных значений. Определение экстремального значе-



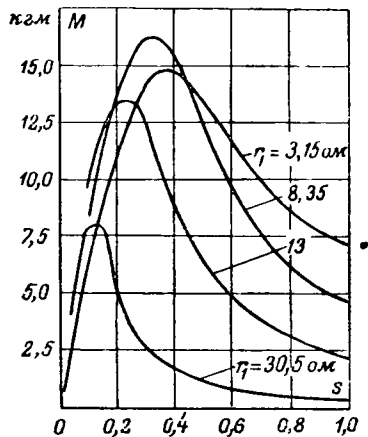


Рис. 7.

ния  $E_1$  сводится к решению уравнения 6-й степени следующего вида:

$$G\omega^6 + K\omega^5 + L\omega^4 + H\omega^3 + N\omega^2 + P\omega + Q = 0, \quad (9)$$

в котором  $\omega = \frac{1}{b} - y_{мин}$  и коэффициенты являются функциями индуктивных сопротивлений  $x_1$  и  $x_2'$ , а также величины  $b$ .

Таким образом, пользуясь приведенными выше зависимостями, можно для любого заданного значения дополнительного внешнего сопротивления найти кривую э. д. с. и момента. Однако в практике проектирования схем электроприводов может чаще возникнуть обратная задача — определение дополнительного внешнего сопротивления, необходимого для существенного уменьшения максимального момента в генераторном режиме до определенной величины. Для решения этой задачи можно полагать, что при введении искомого сопротивления магнитная цепь машины не будет насыщена. В этом случае кривая намагничивания может быть аппроксимирована прямой  $I$  (рис. 4). В результате уравнение (6), определяющее э. д. с., упростится:

$$\left(\frac{U_\phi}{E_1}\right)^2 z_2^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 C + C_1 + 2r_1 \frac{r_2'}{s} = 0, \quad (10)$$

где в выражениях для  $C$  и  $C_1$  нужно подставить значения  $b$  для прямой  $I$ .

Из этого выражения может быть получена зависимость  $M = f(s)$ :

$$\frac{3U_\phi^2}{9,81\omega_c M} + C \frac{r_2'}{s} + \frac{C_1}{\frac{r_2'}{s}} + 2r_1 = 0. \quad (11)$$

Максимум момента будет иметь место при скольжении  $s = -r_2' \sqrt{\frac{C}{C_1}}$ :

$$M_{макс} = \frac{3U_\phi^2}{19,62\omega_c(\sqrt{C C_1} - r_1)}. \quad (12)$$

После подстановки в (12) вышеприведенных выражений для  $C$  и  $C_1$  и некоторых преобразований получится следующее уравнение четвертой степени относительно искомого значения полного активного сопротивления первичной цепи  $r_1$ :

$$r_1^4 \frac{t}{b^2} + r_1^2 \left( q t + \frac{d}{b^2} - 1 \right) - 2r_1 \Delta + qd - \Delta^2 = 0, \quad (13)$$

где

$$\Delta = \frac{3U_\phi^2}{19,92\omega_c M_{макс}},$$

$$t = \left(1 + \frac{x_2'}{b}\right)^2, \quad q = \left(1 + \frac{x_1}{b}\right)^2,$$

$$d = \left[ x_2' + x_1 \left(1 + \frac{x_2'}{b}\right) \right]^2.$$

**Пример.** Двигатель типа МТ-31-61 имеет следующие данные: номинальная мощность 11 кВт; номинальное напряжение 380/220 в; номинальная скорость вращения 953 об/мин; номинальный момент 11,3 кгм; максимальный момент двигателя в режиме 35 кгм; первичное активное сопротивление  $r_1 = 0,433$  ом; первичное реактивное сопротивление  $x_1 = 0,485$  ом, вторичное приведенное активное сопротивление  $r_2' = 0,485$  ом; вторичное приведенное реактивное сопротивление  $x_2' = 0,986$  ом; реактивность намагничивания ненасыщенной магнитной цепи  $x_\mu = 10,96$ .

Допустим, что необходимо путем включения дополнительного сопротивления в первичную цепь снизить максимальный момент в генераторном режиме до его значения соответствующего двигательному режиму. При этом  $k = 2,02$ ;  $t = 1,18$ ;  $d = 2,31$ ;  $q = 1,09$ . Уравнение для сопротивления согласно (13) будет:

$$0,00985r_1^4 + 0,305r_1^2 - 4,042r_1 - 1,56 = 0.$$

Из этого уравнения получается  $r_1 = 6,25$  ом. Дополнительное внешнее сопротивление  $r_{1д} = 6,25 - 0,433 \approx 5,82$  ом. Наибольшему моменту в генераторном режиме равному 35 кгм, будет соответствовать скольжение  $s = -0,082$ .



# Индукционное реле сопротивления

Кандидат техн. наук А. М. БРЕСЛЕР

г. Чебоксары

применяемые измерительные органы в схемах индукционной защиты кабельных линий трехфазного тока могут быть разделены на две основные группы.

Первой группе относятся реле, имеющие независимые электрические цепи; одна питаются от измерительного трансформатора тока, другая — от трансформаторов напряжения. Цепи тока и напряжения реле питаются от однофазного источника. Характеристики этих реле (условия равенства отношения напряжения, подведенного к цепи напряжения, к току цепи тока и угла сдвига между ними. Графическое изображение характеристик этой группы реле может быть представлено в виде кривых прямоугольной координатной системы  $R, X$ . Метод определения места повреждения помощью этих реле основан на принципе измерения сопротивления. Таким образом, эта группа реле может быть названа реле сопротивления.

Принцип определения места повреждения помощью второй группы реле основан на сравнении фазовых напряжений поврежденных фаз и векторов напряжений на специальных сопротивлениях, включенных во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока. В большинстве случаев эти реле питаются от трех и больше независимых источников тока. Эти реле могут быть названы тангенциально-направленными, так как одновременно выполняют и функцию элемента измерения мощности.

В данной статье рассматриваются лишь реле сопротивления.

Если электромеханическое реле переменного тока имеет две независимые электрические цепи (тока и напряжения) и реле не содержит выпрямителей, то электромеханический момент этого реле может иметь до трех составляющих. Первая составляющая пропорциональна квадрату тока той цепи, вторая — пропорциональна квадрату напряжения на зажимах цепи напряжения реле, третья составляющая представляет собой функцию угла сдвига фаз между ними. Таким образом, в общем виде электромеханический момент реле

$$M = m_y I^2 + m_u U^2 + m_w I U \cos(\varphi - \psi), \quad (1)$$

Рассмотрены принципы действия и дан анализ работы индукционного реле сопротивления. Даны методы выполнения реле сопротивления с различными характеристиками и с малыми погрешностями от механических противодействующих моментов.

где  $m_y, m_u$  и  $m_w$  — коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров реле;

$\varphi$  — угол сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ ;

$\psi$  — угол сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ , при котором третья составляющая момента реле максимальна.

В дальнейшем наложении положительными моментами мы будем считать моменты, направленные в сторону замыкания контактов реле.

Для срабатывания реле электромеханический момент должен преодолеть момент трения подвижной системы, момент сопротивления пружины и момент, необходимый для нажатия контактов. Сумма всех этих моментов представляет собой механический момент реле  $M_m$ . Реле будет находиться в равновесии в том случае, если электромеханический момент равен сумме механических моментов реле.

Таким образом, характеристика реле (условие равновесия) может быть представлена следующим равенством:

$$m_y I^2 + m_u U^2 + m_w I U \cos(\varphi - \psi) = M_m, \quad (2)$$

или

$$m_y I^2 + m_u U^2 + m_w \cos \psi I U \cos \varphi + m_w \sin \psi I U \sin \varphi - M_m = 0. \quad (3)$$

Если разделить уравнение (3) на  $m_u$  и на  $I^2$  и учесть, что  $\frac{U}{I} = z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , то уравнение равновесия реле примет следующий вид:

$$R^2 + X^2 + \frac{m_w}{m_u} \cos \psi R + \frac{m_w}{m_u} \sin \psi X + \frac{m_y}{m_u} - \frac{M_m}{m_u I^2} = 0. \quad (4)$$

Равенство (4) представляет собой уравнение окружности с радиусом

$$r = \sqrt{0,25 \frac{m_w^2}{m_u^2} - \frac{m_y}{m_u} + \frac{M_m}{m_u I^2}}, \quad (5)$$

координаты центра которой

$$R_0 = -0,5 \frac{m_w}{m_u} \cos \psi, \quad (6)$$

$$X_0 = -0,5 \frac{m_w}{m_u} \sin \psi. \quad (7)$$

При принятых нами знаках моментов реле срабатывает в том случае, когда точка короткого замыкания, определяемая координатами  $R = \frac{U}{I} \cos \varphi$  и  $X = \frac{U}{I} \sin \varphi$ , лежит внутри характеристической окружности.

При больших значениях тока  $I$  последний член подкоренного выражения радиуса характеристической окружности станет очень малым и им можно пренебречь. Уравнение радиуса характеристической окружности, таким образом, примет следующий вид:

$$r_m = \frac{1}{m_u} \sqrt{0,25 m_w^2 - m_y m_u}. \quad (8)$$

Уравнения (6), (7) и (8) определяют в общем виде характеристики реле сопротивления.

Применяемые для дистанционной защиты импедансные, реактивные и так называемые реле проводимости представляют собой частные случаи реле, характеристики которых определяются рассмотренными уравнениями.

Центр характеристической окружности лежит в начале координат (рис. 1, а), когда  $m_y > 0$ ,  $m_u < 0$  и  $m_w = 0$ ,

$$r_m = \sqrt{\frac{m_y}{m_u}}, \quad (9)$$

$$R_0 = X_0 = 0. \quad (10)$$

Центр характеристической окружности находится в первом квадранте, а начало координат — внутри окружности (рис. 1, б) в том случае, когда  $m_y > 0$ ,  $m_u < 0$ ,  $m_w \cos \psi > 0$  и  $m_w \sin \psi > 0$ .

Характеристическая окружность реле проходит через начало координат, а центр характеристической окружности находится в первом квадранте (рис. 1, в), когда  $m_y = 0$ ,  $m_u < 0$ ,  $m_w \cos \psi > 0$  и  $m_w \sin \psi > 0$ .

Радиус характеристической окружности

$$r_m = 0,5 \frac{m_w}{m_u}, \quad (11)$$

а координаты центра определяются уравнениями (6) и (7).

Характеристическая окружность будет находиться над осью  $R$  (рис. 1, г) в том случае, когда  $m_y < 0$ ,  $m_u < 0$ ,  $m_w \cos \psi > 0$  и  $m_w \sin \psi > 0$ .

Если  $m_y > 0$ ,  $m_u < 0$ ,  $m_w \cos \psi > 0$  и  $m_w \sin \psi < 0$ , то центр характеристической окружности находится в четвертом квадранте и начало координат — внутри окружности (рис. 1, д).

Реле сопротивления будет иметь прямолинейную характеристику ( $r_m = \infty$ ), когда  $m_u = 0$  (рис. 1, е).

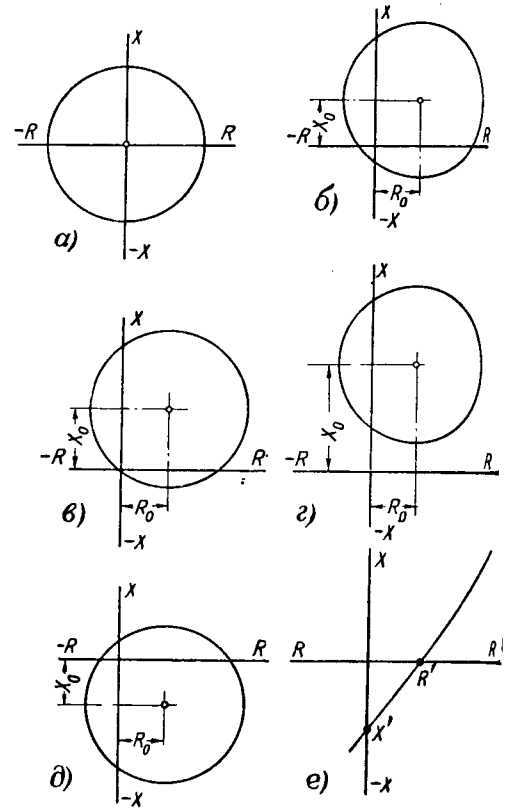


Рис. 1.

Уравнение прямой (характеристику реле) получим, умножив равенство (4) на  $\frac{m_u}{m_w \sin \psi}$ :

$$X = -R \operatorname{ctg} \psi - \frac{m_y}{m_w \sin \psi} + \frac{M_m}{m_w \sin \psi I^2}. \quad (12)$$

При больших значениях тока  $I$  последним членом уравнения (12) можно пренебречь, и уравнение характеристической прямой примет следующий вид:

$$X = -R \operatorname{ctg} \psi - \frac{m_y}{m_w \sin \psi}.$$

Точки пересечения характеристической прямой с осями координат

$$R' = -\frac{m_y}{m_w \cos \psi}, \quad (13)$$

$$X' = -\frac{m_y}{m_w \sin \psi}. \quad (14)$$

Угол наклона характеристической прямой к оси  $X$  равен углу максимальной чувствительности.

Реактивные реле представляют собой частный случай реле с прямолинейной характеристикой, когда угол  $\psi$  равен  $90^\circ$ .

Проведенный анализ показывает, что большинство из применяемых в настоящее время реле сопротивления представляют собой частные случаи реле с прямолинейной характеристикой, рабочая характеристика которых определяется общим уравнением (4).

Таким образом, реле сопротивления с любой рабочей характеристикой сравнивает два или три независимых электромеханических момента. Сравнение моментов можно осуществить помощью

х электромеханических элементов, действующих на общей подвижной системе (механическое уравнение), и помощью одного элемента, эквивалентного в соответствующую схему (электрическое сравнение).

Основное преимущество односистемного реле сопротивления заключается в том, что при больших значениях токов короткого замыкания, при которых реле должно работать, опоры и ось подвижной системы реле испытывают значительно большие механические усилия, чем подвижная система многоэлементного реле, так как каждая из отдельных величин (ток, напряжение и мощность) односистемных реле создает независимые противоположные моменты. Таким образом, ось и опоры подвижной системы испытывают суммарные усилия, создаваемые всеми элементами. В односистемном реле имеет место только один вращающий момент, опоры и ось подвижной системы при ее движении не испытывают дополнительных усилий.

Принципиальная схема одного из возможных вариантов включения односистемного реле сопротивления, находящегося в промышленном выпуске<sup>1</sup>, дана на рис. 2.

Комплект реле сопротивления состоит из одного однополюсного четырехполюсного реле ИИС, с механическим ротором, двух промежуточных трансформаторов Т-1 и Т-2, конденсатора С и трансформатора Т-3.

При определении условия равновесия моментов подвижной системы реле найдем зависимость токов реле от тока  $I$ , напряжения  $U$  и угла фаз между ними  $\varphi$ . В приведенных ниже расчетах приняты следующие обозначения:  $w_1, w_2$  — числа витков соответствующих обмоток трансформаторов Т-1 и Т-2;  $r_n, r_x, X_n$  и  $X_x$  — активные и реактивные составляющие сопротивления обмоток  $n$  и  $x$  реле ИИС;  $r$  — активная составляющая сопротивления обмотки  $w$ ;  $X$  — реактивное сопротивление рассеяния обмотки  $w$ ;  $k$  — коэффициент пропорциональности, равный навеске в д. с. в одном витке обмотки  $w$  на один намагничивающий ампервиток.  $n$  — коэффициент трансформации автотрансформатора Т-3. Рис. 2 видно, что

$$\dot{I}_1 = \frac{E_1 - n\dot{U}}{r + r_x + j(x + x_x - x_c)}; \quad (16)$$

$$\dot{E}_1 = -j(\dot{I}w_1 + \dot{I}_1w)kw; \quad (17)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 + n\dot{U}}{r + r_n + j(X + X_n)}; \quad (18)$$

$$\dot{E}_2 = -j(\dot{I}w_2 + \dot{I}_2w)kw. \quad (19)$$

Соединяя попарно уравнения (16), (17) и (18), получим искомые зависимости (полагаем, что

<sup>1</sup>Приведенная схема была предложена в 1935 г. автором для импедансного реле. В своей работе на основе упрощенной векторной диаграммы показал возможность выполнения односистемного импедансного

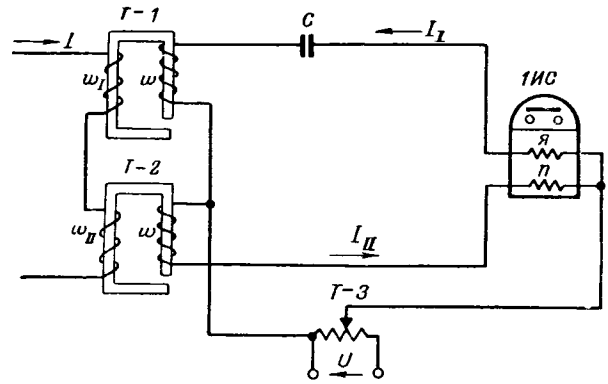


Рис. 2.

положительное направление действительной оси совпадает с вектором  $\dot{U}$ ):

$$j_1 = - \frac{Ikww_1 \sin(\varphi + \beta_1) + nU \cos \beta_1}{Z_1} - j \frac{Ikww_1 \cos(\varphi + \beta_1) + nU \sin \beta_1}{Z_1}; \quad (20)$$

$$j_2 = - \frac{Ikww_2 \sin(\varphi + \beta_2) - nU \cos \beta_2}{Z_2} - j \frac{Ikww_2 \cos(\varphi + \beta_2) + nU \sin \beta_2}{Z_2}; \quad (21)$$

$$Z_1 = r + r_x + j(x + x_x - x_c + kw^2) = z_1 e^{j\beta_1};$$

$$Z_2 = r + r_n + j(x + x_n + kw^2) = z_2 e^{j\beta_2}.$$

Рабочие магнитные потоки, создаваемые обмотками реле,

$$\Phi_x = k_x e^{-j\delta_1} j_1 = \frac{k_x}{Z_1} \left\{ -Ikww_1 \sin(\varphi + \beta_1 - \delta_1) - nU \cos(\beta_1 - \delta_1) + j[-Ikww_1 \cos(\varphi + \beta_1 - \delta_1) + nU \sin(\beta_1 - \delta_1)] \right\}; \quad (22)$$

$$\Phi_n = k_n e^{-j\delta_2} j_2 = \frac{k_n}{Z_2} \left\{ -Ikww_2 \sin(\varphi + \beta_2 - \delta_2) - nU \cos(\beta_2 - \delta_2) + j[-Ikww_2 \cos(\varphi + \beta_2 - \delta_2) - nU \sin(\beta_2 - \delta_2)] \right\}, \quad (23)$$

где  $k_x$  и  $k_n$  — коэффициенты пропорциональности, зависящие от числа витков и конструктивных параметров магнитопровода;

$\delta_1$  и  $\delta_2$  — углы сдвига фаз рабочих потоков реле от тока соответствующей обмотки.

Электромеханический момент индукционного реле пропорционален произведению модулей векторов рабочих магнитных потоков, умноженному на синус угла между этими векторами. Это произведение, как известно, равно мнимой части произведения комплекса одного рабочего потока  $\Phi_x$

на сопряженный комплекс  $\Phi_n^*$  другого потока.

Таким образом, правая часть (23) (условие равновесия) может быть представлена как произведе-

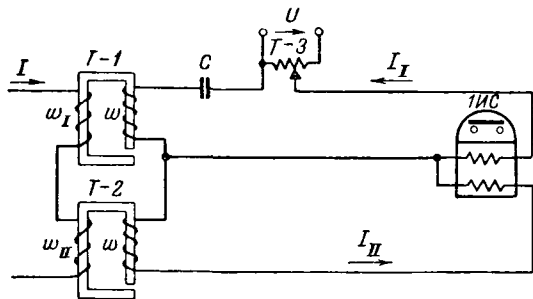


Рис. 3.

ние коэффициента пропорциональности  $A$  на мнимую часть комплекса  $\Phi_x, \hat{\Phi}_n$ :

$$m [k^2 w^2 w_1 w_{II} \sin \gamma I^2 - n^2 \sin \gamma U^2 - k w n (w_1 + w_{II}) \cos \gamma I U \cos \varphi - k w n (w_1 - w_{II}) \sin \gamma I U \sin \varphi - M_m] = 0, \quad (24)$$

где

$$m = \frac{A k_x k_n}{Z_1 Z_{II}}; \quad (25)$$

$$\gamma = \beta_{II} - \beta_I + \delta_{II} - \delta_I. \quad (26)$$

Уравнение (24) тождественно уравнению (3), причем

$$m_y = m k^2 w^2 w_1 w_{II} \sin \gamma; \quad (27)$$

$$m_u = -m n^2 \sin \gamma; \quad (28)$$

$$m_w \cos \psi = -m k w n (w_1 + w_{II}) \cos \gamma; \quad (29)$$

$$m_w \sin \psi = -m k w n (w_1 - w_{II}) \sin \gamma. \quad (30)$$

Характеристика индукционного реле, включенного по схеме рис. 2, согласно (5)...(8) определяется уравнениями:

$$R_0 = -0,5 \frac{k w (w_1 + w_{II})}{n} \operatorname{ctg} \gamma; \quad (31)$$

$$X_0 = -0,5 \frac{k w (w_1 - w_{II})}{n}; \quad (32)$$

$$r = \sqrt{0,25 k^2 w^2 \frac{(w_1 + w_{II})^2}{n^2 \sin^2 \gamma} - \frac{M_m}{m n \sin \gamma I^2}}; \quad (33)$$

$$r_m = \frac{0,5 k w (w_1 + w_{II})}{n \sin \gamma}. \quad (34)$$

Из уравнений (31)...(34) видно, что если менять число витков  $w_1$  и  $w_{II}$  так, чтобы их сумма оставалась постоянной, то центр характеристической окружности перемещается параллельно оси  $X$ , а радиус  $r_m$  остается неизменным. Перемещение центра характеристической окружности параллельно оси  $R$  осуществляется за счет изменения угла  $\gamma$ . При изменении угла  $\gamma$  меняется также и радиус характеристической окружности.

Начало координат при любых параметрах вспомогательных устройств реле ( $T-1, T-2$  и  $C$ ) будет находиться внутри характеристической окружности, так как по физическому смыслу число витков первичных обмоток трансформаторов  $w_1$  и  $w_{II}$  может иметь только положительный знак.

Изменение радиуса характеристической окружности (регулировка полного сопротивления сра-

батывания) можно производить за счет изменения числа вторичных витков трансформаторов. Коэффициент трансформации  $n$  автотрансформатора  $T-3$ .

Проведенный анализ показывает, что индукционное реле, включенное по схеме рис. 2, в зависимости от параметров вспомогательных устройств может иметь характеристики, изображенные на рис. 1, а, б, в и д.

Один из вариантов включения индукционного элемента для получения реле сопротивлений с прямолинейной характеристикой показан на рис. 3, определяются следующими уравнениями:

$$j_1 = - \frac{I k w w_1 \sin (\varphi + \beta_1) + U n \cos \beta_1}{Z_1} - j \frac{I k w w_1 \cos (\varphi + \beta_1) - U n \sin \beta_1}{Z_1};$$

$$j_{II} = - \frac{I k w w_{II} \sin (\varphi + \beta_{II}) + j I k w w_{II} \cos (\varphi + \beta_{II})}{Z_{II}};$$

Проведя анализ, аналогичный предыдущему получим условия равновесия моментов подвешенной системы реле:

$$m [k^2 w^2 w_1 w_{II} \sin \gamma I^2 - k w w_{II} n \cos \gamma I U \cos \varphi + k w w_{II} n \sin \gamma I U \sin \varphi] - M_m = 0.$$

Равенство (37) тождественно (3), причем

$$m_y = m k^2 w^2 w_1 w_{II} \sin \gamma;$$

$$m_u = 0;$$

$$m_w \cos \psi = -m k w w_{II} n \cos \gamma;$$

$$m_w \sin \psi = m k w w_{II} n \sin \gamma.$$

Уравнения, определяющие характеристику примут следующий вид:

$$X = R \operatorname{ctg} \gamma - \frac{k w w_1}{n} + \frac{M_m}{m k w w_{II} n \sin \gamma I^2};$$

$$X_m = R \operatorname{ctg} \gamma - \frac{k w w_1}{n};$$

$$R' = \frac{k w w_1}{n} \operatorname{tg} \gamma;$$

$$X' = - \frac{k w w_1}{n}.$$

Из уравнения (43) видно, что характеристика индукционного реле, включенного по схеме рис. 2, изображенные в системе  $R, X$  координат, представляют собой семейство прямых с полюсом в начале координат, определяемой уравнением (45). Угол наклона характеристической прямой к оси  $R$  равен углу  $\gamma$ .

Для изменения знака координаты полюса необходимо повернуть вектор тока или напряжения на  $180^\circ$ .

Проведенный анализ показывает, что характеристики с любыми характеристиками могут быть выполнены, как односистемными, так и гомосистемными. Однако односистемные реле, указанные выше, имеют недостатки, которые гомосистемные реле, должны иметь лучшие эксплуатационные характеристики.

# Метод вычисления допустимой продолжительности короткого замыкания в двухмашинной системе

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

Уральской политехнической институт им. Кирова

При эксплуатации и проектировании современных электрических систем возникает необходимость выполнения расчетов динамической устойчивости. Цель этих расчетов — чтобы приблизительно, но быстро определить критические величины продолжительности коротких замыканий в различных точках системы при различных условиях.

Ввиду большой трудоемкости расчетов по существующим методам обычно выполняется лишь малая их часть; из многих факторов, влияющих на устойчивость, учитывается только какой-нибудь один фактор. В результате расчеты не соответствуют действительной картине, и принимаемые на основе решения зачастую оказываются неправильными.

В настоящее время для расчета динамической устойчивости все шире применяются специальные модели и установки, которые позволяют получить довольно полные результаты. Но такие модели и установки имеются далеко не во всех энергосистемах и проектирующих организациях, а лишь в наиболее крупных. Поэтому большое практическое значение имеют упрощенные методы расчета динамической устойчивости, позволяющие быстро, но с достаточной точностью получить необходимые результаты. Один из таких методов дается в настоящей работе.

Предлагаемый метод разработан на основе простого приближенного способа расчета динамической устойчивости при  $E' = const$  и правила площадей ускорения и торможения. Он применим к двухмашинной системе, т. е. для системы, состоящей из двух станций или из большого числа станций, которые без больших погрешностей могут быть приведены к двум станциям. Как в величине допустимой продолжительности короткого замыкания при этом методе погрешность не более 10%.

Ускорение роторов машин в двухмашинной системе, как известно, определяется уравнением:

$$\frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = \left( \frac{\Delta P_1}{P_{n1} M_1} - \frac{\Delta P_2}{P_{n2} M_2} \right) \omega_0 \quad (1)$$

$P_{n1}$  и  $P_{n2}$  — номинальные мощности машин станций 1 и 2;

$M_1$  и  $M_2$  — постоянные инерции (сек) машин станций 1 и 2;

$\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  — приращения мощности на стан-

циях 1 и 2 при аварийном режиме;

$\delta_{12}$  — угол между э. д. с. холостого хода  $E_{d1}$  и  $E_{d2}$  станций 1 и 2.

Сопоставление расчетов динамической устойчивости с помощью точного и приближенного методов показывает, что точные кривые  $\delta_{12} = f(t)$  и кривые изменения угла  $\delta'_{12}$  между э. д. с.  $E'_1$  и  $E'_2$  в функции времени имеют одинаковый характер [Л. 1]. В течение всего процесса разности ординат этих кривых остается почти неизменной и равной разности начальных углов. Это позволяет уравнение ускорений роторов представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} &\approx \frac{d^2(\delta'_{12} + \delta_{120} - \delta'_{120})}{dt^2} = \frac{d^2\delta'_{12}}{dt^2} \approx \\ &\approx \left( \frac{\Delta P_1}{P_{n1} M_1} - \frac{\Delta P_2}{P_{n2} M_2} \right) \omega_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Путем преобразований уравнение (2) приводится к уравнению:

$$\frac{d^2(\delta'_{12} - \rho)}{d\tau^2} = T - \sin(\delta'_{12} - \rho), \quad (3)$$

которое по своему виду не отличается от уравнения движения ротора одной машины, работающей на сеть бесконечной мощности.

Уравнение (3) решается методом последовательных интервалов, но поскольку имеются типовые кривые [Л. 2], его можно решить также с их помощью. Для этого необходимо взять типовую кривую, соответствующую вычисленной обобщенной постоянной системы  $T$  и углу начального режима  $\delta'_{120} - \rho$ .

Для определения времени выключения, как известно, кроме типовой кривой  $\delta'_{12} - \rho = f(\tau)$ , необходимо знать угол выключения  $\delta'_{12\text{отк}} - \rho$ . Правило площадей, с помощью которого определяется этот угол, выражается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} &\int_{\delta'_{120}}^{\delta'_{12\text{отк}}} \omega_0 C P_{\text{макс}} [T - \sin(\delta'_{12} - \rho)] d\delta'_{12} = \\ &= - \int_{\delta'_{12\text{отк}}}^{\delta'_{12\text{макс}}} \omega_0 C_n \cdot P_{n\text{макс}} [T_n - \sin(\delta'_{12} - \rho_n)] d\delta'_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

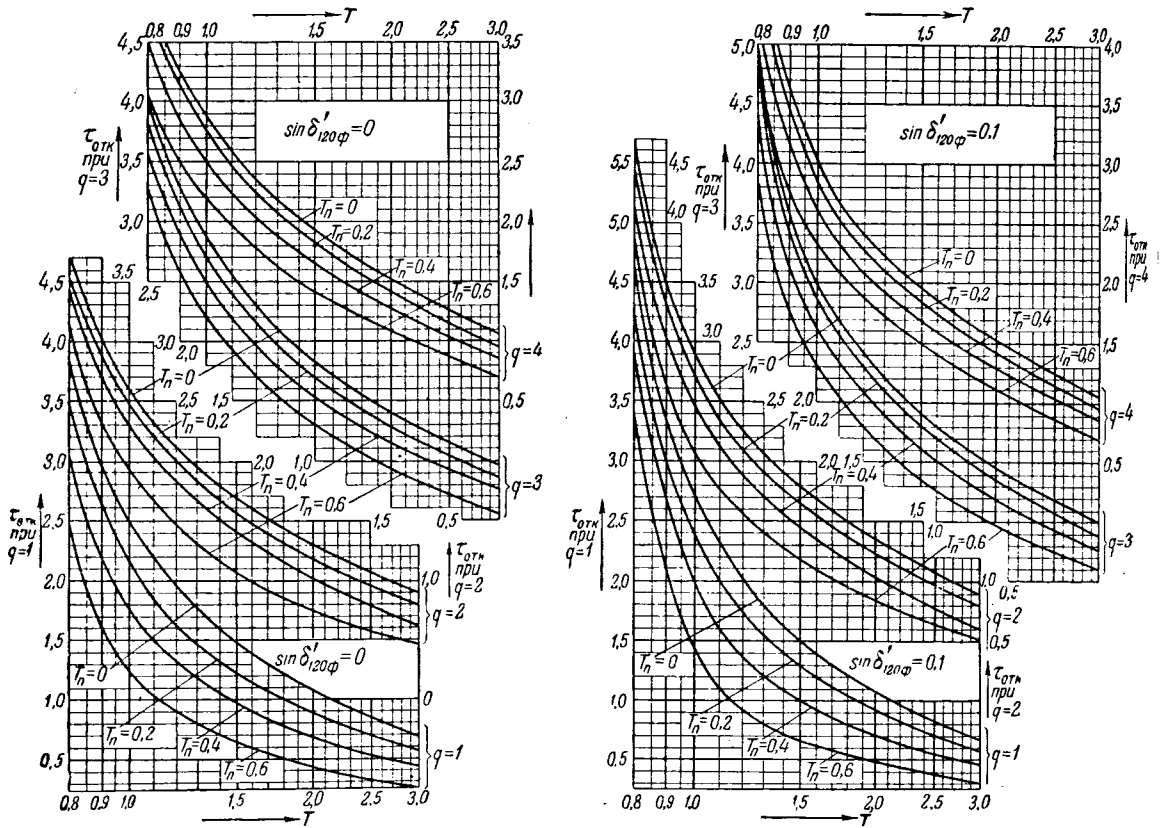


Рис 1. Кривые допустимой продолжительности аварийного режима при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0$  и при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,1$ .

Величины с индексом  $n$  относятся к схеме послеаварийного режима, а без индекса — к схеме аварийного режима. Угол  $\delta'_{12, \max}$  представляет максимальное расхождение роторов в аварийном режиме, при котором энергия, запасенная роторами во время ускорения, полностью компенсируется энергией во время торможения.

Практикой расчетов динамической устойчивости установлено, что разница между углами  $\rho$  и  $\rho_n$  не превышает  $10^\circ$ . На этом основании для уменьшения числа независимых переменных можно принять  $\rho = \rho_n$ . Выражение (4) при таком допущении после интегрирования и преобразований примет вид:

$$\cos \delta'_{12 \text{ отк. } \phi} - G \delta'_{12 \text{ отк. } \phi} = H, \quad (5)$$

где

$$G = \frac{T - qT_n}{q - 1},$$

$$H = [q \cdot T_n (3,14 - \arcsin T_n) - q \sqrt{1 - T_n^2} - T \delta'_{120 \phi} - \cos \delta'_{120 \phi}] \frac{1}{q - 1}.$$

В частном случае, при  $q = 1$ , интегрирование и преобразование выражения (4) приводят к следующему уравнению:

$$\delta'_{12 \text{ отк. } \phi} = \frac{\sqrt{1 - T_n^2} - \cos \delta'_{120 \phi} - T \delta'_{120 \phi} - T_n (3,14 - \arcsin T_n)}{0,0174 (T - T_n)}. \quad (6)$$

Имея выражения (5) и (6) и типовые кривые  $\delta'_{12 \phi} = f(\tau)$ , можно вычислить допустимые величины относительной продолжительности аварийного режима ( $\tau_{отк}$ ) для различных значений постоянных  $T$ ,  $T_n$  и  $q$  и построить типовые кривые этих величин.

Типовые кривые допустимой продолжительности аварийного режима для встречающихся в практике значений постоянных  $T$ ,  $T_n$  и  $\sin \delta'_{120 \phi}$  приведены на рис. 1, 2 и 3.

При  $\rho > \rho_n$  типовые кривые рис. 1, 2 и 3: преувеличенное значение относительного времени  $\tau_{отк}$ , при  $\rho \approx \rho_n$  — преуменьшенное, а  $\rho < \rho_n$  ошибка может иметь и тот, и другой вид. Эти отклонения от истинного значения относительного времени получаются вследствие двух причин: 1) допущения того, что  $\rho = \rho_n$ , 2) правила равенства площадей ускорения и торможения дает увеличенную величину угла выключения.

Чтобы уменьшить ошибку в абсолютном значении выключения, необходимо ввести поправочный коэффициент  $k$ . Как показало исследование,  $\rho > \rho_n$  коэффициент  $k$  примерно равен 0,85,  $\rho < \rho_n$  — единице, а при  $\rho \approx \rho_n$  (при разнице не более  $2^\circ$ ) — 0,9.

Для определения допустимой продолжительности аварийного режима  $\tau_{отк}$  в относительных величинах по кривым рис. 1, 2 и 3 необходимо знать следующие величины:  $T$  — обобщенная постоянная системы для аварийного режима,  $T_n$  — обобщенная

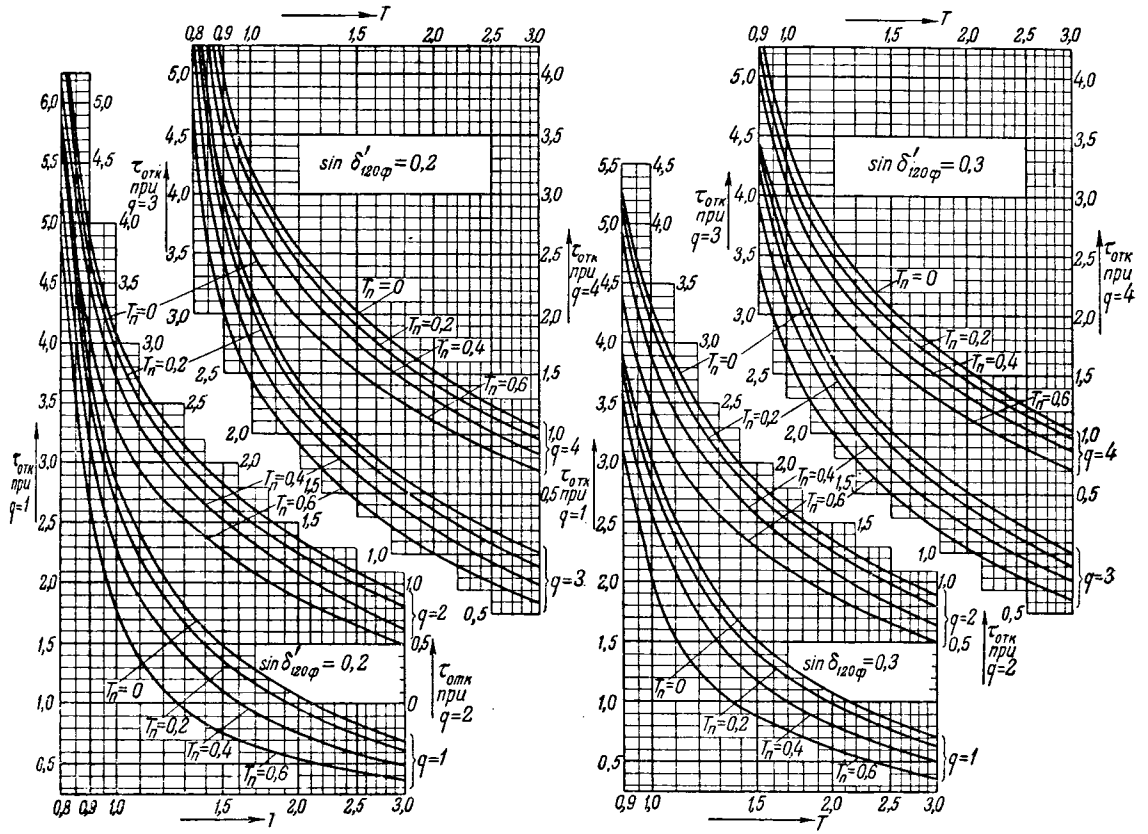


рис. 2. Кривые допустимой продолжительности аварийного режима при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,2$  и при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,3$ .

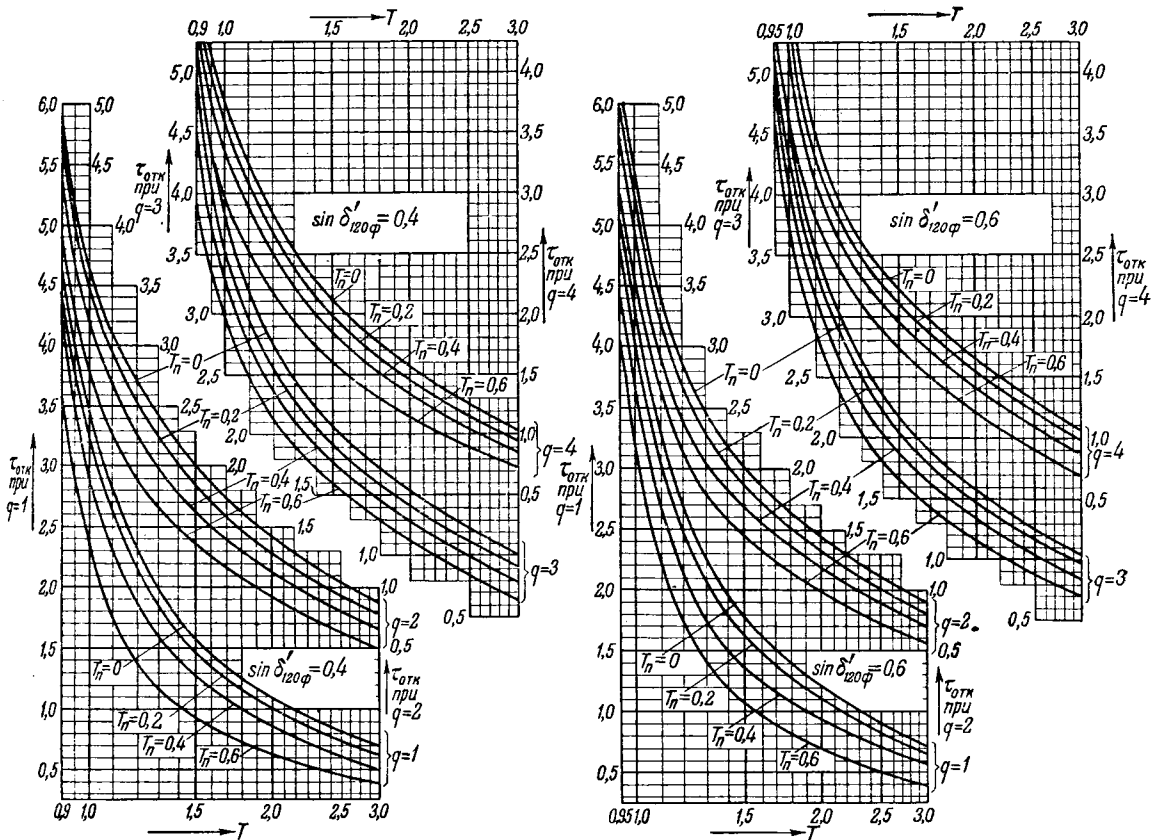


рис. 3. Кривые допустимой продолжительности аварийного режима при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,4$  и при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,6$ .



ная постоянная системы для послеаварийного режима, коэффициент  $q$  и начальный расчетный угол  $\delta'_{120\phi} = \delta'_{120} - \rho$ . Эти величины вычисляются по параметрам двух расчетных схем вида, изображенного на рис. 4. Одна из этих схем составляется для аварийного, а другая для послеаварийного режима.

Расчетные схемы получаются в результате преобразования и упрощения схемы системы; при этом нагрузки представляются в виде постоянных полных сопротивлений, а генераторы — в виде реактивного переходного сопротивления  $X'_a$  и постоянной по величине э. д. с.  $E'$ , приложенной за переходным сопротивлением. Расчетная схема аварийного режима при несимметричном коротком замыкании получается на основе комплексной схемы замещения системы с положительным следованием фаз и шунтом из эквивалентных полных сопротивлений обратного и нулевого следования фаз, включенным в точке короткого замыкания.

Ввиду того, что метод основан на способе расчета устойчивости при  $E' = \text{const}$ , э. д. с.  $E'_1$  и  $E'_2$ , определяемые из начального (предаварийного) режима работы системы, принимаются постоянными и одинаковыми для аварийного и послеаварийного режимов. Из начального режима определяются также мощности станций  $P_{10}$  и  $P_{20}$  и угол  $\delta'_{120}$  между э. д. с.  $E'_1$  и  $E'_2$ .

На основании расчетной схемы для аварийного режима определяются собственные сопротивления:

$$Z_{11} = \frac{Z_{12}Z_{10}}{Z_{12} + Z_{10}}; \quad (7)$$

$$Z_{22} = \frac{Z_{12}Z_{20}}{Z_{12} + Z_{20}}. \quad (8)$$

Затем вычисляются мощности:

$$P_I = P_{10} - \frac{(E'_1)^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11}; \quad (9)$$

$$P_{II} = P_{20} - \frac{(E'_2)^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22}; \quad (10)$$

$$P_{\text{макс}} = \frac{E'_1 E'_2}{z_{12}}; \quad (11)$$

$$P = \frac{P_I}{P_{n1} M_1} - \frac{P_{II}}{P_{n2} M_2} = P_I A_1 - P_{II} A_2, \quad (12)$$

где  $P_{n1}$ ,  $P_{n2}$  — номинальные мощности станций 1 и 2;

$M_1$ ,  $M_2$  — постоянные инерции машин станций 1 и 2, сек.

Постоянные  $C$ ,  $\rho$  и  $T$  вычисляются по следующим формулам:

$$C = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos 2\alpha_{12}}, \quad (13)$$

$$\sin \rho = \frac{A_1 - A_2}{C} \sin \alpha_{12}, \quad (14)$$

$$T = \frac{P}{CP_{\text{макс}}}, \quad (15)$$

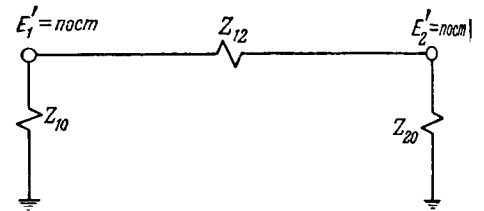


Рис. 4. Расчетная схема двухмашинной системы.

где  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{12}$  — дополнительные до  $90^\circ$  к углам  $\psi_{11}$ ,  $\psi_{22}$ ,  $\psi_{12}$  сопротивлений  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$ ,  $Z_{12}$  ( $\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11}$ ,  $\alpha_{22} = 90^\circ - \psi_{22}$ ;  $\alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}$ ).

Таким же путем на основании расчетной послеаварийного режима вычисляются параметры  $T_n$ ,  $\rho_n$  и  $C_n$ .

Затем определяется:

$$q = \frac{C_n Z_{12}}{C Z_{12n}}.$$

На основании найденного по типовым кривым рис. 1, 2 и 3 относительного времени  $\tau_{\text{отк}}$  определяется абсолютное время

$$t_{\text{отк}} = k \frac{\tau_{\text{отк}}}{\omega_0 CP_{\text{макс}}},$$

где  $\omega_0$  — угловая скорость вращения, рад/сек при частоте 50 гц.

Типовые кривые допустимой продолжительности аварийного режима построены для  $q = 3$  и 4 и  $\sin \delta'_{120\phi} = 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$  и  $0,6$ . расчетные величины  $q$  и  $\sin \delta'_{120\phi}$  лежат между этими значениями, то искомое время  $\tau_{\text{отк}}$  определяется посредством линейной интерполяции.

Вычисление допустимой продолжительности аварийного режима по типовым кривым рис. 1 и 3 может осуществляться для аварийных режимов постоянной системы при аварийном режиме  $T \leq 3$ . Однако в некоторых довольно редких случаях может потребоваться провести расчет устойчивости для аварийного режима, характеризующегося постоянной  $T > 3$ .

В таких случаях допустимая продолжительность  $t_{\text{отк}}$  с достаточной для практических целей точностью может быть определена по формуле, основанной на том, что разница во времени всех значений  $T$ , лежащих между 3 и  $\infty$ , невелика. Эта формула имеет следующий вид:

$$t_{\text{отк}x} = \frac{T_a (t_{\text{отк}a} - t_{\text{отк}\infty})}{T_x} + t_{\text{отк}\infty},$$

где  $T_x$  — постоянная, для которой находится

$t_{\text{отк}a}$  — допустимая продолжительность аварийного режима при постоянной  $T_a$ , близкой к 3;

$t_{\text{отк}\infty}$  — допустимая продолжительность аварийного режима при  $T = \infty$ .

Таким образом, для определения  $t_{\text{отк}x}$  при  $T_x > 3$  необходимо знать величины допустимой продолжительности при  $T_a \approx 3$  и  $T = \infty$ .

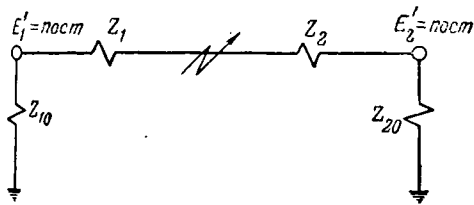


Рис. 5. Расчетная схема при трехфазном коротком замыкании, при котором станции работают раздельно.

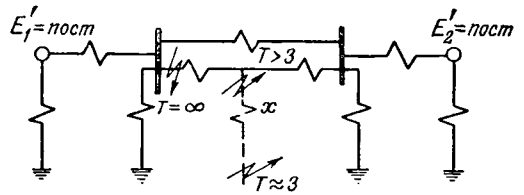


Рис. 6. Схема системы при трехфазном коротком замыкании на одной из параллельных линий электропередачи.

Постоянная  $T$  равна бесконечности при трехфазном коротком замыкании, при котором станции работают раздельно (рис. 5). В этом случае дифференциальное уравнение движения роторов решается в общем виде. Поэтому  $t_{отк \infty}$  может быть вычислено по следующей формуле:

$$t_{отк \infty} = \sqrt{\frac{\delta'_{12 \text{ отк } \phi} - \delta'_{120 \phi}}{9 \cdot 10^3 P}}, \quad (19)$$

$\delta'_{12 \text{ отк } \phi}$  — угол отключения;  $\delta'_{120 \phi}$  — начальный

$$P_{\text{I}} = \frac{P_{\text{I1}}}{P_{\text{н1}} M_1} - \frac{P_{\text{II}}}{P_{\text{н2}} M_2}, \quad P_{\text{I}} = P_{10} - \frac{(E_1')^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11},$$

$$P_{\text{II}} = P_{20} - \frac{(E_2')^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22},$$

$z_{22}$  — собственные сопротивления схемы (рис. 5).

Угол отключения  $\delta'_{12 \text{ отк } \phi} = \delta'_{12 \text{ отк}} - \rho_n$  определяется на основании уравнения (5). Номограмма, построенная по этому уравнению, приведена на рис. 2.

При определении угла отключения по уравнению (5) величины, входящие в это уравнение, могут вычислять по формулам:

$$G = \frac{T_{\phi} - C_n T_n}{C_n},$$

$$T_n (3,14 - \arcsin T_n) - \frac{T_{\phi}}{C_n} \delta'_{120 \phi} - \sqrt{1 - T_n^2},$$

$$T_{\phi} = \frac{P}{P_{\text{н макс}}}, \quad \delta'_{120 \phi} = \delta'_{120} - \rho_n.$$

Параметры  $T_n$ ,  $C_n$ ,  $\rho_n$  и  $P_{\text{н макс}}$  определяются на основании выражений (11), (13), (14), и (15) для аварийного режима.

Время  $t_{отк a}$  для  $T_a > 3$ , которое необходимо для вычисления  $t_{отк x}$  по формуле (18), определяется по типовым кривым. Постоянная  $T > 3$  может получиться при расчете устойчивости при трехфазном коротком замыкании на одной из параллельных линий электропередачи вблизи шин станции (рис. 6). В этом случае  $t_{отк \infty}$  определяется для трехфазного короткого замыкания на одной из линий электропередачи непосредственно

у шин станции, а  $t_{отк a}$  — для такого удаленного трехфазного короткого замыкания, при котором  $T_a \approx 3$ .

**Приложение. Пример вычисления допустимой продолжительности аварийного режима по типовым кривым.** Расчетные схемы аварийного и послеаварийного режимов работы (рис. 4), полученные в результате преобразования и упрощения схем системы, характеризуются следующими величинами сопротивлений:

В аварийном режиме

$$Z_{10} = 39,0 \angle 90^\circ, \quad Z_{20} = 44,6 \angle 62,7^\circ, \quad Z_{12} = 228 \angle 72,08^\circ.$$

В послеаварийном режиме

$$Z_{10n} = 405,0 \angle 28,75^\circ, \quad Z_{20n} = 82,7 \angle 29,61^\circ,$$

$$Z_{12n} = 96,0 \angle 85,16^\circ.$$

Начальный режим работы системы характеризуется следующими данными:

$$P_{10} = 93,6 \text{ мвт}, \quad P_{20} = 95,4 \text{ мвт},$$

$$E_1' = 126,3 \angle 9,65^\circ, \quad E_2' = 118,2 \angle 1,15^\circ, \quad \delta'_{120} = 8,5^\circ.$$

Номинальные мощности и постоянные инерции машин станций:

$$P_{\text{н1}} = 100 \text{ мвт}, \quad P_{\text{н2}} = 175 \text{ мвт},$$

$$M_1 = 10 \text{ сек}, \quad M_2 = 8 \text{ сек}.$$

Требуется вычислить допустимую продолжительность аварийного режима.

Вычисляем необходимые величины для расчетной схемы аварийного режима:

$$Z_{11} = \frac{39,0 \angle 90^\circ \cdot 228 \angle 72,08^\circ}{39,0 \angle 90^\circ + 228 \angle 72,08^\circ} = 33,6 \angle 87,62^\circ,$$

$$Z_{22} = \frac{44,6 \angle 62,7^\circ \cdot 228 \angle 72,08^\circ}{44,6 \angle 62,7^\circ + 228 \angle 72,08^\circ} = 37,4 \angle 64,25^\circ,$$

$$P_{\text{I}} = 93,6 \frac{126,3^2}{33,6} \sin(90^\circ - 87,62^\circ) = 74,5 \text{ мвт}.$$

$$P_{\text{II}} = 95,4 \frac{118,2^2}{37,4} \sin(90^\circ - 64,25^\circ) = 66,7 \text{ мвт}.$$

$$P_{\text{макс}} = \frac{126,3 \cdot 118,2}{228} = 65,5 \text{ мвт},$$

$$A_1 = \frac{1}{100 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{-3}; \quad A_2 = \frac{1}{475 \cdot 8} = 0,71 \cdot 10^{-3},$$

$$P = 74,5 \cdot 10^{-3} + 66,7 \cdot 0,71 \cdot 10^{-3} = 121,9 \cdot 10^{-3}$$

$$C = 10^{-3} \sqrt{1^2 + 0,7^2 + 2 \cdot 0,71 \cos 2(90 - 72,08^\circ)} =$$

$$= 1,63 \cdot 10^{-3},$$

$$\sin \rho = \frac{(1-0,71)10^{-3}}{1,63 \cdot 10^{-3}} \sin(90 - 72,08^\circ) = 0,055,$$

$$\rho = 3,17^\circ,$$

$$T = \frac{121,9 \cdot 10^{-3}}{65,5 \cdot 1,63 \cdot 10^{-3}} = 1,14.$$

Вычислим необходимые величины для расчетной схемы послеаварийного режима:

$$Z_{11n} = \frac{405 \angle 28,75^\circ \cdot 96 \angle 85,16^\circ}{405 \angle 28,75^\circ + 96 \angle 85,16^\circ} = 84 \angle 75,75^\circ,$$

$$Z_{22n} = \frac{82,7 \angle 29,61^\circ \cdot 96 \angle 85,16^\circ}{82,7 \angle 29,61^\circ + 96 \angle 85,16^\circ} = 49,9 \angle 55,11^\circ.$$

$$P_{1n} = 93,6 \frac{126,3^2}{84} \sin(90 - 75,75^\circ) = 46,9 \text{ мвт},$$

$$P_{11n} = 95,4 \frac{118,2^2}{49,9} \sin(90 - 55,11^\circ) = 64,6 \text{ мвт},$$

$$P_{\text{макс } n} = \frac{126,3 \cdot 118,2}{96,0} = 155 \text{ мвт},$$

$$P_n = 46,9 \cdot 10^{-3} + 64,6 \cdot 0,71 \cdot 10^{-3} = 92,7 \cdot 10^{-3},$$

$$C_n = 10^{-3} \sqrt{1^2 + 0,71^2 + 2 \cdot 0 \cdot 0,71 \cos 2(90 - 85,16^\circ)} =$$

$$= 1,7 \cdot 10^{-3},$$

$$\sin \rho_n = \frac{(1-0,71) \cdot 10^{-3}}{1,7 \cdot 10^{-3}} \sin(90 - 85,16^\circ) = 0,0143,$$

$$\rho_n = 0,82^\circ,$$

$$T_n = \frac{92,7 \cdot 10^{-3}}{155 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3}} = 0,352,$$

$$q = \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 228}{1,63 \cdot 10^{-3} \cdot 96} = 2,47.$$

Для полученных постоянных  $T = 1,14$  и  $T_n = 0,352$  типовых кривых при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0,1$  находим:

$$\tau_{отк} = 2,04 \text{ при } q = 2$$

и

$$\tau_{отк} = 2,22 \text{ при } q = 3.$$

После линейной интерполяции находим для  $q = 2,47$ :

$$\tau_{отк} = (2,22 - 2,04)(2,47 - 2) + 2,04 = 2,12.$$

Для тех же постоянных, но при  $\sin \delta'_{120\phi} = 0$  из типовых кривых находим:

$$\tau_{отк} = 1,95 \text{ при } q = 2;$$

$$\tau_{отк} = 2,11 \text{ при } q = 3,$$

при  $q = 2,47$ ,

$$\tau_{отк} = (2,11 - 1,95) \cdot (2,47 - 2) + 1,95 = 2,025.$$

Для  $\sin \delta'_{12\phi} = 0,093$  путем линейной интерполяции находим:

$$\tau_{отк} = \frac{2,12 - 2,025}{0,1} \cdot 0,093 + 2,025 = 2,11.$$

Поскольку  $\rho > \rho_n$ , коэффициент  $k = 0,85$ ; тогда

$$t_{отк} = 0,85 \frac{2,11}{\sqrt{314 \cdot 65,5 \cdot 1,63 \cdot 10^{-3}}} = 0,309 \text{ сек.}$$

#### Литература

1. В. А. Веников. Упрощенный расчет динамической устойчивости электрических систем. Электричество, № 1948.
2. Д. Е. Трофименко. Расчет динамической устойчивости двух станций по типовым кривым. Электричество, № 9, 1945.



## Индукционный нагрев соленой рыбы

Инж. Л. Л. БАРВИНСКИЙ

Киевский рыбокомбинат

рев токами высокой  
ты в пищевой и, в  
сти, рыбной про-  
енности, представ-  
значительные пре-  
ства, к числу кото-  
ледует отнести уско-  
производственного

возможность пол-  
ювейеризации процессов, снижение потерь  
изводстве, возможность использования отхо-  
увеличение срока хранения готовой продук-  
Между тем, в литературе вопросы примене-  
оков высокой частоты для нагрева мясных  
ных продуктов разработаны недостаточ-  
ходные данные. а) Нагреваемый объект —  
я рыба различных пород. Средние ее габ-  
е размеры:  $300 \times 100 \times 60$  мм.

Соленая рыба — полупроводник со зна-  
ным преобладанием токов проводимости на  
ах от 0 до 100 мГц. Средняя величина  
юго активного сопротивления различных  
рыбы с соленостью 3% в диапазоне частот  
500 кгц до 50 мГц не зависит от частоты и  
нагреве от 20 до 100°С равна 15...25 омсм.

Время нагрева — 10 мин. Начальная тем-  
пура 20°С, конечная 100°С. Количество вла-  
паряющейся при нагреве, равно 3% началь-  
веса рыбы. Исходя из этого, удельная мощ-  
выделяемая в 1 см<sup>3</sup> нагреваемого объекта,  
1 вт/см<sup>3</sup>.

Выбор типа нагревательного устройства и ра-  
и частоты. Небольшая величина удельного  
ного сопротивления соленой рыбы говорит  
несообразности применения индукционного  
ва.

ействительно, максимальная удельная мощ-  
( $\frac{вт}{см^3}$ ), выделяемая в проводнике, располо-

ом в электрическом поле, может быть опре-  
а по формуле [Л. 1]:

$$P = 2\pi^2 \rho (\epsilon_0 \cdot f \cdot E_{np})^2,$$

— удельное активное сопротивление, омсм;  
=  $0,0886 \cdot 10^{-12}$ ;

— частота, гц;

— пробивное напряжение воздушного про-  
межутка, в.

и  $f = 15$  мГц и  $\rho = 20$  омсм вычисленная  
иная удельной мощности составляет всего  
лько сотых вт.

Рассмотрены особенности промышленной установки  
для индукционного нагрева полупроводников — со-  
леных пищевых продуктов, величина удельного ак-  
тивного сопротивления которых равна 15...50 омсм.  
Предлагается применение индуктора с емкостной ком-  
пенсацией индуктивности путем последовательного  
включения компенсирующих конденсаторов. Описана  
конструкция индуктора, работающего на частоте  
15 мГц для нагрева соленой рыбы в производстве  
горячего копчения.

При сквозном индук-  
ционном нагреве рабочая  
частота должна быть не  
более той, при которой  
глубина проникновения  
токов равна половине по-  
перечного размера нагре-  
ваемого объекта:

$$f \leq \frac{2,81 \cdot 10^7 \cdot \rho}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 \cdot \mu},$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость нагреваемого  
материала;

$b$  — поперечный размер нагреваемого объ-  
екта, см.

Для выяснения характера зависимостей и по-  
лучения приближенных расчетных величин вос-  
пользуемся формулой для вычисления мощности,  
поглощаемой цилиндрическим проводником, по-  
мещенным в переменном магнитном поле.

Для вычисления мощности, поглощаемой ры-  
бой, введем понятие об эквивалентном радиусе  
рыбы. Будем считать, что

$$\pi r^2 = S,$$

где  $r$  — эквивалентный радиус рыбы;

$S$  — площадь сечения рыбы плоскостью, пер-  
пендикулярной направлению вектора на-  
пряженности магнитного поля.

Мощность, выделяющаяся на единице длины  
цилиндра радиуса  $r$ , помещенного в быстропере-  
менном магнитном поле индуктора, определяется  
по формуле [Л. 2]:

$$P = 1,25 \cdot 10^{-3} I^2 r \sqrt{\rho \mu} f \cdot F\left(\frac{r}{z}\right),$$

где  $I$  — настил тока, а/см;

$F\left(\frac{r}{z}\right)$  — функция, значение которой определяется  
по графику в зависимости от величины

отношения  $\frac{r}{z}$ , где  $z = 5300 \cdot \sqrt{\frac{\rho \mu}{f}}$ .

Средняя величина мощности, выделяющейся  
в единице объема нагреваемого цилиндра (пре-  
небрегая неравномерностью распределения по ра-  
диусу), может быть определена по формуле:

$$P = 1,25 \cdot 10^{-3} \frac{I^2}{\pi \cdot r} \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \cdot F\left(\frac{r}{z}\right).$$

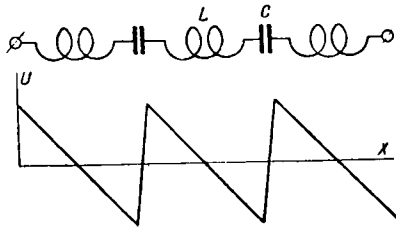


Рис. 1. Схема индуктора с компенсирующими конденсаторами и график распределения напряжения.

При  $I = 5 \text{ а/см}$ ,  $r = 6 \text{ см}$ ,  $\rho = 20 \text{ омсм}$ ,  $f = 15 \text{ мггц}$  получим величину удельной мощности  $P = 1,2 \frac{\text{вт}}{\text{см}^3}$ , что вполне соответствует поставленным условиям.

Следовательно, при применении индукционно-го нагрева рыбы можно получить необходимую плотность энергии при частоте порядка 15 мггц.

**Индуктор для массового производства.** При конструировании промышленного типа индуктора исходными величинами являются: передаваемая мощность, величина рабочего объема и его форма, рабочая частота, допустимая степень неравномерности распределения напряженности магнитного поля по рабочему объему, максимальное допустимое напряжение между токонесущими частями индуктора и нагреваемым объектом.

При помощи обычного индуктора можно обеспечить необходимую плотность энергии, но рабочий объем при этом для работы на частоте порядка 15 мггц оказывается малым.

Для получения большого рабочего объема индуктора (70 дм<sup>3</sup>), работающего в области коротких волн, применена емкостная компенсация индуктивности при последовательном включении конденсаторов (рис. 1).

Величины емкости компенсирующего конденсатора  $C$  и индуктивности  $L$  элемента рассчитаны таким образом, чтобы при рабочей частоте индуктивное сопротивление одного элемента индуктора полностью компенсировалось реактивным сопротивлением соответствующего конденсатора ( $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ).

Так как элементов индуктивности на один больше, чем конденсаторов, то реактивность цепочки в целом на рабочей частоте имеет индуктивный характер и равна  $\omega L$ . Падение напряжения как на компенсирующем конденсаторе, так и на индуктивности элемента индуктора количественно равно подведенному к концам цепочки колебательному напряжению. Следовательно, все детали индуктора должны быть равнопрочными в отношении электрического пробоя.

Сопротивление, вносимое нагреваемым объектом в контур, индуктивностью которого является такая цепочка, увеличивается в  $n$  раз в сравнении с сопротивлением, вносимым в один элемент индуктора.

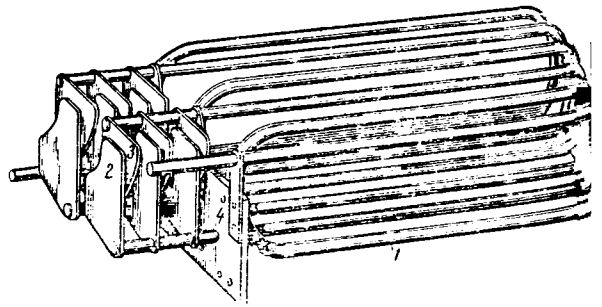


Рис. 2. Конструкция индуктора с компенсирующими конденсаторами.

1 — элемент индуктора; 2 — неподвижная пластина компенсирующего конденсатора; 3 — подвижная пластина компенсирующего конденсатора; 4 — пластина из листового микаלקса.

Эквивалентное сопротивление контура, в качестве индуктивности которого используется почка, определяется по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\omega^2 L^2}{r_n + nr_n},$$

где  $\omega$  — угловая частота;

$L$  — эквивалентная индуктивность цепи;

$r_n$  — общее сопротивление потерь в контуре;

$n$  — число элементов индуктора;

$r_n$  — сопротивление, вносимое нагреваемым объектом в один элемент индуктора.

Если индуктор представляет собой индуктивность колебательного контура генератора, то число элементов индуктивности  $n$  рассчитывается так, чтобы величина эквивалентного сопротивления контура соответствовала оптимальным условиям работы генератора.

Индуктор, состоящий из шести элементов и пяти компенсирующих конденсаторов (частота показана на рис. 2), обеспечивает передачу греваемому объекту мощности 36 кВт при частоте 15 мггц и амплитуде высокочастотного напряжения 10 кв. Его габаритные размеры 1 200 × 900 × 200 мм, размеры рабочего объема 1 200 × 600 × 100 мм; производительность ≈ 200 кг рыбы в час; плотность энергии, создаваемая в греваемом объекте, составляет 1...1,5

к. п. д. порядка 0,9; неравномерность распределения напряженности магнитного поля в пределах рабочего объема ±15%.

**Особенности схемы генератора.** Для обеспечения отдачи мощности нагреваемому объекту в возможных в процессе работы на конвейере изменениях нагрузки включение индуктора в качестве индуктивности контура генератора более целесообразно, чем применение сложной схемы. Индуктор при этом является индуктивностью колебательного контура генератора и определяет его рабочую частоту. При имеющихся изменениях в процессе работы изменениях нагрузки (т. е. в нагрузке индуктора рыбой) частота генератора не меняется в пределах ±1%, но отдача мощности нагреваемому объекту благодаря применению простой схемы выхода практически неизменна.

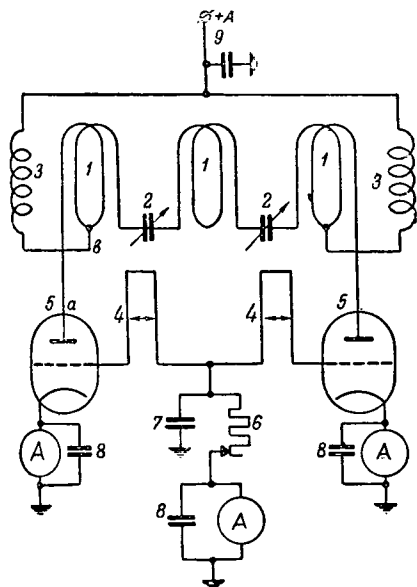


Рис. 3. Схема генератора.

1—элемент индуктора; 2—компенсирующий конденсатор; 3—резистивный дроссель (0,1 МГЦ); 4—с точная индуктивность; 5—генераторная лампа Г-431; 6—сопротивление утечки; 7, 8, 9—блокировочные конденсаторы.

В качестве схемы может быть выбрана любая схема самовозбуждающегося генератора, но по отношению симметричного индуктора целесообразна двухтактная с индуктивной обратной связью. Схема установки для нагрева рыбы, работающей на двух лампах Г-431, показана на рис. 3. Во избежание самовозбуждения по цепям питания анодов ламп (цепь *a, в, +А*) разделительные дроссели должны обладать значительной индуктивностью (условие самовозбуждения на дросселях не должно удовлетворяться). Для уменьшения потерь энергии в дросселях питания дроссели подключаются к точкам нулевого потенциала индуктора.

Во избежание самовозбуждения схемы при параллельной (в отличие от двухтактной) работе оказалось необходимым устранить обычно применяющийся в двухтактных схемах уравновешивающий дроссель в сеточной цепи ламп. Идентичность работы плеч генератора достигается регулировкой величины сеточной индуктивности, осуществляемой для каждого плеча отдельно.

Настройка генератора производится изменением емкости компенсирующих конденсаторов индуктора и величин индуктивностей в сеточных цепях ламп.

**Эксплуатация установки, технико-экономические показатели ее работы.** Установка для нагрева рыбы токами высокой частоты описанного типа изготовлена в 1951 г. и с февраля 1952 г. работает на Киевском рыбкомбинате в производстве горячего копчения и печеной рыбы.

В деревянных ящиках с размерами  $600 \times 600 \times 100$  мм по ленте транспортера рыба поступает в индуктор и по мере продвижения внутри него проваривается. Длительность варки 6...10 мин; производительность установки в зависимости от породы и сорта рыбы составляет 150...200 кг готовой продукции в час; к.п.д. порядка 0,5; фактический расход электроэнергии составляет в среднем 0,35 кВтч на 1 кг готовой продукции.

В сравнении с обычными методами нагрева, применяемыми в рыбной промышленности, нагрев рыбы токами высокой частоты обладает значительными преимуществами, основными из которых являются:

а) экономия дорогостоящего сырья 5...12% (в зависимости от пород и сортов рыбы) за счет снижения потерь в производстве, имеющих место вследствие вытекания жиров, белков и влаги из нагреваемой рыбы и составляющих при обычных способах нагрева (т. е. путем теплообмена) 20...30% начального веса;

б) увеличение срока хранения готовой продукции в 2...3 раза;

в) широкие возможности регулирования, конвейеризации и автоматизации процессов.

Общая экономия при применении описанной установки в производстве составляет от 0,5 до 1 млн. руб. в год в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции.

#### Литература

1. А. Н. Мазнин, А. В. Нетушил и Е. П. Парини. Высоочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, стр. 236, 1950.
2. Г. И. Баба т. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Госэнергоиздат, стр. 431, 1946.

[26.4.1952]



# Экспериментальное исследование соленоидов электропривода стрелок трамвая

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

Автоматический перевод стрелок трамвая посредством соленоидного электропривода находит широкое применение в эксплуатации разветвленных трамвайных сетей.

В настоящее время применяются две основные системы автоматического управления стрелками: 1) автоматическое управление, осуществляемое путем включения цепи дугой проходящего вагона, и 2) дистанционное автоматическое управление, осуществляемое из контрольного поста управления.

При автоматической системе управления при проходе вагона через контрольный участок под током осуществляется движение в прямом направлении, а при езде без тока обеспечивается поворот налево.

Управление стрелочным приводом осуществляется по схеме рис. 1. Для перевода стрелок предусматривается два соленоида: последовательного возбуждения 1 и параллельного 2. При прохождении токоприемником изолированного участка контактной сети 3 под током соленоид последовательного возбуждения оказывается соединенным с одной стороны с контактной сетью 4, обеспечивающей питание этого соленоида, а с другой стороны через цепь вагона с рельсами. Обтекание соленоида последовательного возбуждения током вызывает втягивание сердечника соленоида и воздействие на трехплечный рычаг 5, осуществляющий перевод стрелки в нужном направлении. По достижении вагоном участка контактной сети с салазками 6 дуга вагона соединяет изолированные от контактного провода салазки и подает на них напряжение контактной сети вследствие чего осуществляется включение соленоида параллельного возбуждения 2, обеспечивающего воздействие на трехплечий рычаг 5, осуществляющий перевод стрелки в исходное положение.

При необходимости езды «прямо» или поворота направо вагон должен проходить изолированный участок контактной сети 3 без тока. В этом случае соленоид 1 не будет обтекаться током и перевода стрелки не произойдет.

Дистанционная система автоматического управления стрелками применяется на площадях

Приводятся данные экспериментального исследования соленоидного электропривода для стрелок трамвайной системы треста «Мосэлектротранс». Выявляются перенапряжения, возникающие на выводах соленоида при отключении, и определяется перегрев соленоида при различных режимах его работы. Вскрываются причины аварийности соленоидов в эксплуатации, рекомендуются мероприятия для их устранения и делаются обобщающие выводы о необходимости исследований тяговой аппаратуры в аварийных режимах работы.

с несколькими схожими линиями трамвая и осуществляется из контрольного пункта управления, расположенного в пределах хорошей слышимости контрольного трамвайного поста. Управление осуществляется также посредством

двух соленоидов, воздействующих через плечий рычаг на управляемую стрелку. В отличие от автоматической системы управления используются два соленоида параллельного возбуждения, управляемые по кнопочно-контактной дистанционной системе управления. Контактные салазки, располагаемые на подходах к трамвая к стрелке определенного направления

## Целевая установка и методика исследования

Лабораторные исследования соленоидного электропривода стрелок были поставлены в связи с наблюдавшимися в эксплуатации случаи выхода из строя соленоидов параллельного возбуждения вследствие предполагаемого возникновения значительных перенапряжений на выводах соленоида при отключении его от сети. Основной задачей исследований являлось определение зависимости величины перенапряжения соленоиде при отключении его от сети при различных значениях разрядных сопротивлений.

Последующей задачей исследований была проверка теплового режима соленоида, а также

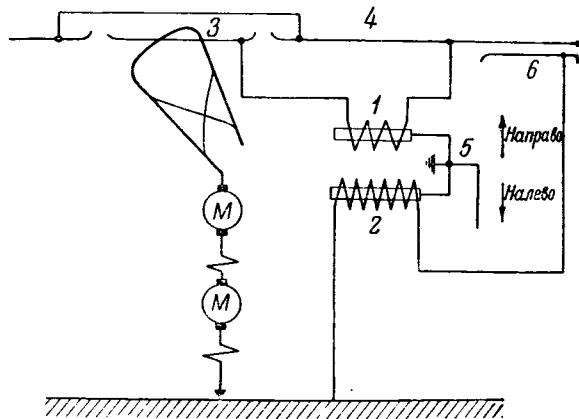


Рис. 1. Принципиальная схема работы автоматического привода для стрелок трамвая.

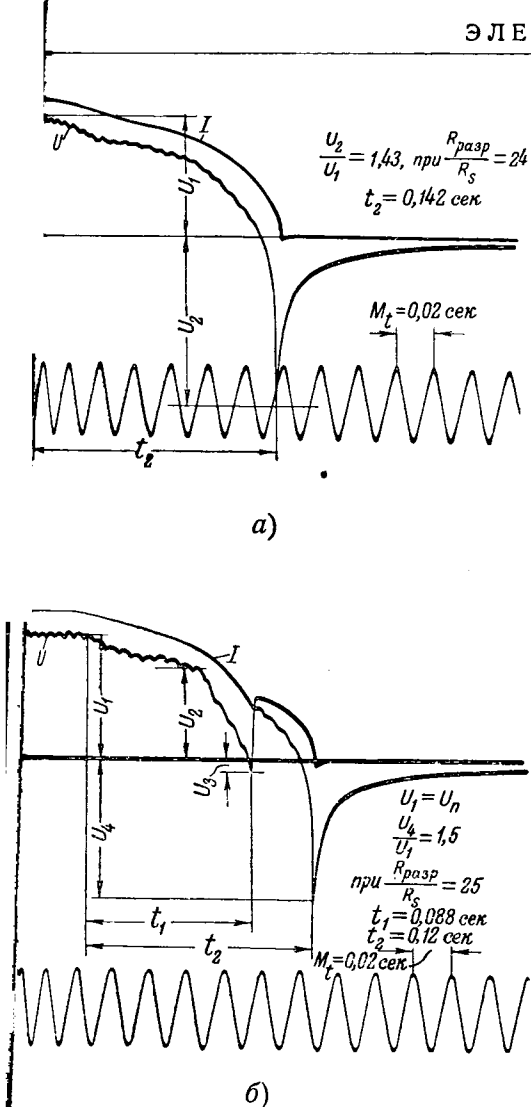


Рис. 2. Осциллограммы процесса отключения соленоида от сети.

*а* — при нормально отрегулированных контактах контактора; *б* — при неотрегулированных контактах, вызывающих повторное возникновение пика перенапряжения.

тяговых параметров при работе в нормальных и отличных от них условиях эксплуатации.

При размыкании цепи соленоида параллельно возбуждения со стальным сердечником, пилотной от контактного провода с напряжением  $U_1$ , возникает перенапряжение, вызванное выходом энергии магнитного поля катушки в электростатическую энергию. При неблагоприятных условиях, возникающих на отключаемом соленоиде, могут возникнуть значительные перепады напряжения и возможны междувитковые пробой. Для снижения перенапряжения возможно действие замедления процесса отключения катушки от сети, а также применение параллельного включения к ней разрядного сопротивления. В процессе проведения настоящих исследований к отключаемому соленоиду подключались разрядное сопротивление различной кратности по отношению к омическому сопротивлению соленоида. Анализ процессов отключения катушки осуществлялась с помощью электромагнитного многократного осциллографа. Кроме того, в результате записи пиковых значений перенапря-

жения контролировались электроннолучевым осциллографом.

Тепловой режим соленоида осуществлялся как для прерывисто-кратковременного включения, являющегося нормальным режимом работы соленоида в эксплуатационных условиях, так и для случая продолжительного включения, могущего иметь место в аварийных условиях. Нагрев соленоида в процессе проведения теплового режима контролировался по методу сопротивления.

Тяговое усилие на штоке соленоида определялось с помощью пружинного динамометра при номинальном и при пониженных напряжениях питающей соленоид контактной сети.

**Результаты исследований. Перенапряжения на соленоиде.** Соленоид намотан проволокой с изоляцией ПБД и заключен в стальной корпус, залитый кабельной массой (изоляция класса А с допустимой температурой перегрева  $70^\circ\text{C}$ ).

Величина перенапряжения, возникающего при отключении соленоида, при отсутствии разрядного сопротивления составила  $1250\text{ в}$ ,  $208\%$  номинального напряжения питающего соленоид.

Столь низкая величина основного перенапряжения соленоида, незащищенного разрядным сопротивлением, обусловлена наличием контакторной системы включения и отключения, примененной в схеме исследования и характерной для систем управления соленоидами в эксплуатации. Наличие контакторного включения и отключения обеспечивает постепенное изменение в процессе отключения сопротивления между главными контактами контактора. Следствием этого является снижение величины перенапряжения, возникающего при отключении соленоида, до значения, не представляющего для него опасности; величина напряжения между слоями обмоток соленоида даже в самых неблагоприятных условиях не превышает в этом случае  $42\text{ в}$ .

В условиях эксплуатации к соленоиду подключалось разрядное сопротивление в  $3000\text{ ом}$ , в  $47,8$  раз большее омического сопротивления обмотки соленоида.

При указанном разрядном сопротивлении величина перенапряжения, как показали многочисленные опыты, составляет  $990\text{ в}$ , т. е.  $165\%$  номинального напряжения, питающего соленоид, или  $79\%$  значения перенапряжения, получаемого при его отключении без разрядного сопротивления.

Как видно из осциллограмм рис. 2—*а*, *б*, процесс отключения соленоида растянут во времени и длится  $6 \dots 7$  периодов. При неотрегулированных контактах контактора вследствие их вибрации наблюдалось повторное зажигание дуги, вызывающее повторные пики перенапряжения (рис. 2, *б*). Регулировка нажатия контактов контактора позволила устранить это явление.

В результате снятия многочисленных осциллограмм удалось выявить оптимальную величину разрядного сопротивления, необходимого для снижения величины перенапряжения до безопасного значения.



Сводные результаты опытов по отключению соленоида от сети при различных значениях подключенных к нему разрядных сопротивлений приведены в таблице.

Напряжение питания соленоида, <i>в</i> . . . . .	600	600	600	600	600
Разрядное сопротивление, <i>ом</i> . . . . .	Нет	3 000	1 500	750	600
Отношение разрядного сопротивления к сопротивлению обмотки соленоида, % . . . . .	$\infty$	47,8	23,9	12	9,5
Напряжение, возникающее при отключении соленоида, <i>в</i> . . . . .	1 250	990	855	585	540
Кратность величины перенапряжения по отношению к номинальному, %	208	165	143	98	90

Значение перенапряжения в зависимости от величины подключаемого разрядного сопротивления дано на рис. 3.

Было принято ограничить перенапряжение на соленоиде номинальным значением напряжения, чему соответствует разрядное сопротивление в 750 *ом* (25-кратное сопротивлению обмотки соленоида).

В качестве основного типа разрядного сопротивления рекомендовано применение остеклованных керамических сопротивлений, размещаемых в герметическом кожухе.

**Тепловой режим.** Исследование теплового режима работы соленоида при прерывистом кратковременном режиме работы, характеризуемом 30 включениями в час при продолжительности каждого включения в 2 *сек*, показало, что по истечении одного часа, т. е. после 30 включений, перегрев соленоида составляет 28,2° С, а установившийся тепловой режим достигается после 32 включений и составляет 30,4° С, что значительно ниже предельно допускаемого перегрева в 70° С.

В эксплуатационных условиях могут иметь место нарушения нормального режима работы соленоида, например, вследствие спекания сило-

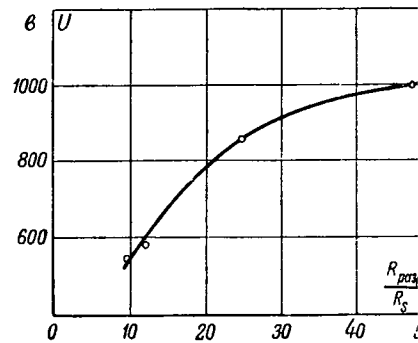


Рис. 3. Перенапряжение на отключаемом соленоиде в зависимости от кратности разрядного сопротивления.

вых контактов контактора или задержки на участке контактной сети, на котором находятся отключающие салазки соленоида последовательного возбуждения. При этих нарушениях имеет место режим непрерывного включения соленоида. Оказалось, что при непрерывном включении предельно допускаемое значение перегрева в 70° С достигается через 98 *сек*.

Через 5 мин после включения перегрев обмотки соленоида достигает 720° С. К концу этой твердая заливка соленоида полностью расплавилась и фонтанировала через защитное отверстие корпуса.

Для предупреждения возможности длительного аварийного включения соленоида, а также взрыва корпуса, были рекомендованы защитные средства в виде специальных керамических плавких вставок, рассчитанных на ограничение времени включения соленоида несколькими секундами или, что лучше, применение времени или тепловых реле, воздействующих на цепь специального дополнительного лимитного контактора, срабатывающего только в случае превышения допустимой длительности включения соленоида.

**Выводы.** Результаты описанных опытов вызывают важность исследования тяговой аппаратуры не только в нормальном режиме, а и в условиях, могущих возникнуть в аварийных слу-



## Рубиновые звезды Московского Кремля

К 15-летию устиновки

В 1937 г. к двадцатой годовщине Великой Октябрьской социалистической революции на пяти башнях Московского Кремля зажглись рубиновые пятиконечные звезды.

Создание рубиновых звезд это достижение советской техники и искусства.

Великолепное сияние рубиновых звезд над Кремлем, над городом Москвой в котором живет и трудится великий Сталин, является символом счастья нашей Родины, к которой приковано внимание, надежда и любовь всего передового человечества.

Миллионы советских людей с гордостью обращают свои взоры на величественные стены и башни Московского Кремля, на которых ярко сияют рубиновые звезды.

Много изобретательства и оригинальных технических идей вложено советскими учеными и мастерами производства при проектировании и изготовлении этого уникального сооружения.

Вследствие различной высоты и архитектуры кремлевских башен каждая звезда имеет свои размеры, форму и рисунок. Размеры звезд и их художественное оформление правильно сочетаются с высотой и архитектурой башен. Самая высокая звезда, установленная на Водовзводной башне, имеет расстояние между концами горизонтальных лучей 3 м. Это расстояние у звезды Боровицкой башни—3,2 м, Троицкой башни—3,5 м, Спасской и Песчаной—по 3,75 м.

Основная конструкция звезд выполнена из нержавеющей стали и представляет пятиконечную звездообразную звезду, концы которой имеют форму четырехгранной пирамиды. При проектировании и изготовлении звезд было обращено особое внимание на прочность и жесткость конструкции и отдельных элементов. Звезды рассчитаны на максимальное давление ураганного ветра, т. е. на  $200 \text{ кг/м}^2$  или около 1 200 кг на каждую звезду.

Несмотря на значительный вес звезд (каждая из них весит около 1 т) они сравнительно легко раскачиваются от изменения направления ветра благодаря тому, что они установлены на специальных шарикоупорных шарикоподшипниках, размещенных внутри звезд. В неустойчивые ветреные дни звезды меняют свое положение несколько раз. Они устанавливаются всегда своей лобовой поверхностью против ветра, в отличие от флюгера, который устанавливается вдоль ветра — ребром ветру. Поворот звезды своей лобовой поверхностью против ветра объясняется архитектурно-художественной формой звезд, в которых предусмотрено уменьшение толщины от центра к периферии. Изменить самоустановление звезды лобовой поверхностью к направлению ветра можно было бы за счет смещения оси вращения звезды

на значительную величину, порядка 200...300 мм. Но такое смещение звезды относительно шпиля башни было бы отчетливо видно снизу, что нарушало бы художественную соразмерность всего архитектурного комплекса. Однако центр звезд смещен все же относительно оси примерно на 40 мм (рис. 1). Такой мало заметный с земли эксцентриситет хотя полностью не разрешает задачу, но частично разгружает звезду от полного лобового давления ветра и в то же время обеспечивает большую плавность поворота.

Особые трудности стояли перед светотехниками. Для того чтобы светящая звезда была хорошо и четко видна на фоне неба, необходимо было сообщить ее поверхности достаточную яркость. Кроме того, во избежание искажения зрительного восприятия формы звезды, выпячивания отдельных частей и других нарушений требовалось, чтобы яркости всех лучей и центральной части были одинаковы. Решение задачи равномерного освещения всей поверхности звезды затруднялось еще и тем, что звезды имеют большой размах по ширине (от 3 000 до 3 750 мм) и малую поперечную толщину (не более 800 мм). Светотехническая лаборатория Всесоюзного электротехнического института им. Ленина успешно справилась с этой трудной задачей.

Освещение рубиновых звезд осуществляется лампами накаливания. Внутри каждой звезды установлено по одной лампе, а для равномерного распределения светового потока лампы по всей поверхности звезды установлен призматический

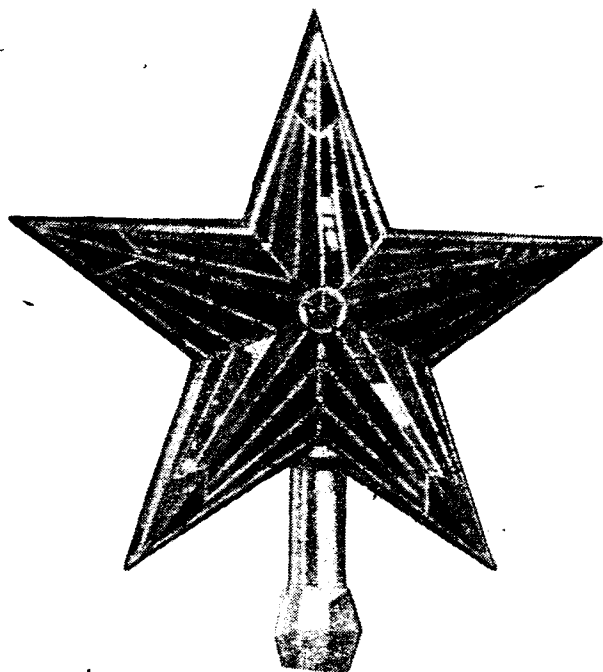


Рис. 1.

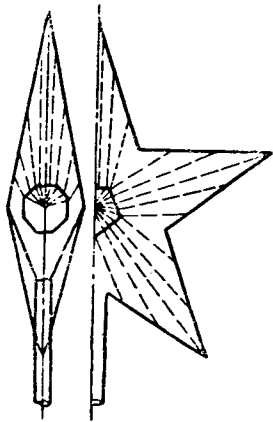


Рис. 2.

рефрактор, действие которого схематически показано на рис. 2.

Призматический рефрактор специальной конструкции представляет собой оптическую систему, охватывающую лампу со всех сторон, и состоит из призматических стеклянных плиток различных размеров и форм. Общий вид призматического рефрактора показан на рис. 3. На рис. 4 показана кривая распределения силы света призматического рефрактора; за 100% принята средняя сферическая сила света голдой лампы.

Как видно из чертежа, кривая светораспределения имеет резко выраженные максимумы в направлениях лучей звезды и такие же резкие минимумы в направлении ее центральной части. Этим достигается равномерное освещение всей поверхности звезды. Плиткам рефрактора приходится работать в трудных температурных условиях. Вследствие близости его к мощной лампе и большого нагрева излучением этой лампы обычные стекла не годятся для его изготовления. Поэтому плитки рефрактора изготовлены из особого теплоустойкого стекла, обладающего очень низким коэффициентом расширения и по своему составу и свойствам приближающегося к кварцу.

Выше было отмечено, что звезды по своим размерам не одинаковы, поэтому и мощности ламп в звездах различны. Мощность лампы определялась яркостью, которую желательно достигнуть на поверхности звезды. Последнее в свою очередь диктовалось условиями дневной и ночной видимости звезд. В звездах Спасской, Никольской и Троицкой башен установлены лампы мощностью по 5 000 вт, а Боровицкой и Водозводной по 3 700 вт. Колбы лампы имеют ци-

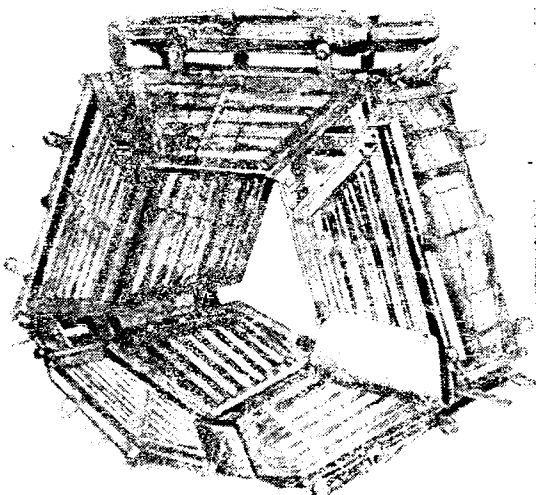


Рис. 3.

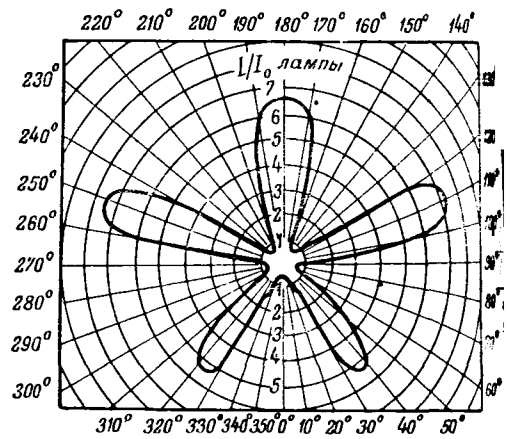


Рис. 4.

линдрическую форму и изготавливаются из стойкого молибденового стекла. Как видно на рис. 5, тело (нить) накала ламп конструкции выполнено в виде шатра в целях лучшего освещения лучей звезд и особенно верхнего луча обеспечения большей надежности освещения звезд в каждой лампе смонтированы две накала (спирали). Поэтому перегорание спирали не приводит к прекращению свечения звезды, а только лишь уменьшает ее яркость и сигнализирует о необходимости замены лампы.

Внутри колбы лампы находится вольфрамовый порошок, вследствие чего периодически происходит самоочистка внутренней полости колбы от темного налета.

Несмотря на большую мощность ламп, их бариты удалось выполнить незначительными. Лампы 5 000 вт они составляют: длина — 283 мм, диаметр колбы — 177 мм, высота светового центра — 225 мм. Номинальная световая отдача лампы мощностью 5 000 вт — 22 лмвт. Такую световую отдачу следует считать для ламп накаливания очень высокой, так как обычно применяемые в быту лампы накаливания мощностью 40...100 вт имеют значительно меньшую световую отдачу от 10 до 13 лмвт. При полном номинальном напряжении в 110 в пятикиловаттная лампа издает световой поток в 110 000 лм.

Основные требования к звездам заключаются в том, чтобы они не только хорошо светились ночью, но и эффектно выглядели днем. Цвет звезды является одним из основных факторов не только художественного, но и светового оформления звезд. Требования художественного оформления заключались в обеспечении большой насыщенности цвета и достаточной его яркости. Кроме того, контур звезд должен отчетливо читаться в дневное, так и в ночное время, сохраняя при этом рубиново-красный цвет. Последнее обстоятельство вызывало особые затруднения, ибо известно, что красное стекло при освещении его снаружи дневным светом даже с небольшого расстояния кажется почти черным. Вместе с тем сквозь стекло не должны просвечивать накаленные нити ламп и на поверхности звезд не должны быть видны резкие пятна. Поэтому вопросы остекления и освещения звезд решались одновременно как взаимосвязанные.

Остекление звезд выполнено трехслойным, состоящим из рубиново-красного и молочно-белого стекла, прослоенных прозрачным молочным стеклом. Молочно-белое стекло, хорошо рассеивающее свет ламп, служит как бы палочкой к рубиново-красному стеклу. Вместе с тем, отражая обратно значительную часть прошедшего снаружи сквозь красное стекло дневного света, а молочное стекло в известной мере компенсирует отмеченный выше недостаток красного стекла, которое днем кажется почти черным в отраженном свете. Некоторое количество отраженного от молочного стекла света проходит сквозь красное стекло снова наружу и несколько смягчает темноту этого стекла. При таком способе остекления звезды светятся рубиновым светом не только ночью, но и днем. Вместе с тем молочное стекло скрывает от глаза помещенные внутри лампы электролампы и отдельные элементы каркаса.

Для остекления звезд применено стекло различных оттенков, чем достигается большая контрастность и подчеркивается лучистая форма звезд. Это стекло пропускает только красные лучи длиной волны более 0,62 микрона, поглощая остальные лучи видимого спектра.

Для избежание поломки отдельных стекол от удара и для обеспечения высокой механической прочности толщина стекла принята 6...8 мм. Внешняя поверхность каркаса звезд и шпильки покрыты обрамляющими деталями различных форм и конфигураций. Эти детали изготовлены из листовой меди и позолочены.

Как было указано, что каждая звезда освещается одной лампой накаливания мощностью 3700 вт, у которой тело накала имеет температуру около 2800°С. Лампа помещена в матический рефрактор, охватывающий ее со всех сторон. Такое расположение мощной лампы для специального охлаждения вызвало бы недопустимое повышение температуры колб ламп, матического рефрактора и остекления звезд. Значительное повышение температуры не только сократило бы срок службы ламп, но и разрушило бы колбу и привело бы к растрескиванию рубиново-красного и молочного стекла. Последнее было вызвано еще тем, что рубиново-красное стекло подвергается переменным атмосферным явлениям — дождю или снегопаду. Лампы горят круглые сутки и в любую погоду. Каждая лампа мощностью 5000 вт выделяет 4300 калорий тепла в час. Для удаления выделяемого лампой тепла обеспечения нормального температурного режима при горении ламп устроена специальная вентиляция.

Вентиляторы специальной конструкции центрального типа для охлаждения кремлевских звезд имеют производительность 300 м<sup>3</sup>/час. В каждой башне установлено по два вентилятора; один из них резервный. Вентиляторы заблокированы между собой и при остановке одного вентилятора второй автоматически включается в работу. Кроме того, вентиляторы заблокированы

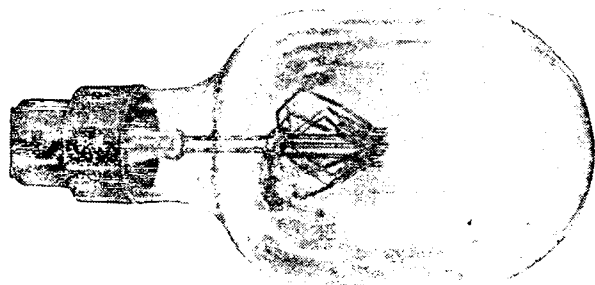


Рис. 5.

с электролампой звезды, что дает возможность при отключении по каким-либо причинам обоих вентиляторов немедленно, автоматически, отключить лампу.

Забираемый центробежным вентилятором наружный воздух подвергается в специальных фильтрах очистке от пыли и по полному шпилью в шатре башни подается в звезду. Выход воздуха из звезды происходит через щелевые отверстия, расположенные по контуру вертикального луча и верхних частей горизонтальных лучей. Отверстия эти защищены от попадания во внутрь звезды дождя и снега. Подаваемый объем воздуха обеспечивает избыточное давление внутри звезды и поэтому предотвращает возможность попадания в звезду неочищенного воздуха из окружающей среды.

Все управление сложным и разнообразным оборудованием и механизмами кремлевских звезд централизованно и осуществляется с одного места — центрального пункта управления, дежурный которого имеет возможность дистанционно включать или отключать лампу любой звезды или вентилятор. С центрального пункта управления можно также повышать или понижать накал ламп.

Накал ламп постоянно регулируется с помощью специальной автоматики так, что лампа получает неизменное напряжение заранее данной величины. Режим нормальной работы ламп, а также всякое изменение или нарушение режима автоматически сигнализируются на центральный пункт управления.

В связи с тем, что звезды находятся в атмосфере сравнительно загрязненного воздуха, внутренние и наружные поверхности их подвергаются периодической очистке от пыли и копоти. Очистка звезд производится со специальных подъемных приспособлений. Все механизмы для обслуживания звезд расположены внутри самих башен. Наличие механизированных устройств позволяет обеспечивать бесперебойную подачу воздуха в звезду и облегчает работу по замене перегоревших ламп. Замену ламп в звезде производят практически через 2...3 мес. непрерывного ее горения и весь процесс замены требует не более 30...35 мин. Перегоревшие лампы извлекаются из звезды по отверстию в шпилье башни при помощи специальных подъемных устройств.

Инж. Г. С. МАТЮХИН



## О правилах защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами

(В порядке обсуждения)

Кандидат техн. наук Б. Г. ЛОРТКИПАНИДЗЕ

Энергетический институт АН Грузинской ССР

Еще в 1940 г. вступили в силу поныне действующие «Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами» [Л. 1]. Появление Правил явилось в то время значительным шагом вперед в деле упорядочения мероприятий по борьбе с электрокоррозией подземных металлических сооружений.

За истекшее время одновременно с значительным ростом в нашей стране хозяйства подземных сооружений и сетей внутригородского и междугородного электротранспорта проводились значительные работы по защите ряда важных подземных сооружений от коррозии, сопутствуемые опытными и теоретическими исследованиями блуждающих токов. Накопленный рядом организаций опыт и дальнейшая перспектива развития электротранспортных сетей и систем подземных сооружений уже сейчас обязывают критически подойти к некоторым пунктам Правил и ставить вопрос об их пересмотре.

Ниже приводятся некоторые замечания как принципиального, так и редакционного характера по пунктам Правил, по порядку их расположения.

1. В § 2 пропущено указание на то, что Правила не распространяются на рудничные электрические железные дороги.

2. Из § 3, ж следует, что будто речь идет об изолирующих муфтах кабеля. Надо поэтому дополнить параграф словами «...или трубопровода...» (см. § 103).

3. Неудачен в § 3, н термин «электроизолирующее основание», что может быть отнесено к несуществующему в действительности основанию с полными изоляционными свойствами. Этот термин лучше заменить: «основание с малой электропроводностью».

4. Наряду с упоминаемым в § 3, п термином «анодная зона» следовало бы ввести часто встречающийся и нужный термин «катодная зона».

5. Из § 3, т следует изъять слова «...являющаяся источником блуждающих токов...», как излишние и неточные, ибо рельсовая сеть не во всех своих точках является источником блуждающих токов.

6. В § 3, ю определение термина «потенциал по отношению к земле» нечеткое. Потенциал любой точки земли (электролитической среды) даже

в непосредственной близости от сооружения: функция самой точки и, следовательно, в различных точках среды, вообще говоря, различна. Значит неизбежна фиксация точки среды, относительно которой указывается потенциал. Поэтому вместо приведенного термина следует использовать следующие два:

ю) Положительный потенциал по отношению к близким точкам земли, некоторый фиксируемый прибором в данной точке подземного металлического сооружения или в какой-либо точке земной поверхности. Если в данной точке земной поверхности положительный потенциал относительно достаточно близких выбранных точек окружающей среды, когда несомненно факт утечки тока в окружающую среду, к которой принадлежат рассматриваемые точки (когда исключается влияние соседних сооружений, посторонних источников тока и гальванических пар).

я) Отрицательный потенциал по отношению к близким точкам земли (далее идет аналогичное вышеприведенное определение с заменой слов: «положительный» и «утечки» на слова: «отрицательный» и «поглощения»).

7. При заданной системе обратной сети, в конечном итоге, блуждающие токи определяются: 1) длиной участков между точками отсоса, 2) емкостью грузов, 3) электропроводностью между рельсами и землей и 4) сопротивлением рельсовых линий. Эти же четыре фактора определяют потенциал любой точки рельсов и, следовательно, падение напряжения между двумя точками. Однако характер зависимости падения напряжения от этих четырех величин существенно отличается от зависимости блуждающего тока. Так, например падение напряжения возрастает с увеличением длины участка и уменьшается с ростом электропроводности между рельсами и землей, в то время как ответвляющиеся с рельсов блуждающие токи увеличиваются вместе с длиной участка и электропроводностью. Стало быть, величина падения напряжения в рельсовой сети сама по себе ни в какой мере не определяет величину блуждающих токов, как об этом неправильно трактуется § 4, а.

Уменьшение падения напряжения в рельсовой сети может быть практически достигнуто только за счет снижения сопротивления рельсов

в. Но это мероприятие предусмотрено в «б» того же параграфа. Поэтому та часть, где говорится об уменьшении падения напряжения в рельсовой сети, — лишняя.

Далее, фигурирующее в том же § 4, а утверждение, что «для снижения величины блуждающих и ответвляющихся с рельсов в землю, необходимо ... уравнивание потенциалов пунктов отсасывания», также затемняет существо явления. Можно представить себе неограниченное число точек такого расположения сосредоточенных и распределенных нагрузок на достаточно большом участке между точками отсоса, при котором потенциалы точек отсоса будут равны, ответвляющиеся с рельсов блуждающие токи значительно превосходить блуждающие токи, ответвляющиеся с другого участка меньшей длины, на котором потенциалы точек отсоса будут заметно отличаться между собой. Не равенство потенциалов точек отсоса обуславливает минимум блуждающих токов, а целесообразное распределение нагрузок по отсасывающим и питательным линиям, что одновременно приводит и к равенству потенциалов точек отсоса.

Поэтому весь § 4 надлежит изложить в следующей редакции:

4. Снижение величины блуждающих токов, ответвляющихся с рельсов в землю, достигается:

- а) уменьшением длины рельсовых участков между точками отсоса за счет увеличения числа точек;
- б) таким распределением нагрузок по отсасывающим и питательным линиям, при котором абсолютная величина разности потенциалов между точками, в особенности соседними, уменьшается до нуля (п. 8);
- в) увеличением проводимости рельсовых линий за счет снижения сопротивления рельсовых путей (п. 7 и 19.. 23);
- г) уменьшением электропроводности между рельсами и землей».

§ 5 и 6 необходимы лишь для расчета трамвайной сети на основе общих требований, предъявляемых к сети с точки зрения наибольшей эффективности ее работы. § 5, 6 должны фигурировать в качестве расчетных норм в руководящих документах по проектированию и сооружению трамвайных сетей. Из Правил их следует изъять.

Следует попутно отметить, что нормируемые в § 5, 6 средние значения падения напряжения указаны без оговорки о том, что эти величины должны вычисляться для изолированных от земли рельсов. Примером недоразумения, возникшего на этой почве, могут служить расчеты средних значений падения напряжения с учетом утечки тока из рельсов в грунт, данные в [Л. 2], или некоторые неудачные попытки создания методики контроля работы рельсовой сети [Л. 3].

§ 7, содержащий расчетные значения увеличения погонного сопротивления рельсовых путей, знание которого необходимо для большинства инженерных расчетов, следует сохранить, снабдив его оговоркой, что речь идет об изолированном от земли участке рельсового пути.

10. Из § 10 можно сделать неправильный вывод о недопустимости электрического дренажа подземного сооружения непосредственно на минусовую шину, к которой присоединены отсасывающие питательные линии (§ 26). Как на пример отождествления в расчетах электрического дренажа с заземлением минусовой шины, можно указать на формулы К. Г. Марквардта. Для устранения подобных смешений представлений § 10 необходимо снабдить оговоркой.

11. Счетчик амперчасов и амперметр далеко не всегда смогут заменить друг друга. На каждой обратной питательной линии необходимы оба прибора. Поэтому в § 13 слова: «...счетчик амперчасов или амперметр» должны быть заменены словами: «...счетчик амперчасов и амперметр».

12. В § 18,б после слова «...креозотом» следует добавить слова: «...или другим антисептиком, не способствующим увеличению проводимости тока из рельсов в грунт».

§ 18,в, в соответствии со сказанным ранее, следует переформулировать так: «в) применением основания с малой электропроводностью».

13. В § 24 ясно сказано, что речь идет о сопротивлении стыка. Тем не менее, во избежание встречающихся ошибок следует в § 24 после слов: «...2,5 м сплошного рельса» добавить слова: «...т. е., сопротивление 1 м рельса со стыком не должно превосходить сопротивления 3,5 м сплошного рельса».

К § 24 имеется следующее принципиальное замечание.

Среди стыков с приваренными стыковыми соединителями сопротивление только некоторого числа их заметно превышает требуемую в § 24 цифру 2,5 м. В реальных условиях часто порядка 5...10% от всех встречающихся стыков с приваренными соединителями имеют сопротивление от 2,5 до 10 м и сопротивление не более 2% стыков с неотбитыми соединителями больше 10 м.

Периодическая замена всех стыков, сопротивление которых больше 2,5 м, неоправдана. Без увеличения опасности электрокоррозии затраты по содержанию стыкового хозяйства можно значительно снизить, задавшись средним значением сопротивления стыков на участке определенной длины (например, 1 км) не более 2,5 м. Во избежание местных утечек одновременно должно нормироваться максимальное сопротивление стыка, как не превышающее среднее более чем, положим, в 4 раза (10 м).

14. В § 27 слова «...четыре раз в год...» следует заменить словами «...одного раза в 3 мес...»

15. § 38 следует изъять по соображениям, изложенным при разборе § 5.

К каким иногда несуразным выводам может привести попытка нормировать между двумя любыми точками падение напряжения на единицу длины рельсового пути, видно из следующего.

Норма 3 в/км, очевидно, представляет собой предельную величину углового коэффициента любым образом проведенной хорды эпюры распределения средних потенциалов  $U = f(x)$  вдоль

рельсового пути. Наибольший наклон эта хорда будет иметь, когда она превращается в касательную у точки отсоса ( $x = 0$ ). Угловым коэффициентом указанной касательной на этот раз независимо от степени изоляции рельсового пути от земли будет:

$$\left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = RI,$$

где  $R$  — погонное сопротивление рельсового пути на единицу длины, обычно равное для одноколейного пути  $0,02 \text{ ом/км}$ ;  $I$  — среднее значение тока в рельсах у точки отсоса. Очень часто на магистральных дорогах это среднее значение достигает до  $300 \text{ а}$  и более и в этом случае максимальное удельное падение напряжения составит более  $6 \text{ в/км}$  (!). Значит, чтобы соблюсти норму  $3 \text{ в/км}$ , необходимо, чтобы среднее значение тока  $I$  не превосходило  $150 \text{ а}$ , иначе говоря, приходим к требованию, могущему противоречить условиям эффективного использования наличного оборудования.

В § 38 следовало бы также разъяснить, что речь идет о воображаемом рельсовом пути, изолированном от земли.

16. В разделе «Отсасывающие фидеры» (§§ 40 ... 44) следует включить пункт, аналогичный § 13, требующий установку счетчика ампер-часов (наряду с амперметром) на отсасывающих питательных линиях магистральных дорог. Счетчики значительно облегчили бы контроль работы обратной сети.

17. К § 45,6 относятся также замечания, данные к § 18,б.

18. Соображения, которыми руководствовалась междуведомственная комиссия при введении § 51, представляются в следующем виде. Стальные фермы моста, будучи хорошо заземлены, резко снижают переходное сопротивление утечке тока из рельсов в грунт, если только рельсы непосредственно или косвенно касаются ферм моста. Поэтому вполне естественно стремление устранить это касание. Сопротивление заземления любой опоры, сигнального мостика и т. п. превосходит сопротивления заземления ферм моста. Как конструкции моста, так и опоры используются для крепления контактного провода высокого напряжения, вследствие чего они требуют дополнительного заземления. Наиболее надежным и вместе с тем не приводящим к излишним затратам являются в данном случае рельсы. Таким образом, здесь налицо противоречие между необходимостью не допускать уменьшения переходного сопротивления рельсы — грунт и обязанностью соблюдать условия безопасности для находящихся поблизости людей от случайного поражения током. § 51 пытается избежать противоречия, но неудачно. Наличие искрового промежутка в заземляющей цепи между конструкциями моста и рельсами не устраняет опасности поражения током при случайном прикосновении к фермам моста стоящего на земле человека в момент перекрытия изоляции контактного провода, если сопротивление растекания заземленных частей моста недостаточно мало. Если это

сопротивление достаточно мало, то зачем закладывать дополнительно конструкции моста на переходе хотя бы через искровой промежуток?

«Присоединение к тяговым рельсам всех металлических опор контактной сети, сигнальных мостиков и т. п. ...» (даже несколько) может создать намного лучшую проводимость утечке тока из рельсов в грунт, чем глухое заземление ферм моста на рельсы, что противоречит целям Правил и сводит на-нет дорогостоящую работу по увеличению переходного сопротивления между рельсами и грунтом.

Таким образом, § 51 следует изложить в следующей редакции, предусмотрев:

1) недопустимость металлического касания либо соединения рельсов со всякого рода металлическими сооружениями и конструкциями, исключая соединения с землей;

2) необходимость обеспечения при этом безопасности близ находящихся людей в случае, когда указанные сооружения могут оказываться под напряжением контактной сети.

Эти условия будут соблюдены при наличии: а) для каждого указанного сооружения индивидуальных заземлителей; б) соответствующих образцов инструкций для обслуживающего персонала; в) предупредительных надписей и знаков, вывешиваемых на путевых сооружениях.

19. § 52 следует также изложить иначе. Как и в случае трамвайных рельсов, в нем следует нормировать среднее значение сопротивления стыков ( $3 \text{ м}$ ) на участке определенной длины ( $1 \text{ км}$ ). Одновременно должна нормироваться максимальная величина сопротивления стыка как не превышающая среднюю более чем, скажем, в 4 раза ( $12 \text{ ом}$ ).

20. В § 55 слова: «...двенадцати раз в год надлежит заменить словами: «...одного раз в месяц...»

21. § 65 лишний, так как он, по существу, вторяет § 63.

22. В конце § 90 следует добавить фразу: «Опасность коррозии подземного металлического сооружения может быть установлена также путем непосредственного осмотра».

Кроме того, § 90,а следует иначе изложить в соответствии с данным выше замечанием по поводу § 3,ю. То же следует сказать в отношении § 96, 97 и 100, в которых выражения: «...потенциал по отношению к земле...» следует заменить выражением: «...потенциал по отношению к какой-либо точке земли...». Очевидно, что замечание относится также к той части § 99, где речь идет о среднем значении отрицательного потенциала.

23. Одно из центральных мест раздела «Правил» занимает § 99, устанавливающий довольно своеобразный критерий регулировки электрической защиты данного сооружения при наличии других незащищенных сооружений по соседству с защищаемым.

Влияние одного сооружения на другое независимо от того, электрически защищено оно или нет, определяется рядом факторов, в частности, конфигурацией сооружений и их



путей, их геометрическими и электрическими характеристиками, изменяющимися от точки, удельного сопротивления окружающей среды, распределения и величины нагрузок сети и т. п. Электрическая защита имеет еще один фактор, а именно: собственную электрическую характеристику. Например, чаще электродренажа таким фактором является его сопротивление.

Всех этих факторов зависит и потенциал ценного сооружения. Может оказаться, что защищенное сооружение при его потенциале, только меньшем  $-0,5$  в, не повлияет, в то время как другое защищенное сооружение при потенциале, незначительно большем  $-0,2$  в, окажет вредное влияние на незащищенное соседнее сооружение.

Вредное влияние со стороны электрически ценного сооружения на соседнее незащищенное может быть практически устранено путем изоляции защиты при одновременном контроле потенциала другого сооружения.

§ 99 должен быть поэтому заменен следующим: «Для того чтобы подземное сооружение, защищенное от коррозии с помощью электрических методов, не причиняло вреда соседним незащищенным сооружениям, необходимо так отрегулировать установку, чтобы потенциал соседнего защищенного сооружения относительно прилегающих слоев грунта окружающей среды не превышал значительного повышения в предполагаемой зоне влияния защищенного сооружения защищенное».

Есть, однако, соображение в пользу поддержания минимального по абсолютной величине защитного потенциала защищаемого электрическими методами сооружения. Вопрос о защитном потенциале еще не изучен окончательно, поэтому не менее § 99 можно снабдить следующим добавлением: «В целях лучшей защиты сооружения и от почвенной коррозии следует стремиться к тому, чтобы потенциал относительно прилегающих слоев окружающей среды защищенного электрическими методами сооружения не превышал  $-0,3$  в».

24. Формулировка и трактовка § 100 может ориентировать читателя. Изолирующие муфты применяются только с целью уменьшения в подземном сооружении блуждающих токов, но не для снижения его отрицательного потенциала. Кроме того, изолирующие муфты в сильном поле блуждающих токов могут принести вред.

25. Весьма важно внести в дополнительный раздел Правил следующие пункты [Л. 4].

\*«Одновременно с проектированием подземных металлических сооружений в зоне действия блуждающих токов следует проектировать защиту указанных сооружений от этих токов, предусмотрев: а) при изыскании трассы — производство коррозионной съемки; б) при составлении технического проекта — разработку противокоррозионной защиты, а в отдельных случаях — также и рабочие чертежи защиты».

\*«Проекты подземных металлических сооружений в зоне действия блуждающих токов могут быть рассмотрены и утверждены лишь при наличии в проектах разделов противокоррозионной защиты».

26. Блуждающие токи опасны также в отношении возникновения искры в рельсовых сетях, подземных коммуникациях и установках по приему, сдаче и хранению легковоспламеняющихся продуктов на территориях нефтебаз и в других подобных местах.

С целью устранения искрообразования применяются следующие соответствующие меры, сводящиеся:

а) к установке металлических перемычек между элементами различных сооружений, благодаря чему вся система приводится к единому потенциалу;

б) к установке последовательно расположенных нескольких пар изолирующих стыков на путях, отходящих от магистральных путей к вышеуказанным территориям;

в) к изоляции находящейся на данной территории всей системы коммутации от продолжений, идущих за пределы этой территории, посредством изолирующих муфт;

г) к разработке в каждом отдельном случае специальных инструкций и указаний для обслуживающего персонала.

Перечень всех этих, подчас крайне необходимых мероприятий, невелик и их следовало бы включить в Правила в виде дополнительного раздела.

#### Литература

1. ЦТУ НКС СССР. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами. Связьиздат, 1940; Госэнергоиздат, 1943.
2. М. И. Михайлов и П. А. Азбукин. Воздушные и кабельные линии связи и их защита. Ч. III. стр. 277...280; Связьиздат, 1940.
3. Д. Б. Ломазов. Измерения максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрического транспорта. Электричество, № 9, 1950.
4. АзНИТОЭ и АЗИИ. Резолюция ноябрьского совещания по защите подземных трубопроводов от коррозии, Баку, 1949.





## Правила устройства электротехнических установок<sup>1</sup>

Инж. В. И. ЕВСЕЕВ

Каргандаэнерго

Область применения раздела «Защита от перенапряжений» необходимо расширить, распространив его на установки переменного тока напряжением до 1000 в, а также на установки для сельских местностей. Необходимость диктуется теми соображениями, что случаи поражения воздушных сетей низкого напряжения рабочих поселков, районных центров и даже крупных городов далеко не единичны; вероятность пожаров и поражения людей в результате возникновения атмосферных перенапряжений значительно выше, чем в случае сетей высокого напряжения, надлежащая защита которых обеспечивается требованиями Правил.

Редакцию § 13 и 14 следует изменить. В настоящее время широким распространением пользуются двухцепные линии электропередачи 35 кв. Опоры таких линий имеют значительную высоту, и количество возможных поражений этих линий значительно больше, чем для одноцепных. Применять на металлических опорах деревянные траверзы нецелесообразно, так как замена поврежденной траверзы приводит бы к необходимости обесточения и к перерыву в электроснабжении на все время ремонта. Вместо мало-конструктивных металлических опор с деревянными траверзами целесообразнее ставить вопрос или о железобетонных опорах с деревянными траверзами, или же о деревянных опорах на железобетонных пьедесталах, где изоляция дерева используется полностью.

§ 17...20, касающиеся пересечений, сформулированы недостаточно четко и нуждаются в пересмотре.

В § 17 приводятся лишь наименьшие расстояния между пересекающимися линиями, без каких-либо оговорок о необходимости дополнительной защиты, что ведет к неправильным толкованиям.

Следующие за ним § 18 и 19 определяют меры защиты пересечений линий 20 кв и выше безотносительно к расстоянию между пересекающимися линиями, что может привести к недоразумениям. Меры защиты пересечений линий ниже 20 кв полностью отсутствуют.

§ 20 определяет условия, при которых не требуется специальных мер защиты, причем формулировка: «Не требуется специальных мер защиты на линиях, защищенных тросом», допускает двойное толкование, так как неизвестно: идет ли речь о случае, когда обе пересекающиеся линии защищены тросом или же имеют в виду случаи, когда защищена тросом только пересекающаяся линия.

Приведенную в § 23 ссылку на § 11 в отношении защиты подхода к подстанциям 35 кв следует дополнить указанием на необходимость подключения заземления первой опоры к заземляющему контуру подстанций с помощью троса, проложенного в земле на глубине 0,7...0,8 м.

Нельзя согласиться с высказыванием Е. С. Гройса о том, что защита подхода к подстанциям с помощью стержневых молниеотводов якобы, не применяется на практике и поэтому ее следует изъять из Правил. Переделка подходов линий 3...10 кв на грозоупорный тип с помощью стержневых молниеотводов часто является единственно возможным решением задачи.

Подраздел «Защита вращающихся машин, работающих на воздушные линии» справедливо охарактеризован как неудачный: в § 29 говорится, что присоединение воздушных линий к генераторам мощностью 12 000 квт и выше не допускается, а § 31 допускает подключение воздушных линий к генераторам любой мощности.

В заключение о формулировках.

Несмотря на обилие и многообразие разного рода выражений вроде: должны, должны быть, допускается, мо-

гут устанавливаться, разрешается, могут быть использованы, применяются, не должны, не требуется, не мнудается, не допускается, не устанавливается» и определить степень обязательности того или иногоприятия зачастую очень затруднительно.

Раздел «Объем и нормы приемно-сдаточных испытаний электростанций», являясь документом обязательным для сдающей и принимающей сторон, естественно должен быть составлен с особой тщательностью. Ниже отмечены отдельные недочеты, которые следует исправить при издании Правил.

В § 4 сказано, что в тех случаях, когда директивами указаниями Министерства электростанций предусматриваются дополнительные испытания и повышенные нормы испытаний, по сравнению с приведенными в Правилах энергосистемы обязаны руководствоваться директивами указаниями Министерства.

Непонятно, почему директивными указаниями должны руководствоваться только энергосистемы и почему не должны руководствоваться организации других энергосистем?

В Правилах многие виды испытаний не нормированы и заключение о пригодности оборудования к эксплуатации должно производиться на основании данных всех видов испытаний, измерений. Следует в приложениях к Правилам дать средние опытные данные измерений испытаний для всех видов оборудования, подобно тому как это, например, делается в электротехнических справочниках или в местных инструкциях отдельных энергосистем.

Отсутствие такого ориентира в оценке полученных результатов часто затрудняет решение вопроса о допустимости ввода в эксплуатацию оборудования. Например, в отношении определения влажности изоляции обмоток приводимые в Правилах «нормы испытаний»: «изоляция должна быть сухой», никак не подпадают под понятие норм. Следует или дать действительные нормы испытаний, или же сделать ссылку на существующие инструкции и директивные указания Министерства электростанций по этому вопросу.

Испытание повышенным напряжением изоляции обмотки статора (§ 12) следует распространить на все синхронные компенсаторы вне зависимости от мощности и напряжения. Примечание к подразделу «Испытание синхронных генераторов и компенсаторов» следует изъять, генератор при всех случаях, независимо от его мощности и напряжения, является основным звеном в электросистеме и нет никаких оснований снижать требования в отношении надежности его работы.

В § 33 необходимо указать род тока и продолжительность приложения испытательного напряжения.

§ 36 следует распространить на все синхронные машины независимо от их напряжения.

В подразделе «Измерительные трансформаторы» необходимо ввести нормы проверки класса точности трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, предназначенных для коммерческого учета, с указанием предельных погрешностей по току и по углу.

Для трансформаторов напряжения необходимо ввести испытание повышенным напряжением первичных обмоток, которое в § 91 как будто и предусматривается (в ссылок на испытания по § 100). На самом же деле в § 100 отсутствуют указания о распространении испытаний этого параграфа на трансформаторы напряжения.

При измерении сопротивления изоляции подвижных частей выключателей (§ 71) необходимо нормировать величину испытательного напряжения и условия проведения испытаний, так как от этого зависят результаты испытаний.

§ 102, касающийся испытания повышенным напряжением подвесных изоляторов, предназначенных для у-

<sup>1</sup> Электричество, № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; № 7 и 12, 1951; № 1, 2 и 5, 1952.

на подстанциях, следует распространить на всю ю (линейные изоляторы, штыревые и т. д.).

Раздел «Разрядники» составлен неудачно и дол-ть переработан заново.

сделанная в § 116 ссылка на заводские инструкции не соответствует действительности, так как в приложении выны не заводские инструкции, а справочная таблица пробивного напряжения вентильных разряд-

на таблица составлена с грубыми ошибками. Так, в «Пробивное напряжение в процентах от номина» в действительности приведены: для тиритовых шков—кратности напряжений, а для вилитовых—не напряжения в кв.

нормировать верхнего предела пробивных напря-для разрядников РВП, как это сделано в таблице, так как в этом случае любой разрядник (даже : него вынуть все его содержимое) окажется при-

годным, если ток утечки не будет выходить за пределы нормы. Неверно также и то указание, что испытание вилитовых разрядников может производиться лишь при усло-вии, если время приложения испытательного напряжения (включая подъем) не будет превышать 0,2..0,3 сек.

Это требование относится только к разрядникам с шун-тирующими сопротивлениями типов РВС и РВВМ и ни в какой мере не относится к разрядникам типа РВП.

Испытания трубчатых разрядников следует дополнить испытанием лаковых покрытий.

Приведенные в § 118 нормы испытаний не соответ-ствуют действительности: наружные (внешние) промежут-ки разрядников устанавливаются не по каталожным дан-ным, а по соответствующим параграфам Правил.

Из п. 5 табл. 1 Правил следует изъять указание о до-пустимости определять сопротивление заземления тросо-вых опор с учетом влияния соединенных тросами сосед-них опор, как противоречащее другим разделам Правил.



## К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“

(Электричество, № 1 и 7, 1952)

дат техн. наук, доц. Г. Р. РАХИМОВ  
физический институт Академии наук  
Узбекской ССР

суждении данного вопроса, как это уже правиль-налось, следует различать целесообразность пре-ния в высшей электротехнической опе-раторного исчисления от целесообразности ения его в технических расчетах и за х.

решения любой задачи сравнение методов должно лано, исходя не из возможности замены одного другим, как это делает В. Ю. Ломоносов, а из колько удобным, менее трудоемким, более точным является тот или иной метод. Благодаря, на-очевидным преимуществам метода комплексных (в настоящее время не возникает никаких сомне-лесообразности его применения. Введение метода зых амплитуд в электротехнику безусловно было перед при изучении установившихся явлений.

учением и расчетами переходных явлений, как из-дело обстоит сложнее. Первым шагом в этом и был и остается «классический» метод диффе-ных уравнений. Однако всякие другие более удоб-ды расчета переходных явлений выбираются в за-е от того, какая задача решается и какая при-бывается точность. Нельзя считать, что «классиче-од дифференциальных уравнений является удоб-е всех задач, а операторный метод всегда об-шение любых задач. Даже в пределах самого оло исчисления решение операторного уравнения жет быть проведено различными методами. В за-е от условий задачи и требуемых упрощений и соответствующих таблиц и т. п. выбирается тот метод решения. В одних случаях приходится применять различные теоремы операторного исчис-в других случаях бывает вполне достаточным ог-ря таблицами.

решения операторного исчисления можно распро-в некоторых случаях и на нелинейные системы. инейность системы определяется характеристикой то элемента, выраженной зависимостью:  $i = \psi(u)$ ,

из операторного уравнения  $i = \frac{u}{f(p)}$ , имеем  $u = if(p)$ , представляющее собой некоторое нелиней-ное уравнение [Л. 1].

в некоторых задач очень удобным является специ-апарат, разработанный на основе метода мед-установившихся амплитуд и операторного исчисления и щий вычислять непосредственно медленно изме-

няющиеся огибающие на выходе (метод С. И. Евтянова). Для решения укороченных символических уравнений этого «метода огибающих» применяется аппарат операторного исчисления [Л. 2]. Особо следует отметить широкое внедрение аппарата операторного исчисления для решения многих задач импульсной техники [Л. 3].

Операторное исчисление в инженерной практике при-обретает все более широкое применение и, конечно, о нем нельзя говорить, как о бесперспективном методе. Однако это не значит, что все вопросы переходных процессов должны излагаться на языке операторного исчисления или преобразований Лапласа, как это имеет место в некоторых работах [Л. 4].

Операторный метод не должен противопоставляться «классическому» методу решения дифференциальных уравнений, ибо он является своего рода существенным дополнением и развитием последнего. Операторный метод следует считать логическим продолжением метода комплексных амплитуд (вернее, метод комплексных амплитуд является частным случаем операторного метода для расчета установившихся явлений). Наряду с символическими уравнениями установившихся явлений, операторные уравнения переходных явлений представляют собою важную обобщенную запись основных законов электрических цепей. Операторные уравнения (как для установившихся, так и для переходных явлений) выражают в символической форме положение рассматриваемой физической задачи.

В этом и заключается также методическая цен-ность преподнесения операторных уравнений в учебных материалах. В учебных программах и в учебниках операторный метод должен быть преподнесен, главным образом, с точки зрения развития символического метода. Что касается разгрузки учебных программ, то в этом отношении, вполне соглашаясь с В. Ю. Ломоносовым, следует разгрузку произвести не за счет операторного исчисления в целом, а за счет теорем, преобразований и тому подобных математических вопросов, по которым можно ограничиться ссылкой на курс математики. Соответственно в учебных программах необходимо правильно методически распределить материал по операторному исчислению между курсами математики, теоретической электротехники и специаль-ных дисциплин.

### Литература

1. Н. М. Крылов и Н. Н. Боголюбов. Новые методы нелинейной механики. ОНТИ, 1934.
2. С. И. Евтянов. Переходные процессы в приемно-усилительных схемах. Связьиздат, 1948.
3. Я. С. Ицхоки. Импульсная техника. Изд. Советское радио, 1949.
4. М. Ф. Гарднер и Дж. Л. Бэрнс. Переходные процессы в линейных системах. Гостехиздат, 1949.

### Кандидат техн. наук Д. Н. ШАПИРО ЦЛР МЭП СССР

Почему-то на операторное исчисление принято смотреть только как на формально-математический аппарат для решения линейных дифференциальных уравнений, лишенный, будто, физического смысла. Операторный метод является, по существу своему, совершенно таким же спектральным методом, как методы ряда и двойного интеграла Фурье. Ряд и интеграл Фурье осуществляют замену сложного периодического и непериодического процессов суммами гармонических процессов. Формулы обращения Римана-Меллина представляют собою замену непериодического процесса суммой гармонических процессов с экспоненциально нарастающими амплитудами. Выражения (1)–(6) с полной очевидностью свидетельствуют об общем физическом существе ряда Фурье, двойного интеграла Фурье и формул обращения Римана-Меллина. Формулы обращения Римана-Меллина (5), (6) записаны нами в несколько необычном виде специально с целью еще более подчеркнуть их родство с формулами (3), (4).

Ряд Фурье

$$a(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{jn\omega t}, \quad (1)$$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} a(t) e^{-jn\omega t} d\omega t, \quad (2)$$

$\omega = \text{const.}$

Интеграл Фурье

$$a(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} g(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (3)$$

$$g(j\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (4)$$

Формулы Римана-Меллина

$$a(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} g(j\omega + \alpha) e^{(j\omega + \alpha)t} d\omega, \quad (5)$$

$$g(j\omega + \alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{-(j\omega + \alpha)t} dt, \quad (6)$$

$\alpha > 0.$

Для лучшего уяснения физического существа дела формула (5) может быть представлена в виде

$$a(t) = \int_0^{\infty} g e^{\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) d\omega, \quad (7)$$

где

$$g = \text{Mod } g(j\omega + \alpha),$$

$$\varphi = \text{Arg } g(j\omega + \alpha).$$

Известно, что замена сложного процесса суммой гармонических полезна вследствие того, что гармоническое колебание обладает свойством неизменяемости в линейной схеме. Иными словами, продукт, существующий в линейной схеме под действием гармонического фактора, отличается от этого фактора лишь амплитудой и фазой или, в символической записи, комплексным множителем.

Точно также обстоит дело с гармоническим колебанием, амплитуда которого нарастает по экспоненциальному закону. Ведь совершенно очевидно из свойств линейных уравнений, описывающих линейные схемы, что вынужденное решение в случае правой части, представляющей собою синусоиду с экспоненциально нарастающей амплитудой, является синусоидой такой же частоты, с тем же показателем степени экспоненциального нарастания амплитуды, отличающейся от правой части лишь постоянным множителем и фазой. И совершенно очевидно из физических соображений, что, подобно случаю гармонического действующего фактора с постоянной амплитудой, в случае

гармонического фактора с экспоненциально нарастающей амплитудой свободный продукт равен нулю.

Иными словами, процесс, имеющий место в линейной схеме под действием гармонического фактора с экспоненциально нарастающей амплитудой, может быть охарактеризован, по существу, как стационарный, совершенно логично процессу, обязанному существованием гармонического фактора с постоянной амплитудой. О следует, что так называемые операторные функции  $Z(p)$ , проводимости  $Y(p)$  и коэффициенты передачи представляют собою физически совершенно такие же величины, как  $Z(j\omega)$ ,  $Y(j\omega)$  и  $K(j\omega)$  в случае гармонических процессов.

С. В. Страхов не совсем прав, утверждая, что изменение операторного исчисления дает возможность доказать (разрядка наша) применимость методов расчета установившихся режимов линейных электрических цепей... к расчету переходных процессов. Сущность операторного исчисления подобно методу двойного интеграла Фурье состоит в рассмотрении нестационарного процесса как суммы стационарных процессов. Преимущество его перед интегралом Фурье лишь в том, что строгому представлению в виде спектра экспоненциально нарастающих гармоник поддается гораздо более широкий класс функций, чем строгому представлению спектра гармоник с постоянной амплитудой.

Изложенное дает основание утверждать следующее:

- 1) Операторное исчисление в настоящем его виде самостоятельный раздел курса должно быть исключено из программ электротехнических вузов.

- 2) Ряд Фурье, двойной интеграл Фурье и операторное исчисление должны рассматриваться не как частные случаи единого спектрального метода в электротехнике.

- 3) Следует в обязательном порядке доводить знания студентов существующему спектральному методу, который состоит в том, что сложный по формуле действующий ток, периодический или непериодический, представляется в виде спектра гармоник, дискретного или сплошного, с постоянными или экспоненциально нарастающими амплитудами, и вследствие линейности схемы продукт действия этого фактора рассматривается как сумма продуктов действия каждой из гармоник — составляющих — его спектра. Продукт действия гармонического фактора с экспоненциально нарастающей амплитудой легко обрабатывается по правилам расчета стационарных процессов. Сообразно при этом ввести термины «спектр Лапласа» — «плотность спектра Лапласа» по аналогии с термином «спектр Фурье» и «плотность спектра Фурье».

- 4) Ознакомление с основами спектрального исчисления тогда расширит кругозор будущего специалиста, когда касается отдельных правил и приемов, облегчающих мирование составляющих спектра продукта, к которому относятся, сводится весь аппарат операторного исчисления с большей частью этих правил будущий специалист, в случае необходимости с успехом ознакомится самостоятельно.

Кандидат физ.-матем. наук, доц.  
М. Ф. ШИРОХОВ

Ленинградский государственный университет  
им. Жданова

Говоря о появлении операторного исчисления в Ломоносов неправильно освещает историю вопроса. Операторное исчисление существовало значительно раньше Хевисайда, например, в работах Ващенко-Захарченко и Летникова, но оно не было достаточно хорошо известно электротехникам. Роль Хевисайда в создании операторного исчисления подобна роли Эдисона в создании электрической лампы накаливания: и тому и другому заслуженно приписывали открытие, тогда как оба были, в основном, предпринимателями.

Вопреки мнению В. Ю. Ломоносова, основные положения операторного или операционного исчисления должны быть выработаны целесообразными приемами решения дифференциальных уравнений, а вовсе не «применением или осуждением» Хевисайда.

Операционное исчисление появилось на свет и развивается, так как оно решает многие задачи лучше,

такот другие методы, т. е. существование операционного исчисления вполне закономерно.

верждение В. Ю. Ломоносова о том, что можно, обойтись без операционного исчисления, так же исленно, как если бы мы утверждали, что, следовательно, что числа можно делить и множить так, как учат в начальных классах средней школы, то можно и без логарифмов, или, если верно, что земляные при постройке электростанций принципially можно производить с помощью лопат и тачек, то можжать, обойтись без экскаваторов. Конечно, считать длах первого десятка удобнее без логарифмов, а кивать комнатные цветы удобнее руками. Но подобу, как громоздкие вычисления делают с помощью рмов и на земляных работах большого масштаба луют экскаваторы, многие задачи электротехники, ки, автоматики и т. п. решают именно с помощью онного исчисления, потому что оно сбергает труд рует получение результата.

но из преимуществ операционного исчисления как заключается в том, что начальные условия учитыва автоматически и сразу строится искомое частное е, минуя нахождение общего и, что самое главное, умнительное выделение нужного частного решения ето. В этом одна из причин, почему часто предпоо операционный метод прочим методам.

статье В. Ю. Ломоносова в действительности нет кого сравнения операторного и классического в решения обыкновенных дифференциальных уравс постоянными коэффициентами, а имеется только ша в постановке задачи. Если бы В. Ю. Ломоносов какую-нибудь конкретную задачу, например, даже престую, как включение напряжения в цепь из соения, емкости и самоиндукции, и решил бы ее способами или посмотрел бы ее решения в любом ке по электротехнике да сравнил бы решения, изме- например, длину всех формул в сантиметрах, то он ся бы, что операторный метод дает обычно более ее решение задачи.

ехода к дифференциальным уравнениям в частпроизводных, В. Ю. Ломоносов напоминает о методе ния переменных, методе хорошем, которым часто отся и который никто не отменяет. В качестве при- В. Ю. Ломоносов берет уравнение теплопроводности, е которого он строит почему-то как конечную сумтких решений, а не ряд. В. Ю. Ломоносов не ре- этого уравнения, так как для этого потребовались малые выкладки. Методами же операционного исчисрета задача решается почти мгновенно. Преимущество онного метода явное, но В. Ю. Ломоносов все-таки мен: зачем, дескать, пользовались справочником по онному исчислению, — надо, мол, учесть труд соия справочника! Этак, если будет поставлен во- что легче — идти пешком или ехать поездом, то а сказать, что идти пешком всегда легче, ибо по В. Ю. Ломоносову на каждую поездку отдельного человека е следует, якобы, учитывать целиком весь труд по оного поезда, да еще и по прокладке железнодорожного

возможность составлять таблицы, проводить унификашней задач, использовать уже имеющиеся решен рассмотрении новых задач, это несомненное доо операционного метода.

о телеграфное уравнение В. Ю. Ломоносов только ает и, уже совершенно голословно, заявляет, что там айти доводов в пользу операционного метода, не- на то, что ряд важных задач, сходящихся к телеу уравнению, решен именно операционным ме-

совести В. Ю. Ломоносова остается еще один во- торый он в своей статье не затрагивает. А как, инению, после отмены операторного исчисления во можно будет в литературе по электротехнике и мерных расчетах пользоваться операторным мето- Если разрешить, то для кого это будет написано, икто не будет обучен этому методу, а если запре- и, во-первых, как В. Ю. Ломоносов рекомендует этс и, во-вторых, как быть с теми задачами, которые о решаются именно операторным методом?!

стутления К. А. Круга и С. В. Страхова убедитель- зывают необходимость для электротехников владеть

операционным исчислением и опровергают основное поло- жение В. Ю. Ломоносова будто операторное исчисление — это балласт. С. В. Страхов приводит для опровержения аргументов В. Ю. Ломоносова хорошие и яркие примеры пользы операторного метода; только напрасно он говорит, что в своей статье В. Ю. Ломоносов решил задачу о проникновении магнитного поля в стальной лист, В. Ю. Ломоносов не решил этой задачи, а только заверил в возмож- ности решения этой задачи классическим методом и вы- сказал при этом лишь некоторые указания по решению этой задачи.

Соображения К. М. Поливанова сами по себе вер- ные, но они не имеют прямого отношения к утверждениям В. Ю. Ломоносова.

Всякая фетишизация вредна. Источник фетишизации — это плохое, недостаточное знание. Выходов только два: либо совсем ничего не знать об операционном исчисле- нии, либо знать его хорошо. Для мало-мальски образован- ного инженера первое на сегодня недопустимо, остается второе — изучать операционное исчисление как следует, хршо!

Надо улучшить постановку преподавания операцион- ного исчисления в технических вузах.

Конечно, операционное исчисление нельзя строить, ба- зируясь па одной формальной символике, вроде того, как это было у Хевисайда, это может привести к всевозмож- ным недоразумениям. Построение операционного исчисле- ния надо вести на солидной основе теории функций ком- плексного переменного и контурного интегрирования. Ме- тоды теории функций комплексного переменного (опера- ционный метод, конформные отображения, специальные функции и др.) весьма широко применяются в физике и в технике. Образованный инженер-электрик должен свободно владеть этими мето- дами.

Вредное предложение В. Ю. Ломоносова: «выбросить операторное исчисление как балласт с корабля электро- техники» равносильно предложению выбросить с корабля двигатель, поскольку он очень тяжел, а передвигаться на парусах или пользуясь веслами.

В технических вузах необходимо ввести основательное изучение теории функций комплексного переменного, вклю- чив туда и операционное исчисление. В качестве пособия можно рекомендовать книгу М. А. Лаврентьева и Б. В. Шабат «Методы теории функций комплексного перемен- ного» (1951), в которой изложение теории удачно иллю- стрруется многими интересными и важными примерами, в том числе и из электротехники.

*Доктор техн. наук, проф.*

**В. Ю. ЛОМОНОСОВ**

*Москва*

Я поставил чисто методический вопрос о месте опера- торного исчисления в системе электротехнического образо- вания. В ходе дискуссии оказались затронутыми не только вопросы методики, но также научные и исторические. Мне были приписаны и такие утверждения, которых я никогда не делал. Результаты обсуждения оказались весьма инте- ресными и поучительными.

Победа осталась за сторонниками операторного мето- да, и «классики» потерпели поражение. Однако в лагере победителей не видно единодушия, и нет возможности со- единить их взгляды в непротиворечивую систему. Если С. В. Страхов требует для преподавания операторного мето- да и углубления, и расширения, то Г. С. Аронзон на- стойчиво предостерегает от операторных излишеств. Если Г. Р. Рахимов подчеркивает, что операторный метод об- легчает решение любых задач, то М. Ю. Шухатович по- лагает, что преимущество операторного метода ощутимо лишь в сложных задачах. Список несогласованных вопро- сов нетрудно увеличить.

Полное согласие существует лишь в одном пункте, а именно в том, что без классического метода в препода- вании не обойтись. Так, Г. Р. Рахимов считает, что опера- торный метод является дополнением к классическому. Чрезвычайно важными являются соображения Г. А. Си- ссына: отказ от классических методов изложения переход- ных процессов означал бы катастрофическое снижение усвояемости.

Теперь полезно вспомнить об арифметике. Допустим, что инженеру в его практической деятельности придется решить  $n$  задач, относящихся к переходным процессам. Простоты ради, будем считать все задачи одинаковыми по трудности и обозначим через  $x$  то «чистое» время, которое требуется для решения одной из них и которое можно определить хронометражем. Полагаю, что «истинное» время,

затраченное на задачу, следует считать равным  $x + \frac{1}{n}X$ , где  $X$ —время обучения решению<sup>1</sup>. По мнению большинства

<sup>1</sup> Одно из выдвинутых против меня обвинений состоит в том, что «по Ломоносову на каждую поездку отдельного человека в поезде следует, якобы, учитывать и весь труд по созданию поезда, да еще по прокладке железнодорожного пути». И здесь я стою на чисто классических позициях: прежде чем сесть в поезд, надо купить билет.

участников дискуссии  $X = X_{\text{класс}} + X_{\text{опер}}$  и  $x_{\text{класс}}$ . Спрашивается, какой из знаков неравенства надо по-

$$x_{\text{класс}} + \frac{1}{n} X_{\text{класс}} \text{ и } x_{\text{опер}} + \frac{1}{n} (X_{\text{класс}} + X_{\text{опер}})$$

Особняком стоит выступление Д. Н. Шапиро. Справ в ряде частных, но основная его мысль — если уже выходить на операторную арену, то правильно делать это при помощи интеграла, а не преобразования Лапласа. По существу между ними различия, но в интеграле Фурье используются другие понятия, которые уже знакомы студенту.

Дискуссию по моему выступлению открыл К. А. Перечитывая его заметку, такую короткую и такую жательную, еще раз чувствуешь, как велика и негата понесенная нами утрата.

## Заметки и письма

### К статье Г. Г. Марквардта и П. Н. Шляхто „О наивыгоднейшей характеристике тягового двигателя“ (Электричество, № 2, 1952)

В статье Г. Г. Марквардта и П. Н. Шляхто поднят имеющий важное теоретическое и практическое значение вопрос о наивыгоднейшей характеристике тягового электродвигателя. К сожалению, нельзя полностью согласиться с выводами и рекомендациями авторов. Эти рекомендации, как будет показано ниже, практически не могут быть реализованы.

Правильно указывая в начале своей статьи, что выбор характеристики тягового двигателя «... не может рассматриваться изолированно от широкого круга других вопросов», авторы в дальнейшем решают вопрос о наивыгоднейшей характеристике электродвигателей без связи с основными особенностями их расчета и конструкции.

Действительно, авторами рассматривается как оптимальная такая характеристика двигателя, при которой произведение силы тяги на скорость является постоянной величиной. Это положение является правильным для тепловозов, мощность которых ограничена мощностью первичного двигателя. Для подавляющего большинства электрических локомотивов, работающих при постоянной величине приложенного к двигателю напряжения (при данной группировке двигателей), постоянство произведения  $Fv$  на всем диапазоне скоростей означает также и постоянство мощности и тока. Очевидно, что подобная характеристика может быть достигнута лишь при пропорциональном и непрерывном изменении возбуждения двигателя.

Однако подобное изменение магнитного потока машины практически недостижимо как с точки зрения схемы управления, так и с точки зрения конструкции двигателя. В современных электрических экипажах отношение максимальной скорости к номинальной (часовой) равно примерно 2,2 ... 2,5, а отношение максимальной силы тяги к номинальной равно примерно 2 ... 2,2. Таким образом, для достижения постоянства произведения  $Fv$  необходимо регулирование величины магнитного поля двигателя в отношении примерно 1 ... 5, что практически невыполнимо при высоковольтных тяговых двигателях по соображениям коммутации, весовым и габаритным ограничениям. Кроме того, подобный двигатель на различных по профилю путях был бы нерационально использован в тепловом отношении (изменение тока обмотки возбуждения примерно в 10 раз). Подобная характеристика тягового усилия не может быть практически достигнута и при применении коллекторных двигателей переменного тока.

Таким образом, рекомендуемая авторами в качестве оптимальной гиперболическая зависимость тягового усилия от скорости является абстрактной и недостижимой для

практических целей. Как будет показано ниже, эта зависимость вообще не всегда является оптимальной.

Действительно, рассмотрим вопрос о наиболее целесообразной зависимости тяги от скорости для областей, лежащих выше и ниже точки номинального (часового) режима. У современных электрических локомотивов, оснащенных двигателями (даже с учетом ослабления поля) повышению скорости величина тягового усилия падает быстрее, чем растет скорость, и поэтому произведение мощности уменьшаются. Это обстоятельство является существенным недостатком электровозов, уступающих в области высоких скоростей паровозам, тепловозам и другим локомотивам с постоянной мощностью. Так, при скорости 75 км/час мощность электровоза ВЛ-22 составляет лишь 35% часовой мощности.

Использование мощности электровозов при высоких скоростях связано с величиной насыщений и диапазоном регулирования скорости ослаблением поля. Так как ослабление поля в отношении 1 ... 2,5 практически невозможно при обычной конструкции электродвигателей без компенсационных обмоток, то в области высоких скоростей не удается обеспечить и полного использования мощности тяговых двигателей.

Следует, однако, считать, что для вновь проектируемых локомотивов за счет применения менее насыщенных двигателей с более глубоким ослаблением поля при малой скорости должна реализоваться мощность не менее 50% от мощности часовой режима.

Если в области высоких скоростей желательно приблизиться к кривой постоянной мощности, то в области скоростей, лежащих ниже часовой скорости, рекомендации авторов о постоянстве произведения  $Fv$  являются не всегда правильными, так как они лишают электровозы одного из его преимуществ — возможности перегрузки по мощности. В диапазоне больших тяговых усилий приравнять электровоз к характеристике тепловоза или паровоза. Кроме того, усиление поля двигателя в 2 ... 2,2 раза ограничено габаритными условиями и весом двигателя. В современных электродвигателях по габаритным и весовым ограничениям снижение магнитной индукции в зубцах на 19 000 ... 20 000 гс нецелесообразно.

Практически при перегрузках без тепловых ограничений на современных электрических локомотивах может быть кратковременно реализована мощность до 1,6 ... от мощности часовой режима. Возможность этой перегрузки позволяет повысить скорости прохождения отдельных перегонов, особенно на участках с горным профилем.

этом величина магнитного потока машины повышается примерно на 20%, а тяговое усилие достигает двойной номинальной величины.

Для некоторого уменьшения потерь при пуске и снижении пусковых токов целесообразно несколько уменьшить мощность двигателя, доведя ток при двойном усилии тяги до номинальной. Эта цифра, очевидно, является оценкой с учетом всех обстоятельств (габаритов двигателя, тяговых характеристик и пр.).

Таким образом, для современных электровозов постоянства наиболее выгодной является кривая, при которой реализуемая мощность составляет около 0,5 от номинальной при  $v = 2,5 v_{ном}$ ; 1,5 номинальной при  $v = 0,75 v_{ном}$ .

При этом важнейшим вопросом является повышение использования мощности при высоких скоростях (повышение на 40% в сравнении с практическим использованием в современных локомотивах).

Таким образом, сама постановка вопроса авторами статьи является отвлеченной, так как ими рекомендуется в качестве наиболее выгодной такая характеристика тягового электродвигателя, которая практически не может быть реализована при рациональных параметрах машины и единицы подвижного состава в целом.

Инж. А. А. РАВИНОВИЧ

## Статье Н. Н. Крачковского „Оценка пропускной способности линий электропередачи на базе натуральной мощности“

(Электричество, № 4, 1952)

Автор названной статьи неправильно оперирует данными нашей статьи «Характеристики электропередачи переменного тока на большие расстояния» (Электричество, № 7, 1951). Сопоставляя предельную передаваемую мощность в данной статье А. А. Горева «Пропускная способность линий электропередачи трехфазного тока большой протяженности» (Электричество, № 12, 1951) и нашей статьи, он приводит характеристики, из которых следует, что величина возможной передаваемой мощности нами, якобы, занижена по сравнению с величиной, приведенной в статье А. Горева.

В действительности это не так. Кривая 4 и табл. 6 мысли, развитой в нашей статье, показывают мощность, которую можно передать без специальных мер улуч-

шения устойчивости; они практически характеризуют эти меры и необходимую степень компенсации.

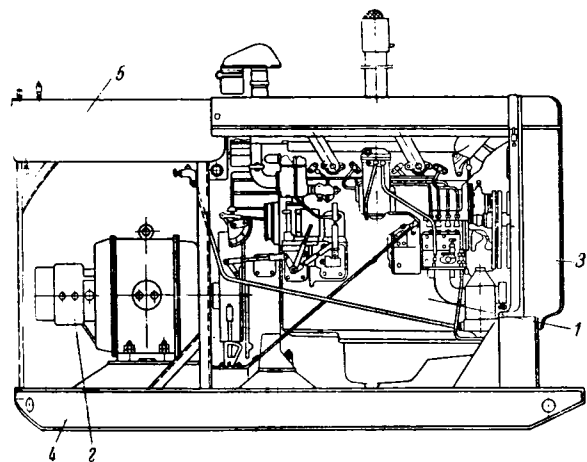
В нашей статье делается вывод об экономической целесообразности и технической возможности передачи мощностей порядка натуральных на расстояние 800...1 200 км. По данным этой статьи при передаче мощности 1 200 мвт по двум цепям линии электропередачи 400 кв, провода которой расщеплены на три провода ( $P_{нат} = 570$  мвт), необходимая степень компенсации составит 45%. Таким образом, возможности электропередачи при напряжении 400 кв по связанной схеме не ограничены приводимыми в статье Н. Н. Крачковского цифрами.

Канд. техн. наук В. А. ВЕНИКОВ, Н. Н. СОКОЛОВ

## 10 страницам технических журналов

### ПЕРЕДВИЖНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ МОЩНОСТЬЮ 28 квт

Передвижная электрическая станция предназначена для обеспечения временного энергоснабжения нефтепроводов, а также в качестве постоянного источника электрической энергии разведочных буровых, строительных площадок карьеров и прочих предприятий Министерства нефтяной промышленности СССР. Станция должна найти широкое использование во многих других областях народного хозяйства.



Общий вид передвижной электростанции.

1—генератор с возбуждателем; 2—радиатор водяной и масляный; 3—радиатор водяной и масляный; 4—металлическая рама; 5—топливный бак.

В качестве первичного двигателя агрегата станции (рисунк) использован четырехтактный, вертикальный, четырехцилиндровый, бескомпрессорный двигатель типа Д-54 или 4Ч<sup>12,5</sup>/<sub>15,2</sub> мощностью 54 л. с. при 1 300 об/мин. Расход

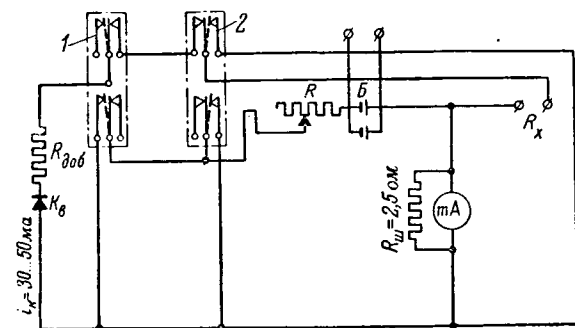
топлива 220 г/л. с. час. Двигатель непосредственно связан с электрическим генератором трехфазного переменного тока типа СГ-35/6 мощностью 28 квт при напряжении 400/230 в с частотой 50 гц. Генератор—защищенный от прямого попадания посторонних предметов. Схема соединения генератора—звезда с выведенным нулем. Возбудитель генератора имеет мощность 0,73 квт при напряжении 32 в.

Контрольно-измерительные приборы и аппаратура, входящие в комплект распределительного устройства, размещены в металлическом шкафу с передней и задней дверцами. Для поддержания постоянства напряжения станции, что имеет большое значение для эксплуатации, применяется специальный автоматический регулятор напряжения конструкции Московского электромеханического завода.

(Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности, № 2, 1952. Г. С. Лопоян)

### ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ И ЗАНУЛЯЮЩЕЙ ПРОВОДК

Ленинградский институт охраны труда установил, что наиболее слабым узлом при эксплуатации заземляющих и зануляющих устройств в промышленных предприятиях является заземляющая проводка. Например, в обследованных институтом установках 15...20% участков имели заземляющую проводку, в которой сопротивление превы-



1—переключатель контроля; 2—переключатель измерений; Б—батарея 4,5 в;  $I_k$ —30...50 мА;  $K_B$ —запирательный вентиль;  $R_{доб} = 1500 \dots 2000 \text{ Ом}$ ;  $R = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_{ш} = 2,5 \text{ Ом}$ ;  $R_x$ —зажимы проводов к проверяемому объекту.

шало допустимую величину, что было причиной ряда несчастных случаев. Самым распространенным и опасным дефектом является отсутствие контакта в заземляющей линии. Для проводов, выполненных с болтовым соединением, характерно увеличение сопротивления контактов.

В настоящее время для эксплуатационных целей отсутствуют простейшие приборы, при помощи которых можно было бы произвести необходимые измерения. Промышленность выпускает слишком сложные приборы для такого рода измерений.

В лаборатории электробезопасности Ленинградского института охраны труда ВЦСПС разработан авторами статьи простой, легкий, малогабаритный и удобный для практической работы прибор, основанный на принципе омметра с параллельной схемой (рисунок) с использованием в качестве указателя амперметра магнитоэлектрической системы типа М-45, имеющего внутреннее сопротивление 10 Ом. Нужный характер шкалы получен установкой шунта  $R_{ш} = 2,5 \text{ Ом}$ . Для устранения погрешностей прибора, вызываемых непостоянством напряжения батарей, в схему включено регулируемое сопротивление  $R = 100 \text{ Ом}$ , выполненное в виде кругового реостата.

Весь прибор смонтирован в корпусе размером  $130 \times 140 \times 135 \text{ мм}$ . Питающие батарейки с напряжением 4...5 в находятся в специальном отделении с удобным контактным устройством.

Для соединения одного из зажимов  $R_x$  с заземленным объектом, у которого проверяется проводка, применяется шуп, имеющий ручку из изолирующего материала и калиброванный провод. Второй зажим  $R_x$  присоединяется специальной струбцинкой к общей заземляющей шине.

Приборы данной конструкции, изготовленные экспериментальными мастерскими Ленинградского института охраны труда ВЦСПС, дали в условиях эксплуатации хорошие результаты.

(Промышленная энергетика, № 1, 1952. В. Е. Манойлов и Г. Ю. Гордон).

## ЗА РУБЕЖОМ

### УСТРОЙСТВА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОПЫТНОГО УЧАСТКА ОДНОФАЗНОГО ТОКА 50 Гц НА ФРАНЦУЗСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

(Обзор)

На однофазном токе 50 Гц, 20 кВ на французских железных дорогах электрифицирован, как опытный, однопутный участок Э ле Бэн—Ля Рош длиной 78 км.

Тяговая подстанция расположена на станции Аннеси примерно в середине участка. Питание подстанции осуществляется трехфазной линией электропередачи 42 кВ от единой высоковольтной сети Франции. Данная схема питания рассматривается французскими железными дорогами как временная, поскольку через несколько лет пропускная способность линии 42 кВ будет исчерпана. В данном ее состоянии схема позволяет сделать наблюдения за работой трехфазной сети небольшой мощности при однофазной нагрузке.

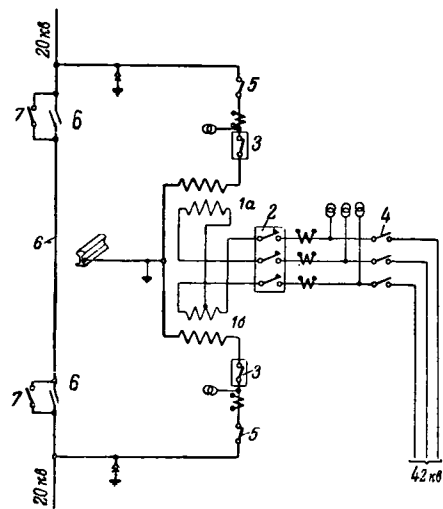


Рис. 1. Схема тяговой подстанции Аннеси. 1а, 1б—трансформаторы; 2—выключатель трехфазный 42 кВ с малым объемом масла; 3—выключатель 20 кВ; 4—разъединитель трехполюсный; 5—разъединитель 20 кВ поворотного типа; 6—нейтральная вставка в цепной подвеске; 7—разъединители нейтральной вставки.

Тяговая подстанция [Л. 1]. Тяговая подстанция гирвана как временная. Оборудование для нее было брано на различных участках электрифицированных и поэтому ее конструктивная часть не представляла большого интереса.

На подстанции установлена группа из двух трансформаторов, включенных по трехфазно-двухфазной схеме (рис. 1).

Длительная мощность каждого трансформатора 6 000 кВА; перегрузка до 9 000 кВА допускается в течение 15 мин. Сопротивление трансформатора  $R = 0,3 \text{ Ом}$ ;  $X = 6,7 \text{ Ом}$ . Имеется регулятор напряжения для выравнивания сетевых колебаний в пределах  $\pm 2,5$  и  $\pm 5\%$ . Защита трансформаторов осуществляется газовым реле. Выключатели 20 кВ переоборудованы из трехфазных однополюсными масляными выключателями. Разрывная мощность 125 МВА.

Сечение питающей тяговой линии 150 мм<sup>2</sup>. Собственные нужды подстанции питаются от местного электросети. Кроме того, установлена аккумуляторная батарея 30 А/час, 24 в с непрерывным подзарядом от полупроводниковый выпрямитель.

На вводе 42 кВ установлена простая максимальная защита с зависимой выдержкой времени. На каждой питающей линии 20 кВ—реле минимального полного сопротивления. После установки на контактной сети коммутаторов эта защита была дополнена также максимальной защитой.

Аппаратура защиты, счетчики, максиграф и пр. помещено в здании площадью  $2 \times 3 \text{ м}^2$ , там же помещена аккумуляторная батарея и выпрямитель.

Подстанция управляется с пульта, установленного в ближайшем стрелочном посту станции Аннеси. Пульт оборудован кнопками включения и выключения для каждого выключателя с сигнальными лампами. На пульте установлены также вольтметры ввода 42 кВ и питающих линий 20 кВ. Лампы вместе со звонком сигнализируют о срабатывании газового реле.

Включение и выключение выключателей производится стрелочником по приказу диспетчера движения. Разъединители 42 и 20 кВ нормально включены. Подстанция обслуживается. При авариях диспетчер извещает о состоянии подстанций, которая обеспечивает ликвидацию повреждений.

Разъединители, соединяющие нейтральную часть с секциями контактной сети, заблокированы с разъединителями питающих линий, чтобы исключить возможность дачи напряжения на вставку при одновременном включении питающих линий.

В будущем намечено построить тяговые подстанции в Рюйми с трансформаторами, включенными по трехфазно-двухфазной схеме и в Ля Рош с установкой



разных трансформаторов (один резервный) на район-подстанции 42 кв.

Контактная сеть [Л. 2, 3, 4, 5, 6, 8 и 9]. Цепная под-а состоит из бронзового несущего троса сечением  $107 \text{ мм}^2$  (60% проводимости) и медного контактного про-сечением  $107 \text{ мм}^2$ . Общее сечение подвески около  $107 \text{ мм}^2$  по меди. Бронзовый трос был выбран вследствие лучшего сохранения на участке паровой тяги.

Сечение сети выбрано по длительной плотности тока, а для меди была принята равной  $4 \text{ а/мм}^2$ . При рас-плотности тока учитывался износ контактного про-Сечение было проверено также на падение напря-.

Расчетное сопротивление сети равняется:  $R = 0,55 \text{ ом/км}$ ,  $X = 0,475 \text{ ом/км}$ ,  $Z = 0,50$ ,  $\angle 72^\circ \text{ ом/км}$  [Л. 2].

Для изучения работы одиночных цепных подвесок, ко-е на французских железных дорогах не применялись, на участке однофазного тока смонтированы полукомпен-санная, компенсированная и косая подвески на кри-и прямых участках.

Наибольший интерес представляет последняя система. и подвеска выполнена некомпенсированной и без фик-и. На прямых участках наклон подвески получается от большого зигзага несущего троса. Натяжение не-го троса при  $+15^\circ \text{ С}$  равно  $1000 \text{ кг}$ . Натяжение кон-го провода при этой же температуре равно  $1000 \text{ кг}$  астках с кривыми с радиусами более  $500 \text{ м}$  и  $700 \text{ кг}$  астках с кривыми меньших радиусов. Струновой про- $5 \text{ м}$ . Опорные струны не устанавливаются. Струно-ажим обеспечивает изменение наклона струны на

Длина пролета ограничена величинами поперечных ный контактного провода при изменениях tempera-и под воздействием давления ветра, а для прямой злена в  $63 \text{ м}$ . В опытных целях на протяжении применены пролеты в  $72 \text{ м}$ .

ри вертикальных подвесках применяются фиксаторы. альная длина пролета на прямых  $72 \text{ м}$ . Имеется опыт-асток с пролетами  $81 \text{ м}$ . Длина струнового проле-м. Пролеты на кривых кратны  $9 \text{ м}$  (при малых ра- $4,5 \text{ м}$ ). Это облегчает изготовление струн в ма-ой.

ри длине прямой части лыжи  $856 \text{ мм}$  и расстоянии и концами рогов пантографа  $1450 \text{ мм}$  максимальное тный вынос контактного провода равен  $400 \text{ мм}$  .9).

ля крепления несущего троса, как правило, приме-рианды из двух подвесных изоляторов. Сухоразряд-напряжение гирлянды  $135 \text{ кв}$ , мокроразрядное —  $85 \text{ кв}$ . ивых с радиусами менее  $600 \text{ м}$  применяется 2 стерж-изолятора, подвешенных по схеме открытого тре-ника. Для анкеровки и фиксаторов применены также евые изоляторы. Для фиксаторов применяется, кроме специальная изолирующая конструкция.

опражения анкерных участков при секционировании ны по четырехпролетной схеме. Расстояние между нми ветвями подвесок  $500 \text{ мм}$  [Л. 4].

аименшее расстояние от контактного провода до га-а подвижного состава  $370 \text{ мм}$ . Давление пантографа  $5 \text{ кг}$ .

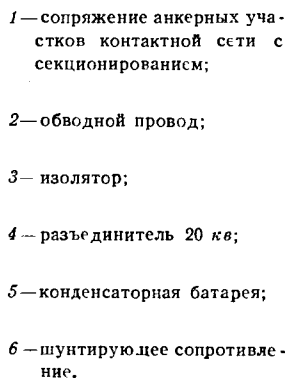
Опоры контактной сети в основном сделаны из дву-вой стали нормального и узкого профиля. Опоры мные и установлены в бетонные цилиндрические фун-пы. Котлованы под фундаменты разрабатывались мес-ским буром, установленным на железнодорожной юрме.

Для большей надежности, а также для возможности водства работ на контактной сети станций на каж-станции смонтирован обводной медный провод сече- $147 \text{ мм}^2$ .

Для уменьшения падения напряжения в контактной достигающего  $8800 \text{ в}$  в конце участка питания при тее тяжелом расчетном случае трогания поездов се Бэн (ток  $160 \text{ а}$ ) и в  $10,5 \text{ км}$  севернее (ток  $240 \text{ а}$ ), трех станциях участка Э ле Бэн — Аннеси установ-конденсаторные батареи, включенные в рассечку об-кон проводов станций (рис. 2). На каждой станции овлено 4 или 2 батареи по  $160 \text{ квар}$ .

Батареи образованы из стандартных конденсаторов внутренней установки на  $380 \text{ в}$  и для их размеще-созоружены здания площадью  $2,5 \times 2,5$  и  $2,5 \times 1,8 \text{ м}$  вестствии с мощностью.

Рис. 2. Схема включения конденсаторных устано-вок в обводной провод.



Конденсаторы бумажные, пропитанные пироженом, двух типов: 1) стандартные цилиндрические элементы  $1,1 \text{ квар}$ ,  $380 \text{ в}$ ,  $24 \text{ мкф}$ , смонтированные на каркасе по 36 элемен-тов, 2) элементы прямоугольного сечения  $10 \text{ квар}$ ,  $380 \text{ в}$ ,  $225 \text{ мкф}$ , смонтированные по 16 элементов. Батареи собра-ны так, чтобы давать напряжение в  $380$  или  $760 \text{ в}$ .

Батареи шунтированы (рис. 2) омическим сопротивле-нием  $13,3 \text{ ом}$  (при  $380 \text{ в}$ ) или  $26,6 \text{ ом}$  (при  $760 \text{ в}$ ), имею-щим назначение: 1) устранить возможность резонанса при частоте ниже нормальной, 2) предупредить или, по край-ей мере, ограничить явления самовозбуждения, 3) обеспечить разрядку конденсаторов при их отключении, 4) обеспечить металлическую проводимость линии и отвод стати-ческих зарядов. Установка на  $380 \text{ в}$  имеет емкостное сопротивление  $0,9 \text{ ом}$ , на  $760 \text{ в}$  —  $1,8 \text{ ом}$ . При включенных конденсаторных установках емкостное сопротивление уча-стка Аннеси — Э ле Бэн равняется  $10,83 \text{ ом}$  (при емко-сти  $290 \text{ мкф}$ ), индуктивное сопротивление линии с учетом индуктивности трансформатора —  $24,22 \text{ ом}$ ; таким обра-зом, установка конденсаторов дает компенсацию индуктив-ного сопротивления на  $45\%$ .

Каждый элемент батареи защищен плавкой вставкой, помещенной внутри коробки элемента. Схема защиты ба-тареи от перенапряжений и перегрузок дана на рис. 3. Когда напряжение на вводах батареи превышает  $580$  или  $1160 \text{ в}$  (для номинальных напряжений  $380$  и  $760 \text{ в}$  соот-ветственно), один из разрядников 4 срабатывает ток, проходящий при этом по индуктивности 5, наводит повыше-нное напряжение в индуктивности 6, вследствие чего сра-батывает разрядник 8. Если дуга горит долго, то срабаты-вает термореле 7, шунтирующее всю установку. Время срабатывания защиты порядка  $0,01 \text{ сек}$ . Когда ток в линии превосходит  $400 \text{ а}$ , срабатывает контактор 1 и

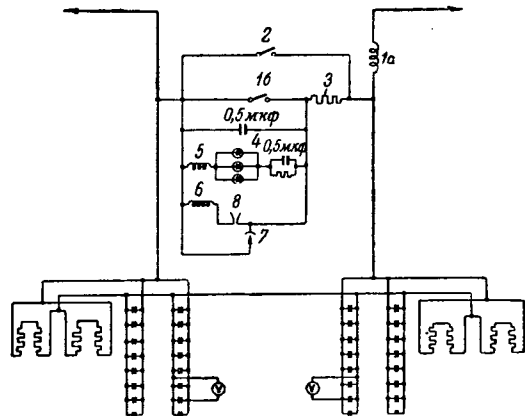


Рис. 3. Схема включения и защиты конденсаторов.

1а и 1б — обмотка и контакты контактора для защиты от перегрузки; 2 — шина для шунтирования конденсаторов; 3 — сопротивление  $0,2 \text{ ом}$ ; 4 — газовый разрядник; 5 — индуктивность в цепи газового разрядника; 6 — индуктивность в цепи рогового разрядника; 7 — термореле; 8 — роговой разрядник.



шунтирует конденсаторы. Время срабатывания контактора 0,03...0,04 сек.

Как видно из схемы рис. 2, конденсатор шунтируется пантографом при проходе последнего по воздушному промежутку. Однако о каких-либо повреждениях при этом лыжи пантографа или воздушного промежутка не упоминается.

Конденсаторы включены в работу в мае—июне 1951 г. До октября месяца никаких повреждений установок не было.

Конденсаторы повышают напряжение на 1 600...1 700 в при нагрузке 150 а в Э ле Бэн.

Для лучшего отключения токов короткого замыкания опоры контактной сети присоединены к рельсу медным проводом диаметром 7 мм.

В результате опытов на других участках французских железных дорог, а также на участке Э ле Бэн—Ля Рош, и на основании расчетов было решено не ставить электрических соединителей на стыках рельсов на перегонах. Стационарные пути оборудованы приварными соединителями сечением 50 мм<sup>2</sup>. На каждом конце станции пути заземлены.

Измерения показали, что потенциалы рельсов по отношению к грунту при нормальных токах контактной сети низки [Л. 3]. На величину потенциала рельса по отношению к грунту значительно влияет непрерывность рельсового пути. Так, например, при изоляции с обеих сторон рельсовых путей участка длиной около 11 км и при питании его током 80 а измеренный потенциал составил 33 в в точке подачи питания и 26 в в точке приложения нагрузки. При отсутствии изоляции потенциалы равнялись соответственно 18 и 7 в. Заземление в первом случае точки питания при сопротивлении заземления 2,5 ом понизило потенциал рельс—грунт примерно на 10%. Измерениями подтвердилось, что потенциал рельс—грунт почти не зависит от частоты тока [Л. 5].

Шаговое напряжение, измеренное у подстанции Аннеси, не превышало 1 в [Л. 5] (в источнике не указано, при каком токе измерялось напряжение).

В тяги стрелок и сигналов внутри постов централизации врезаны изоляторы, вне постов они заземлены или соединены с рельсами.

Линии связи. Имевшиеся до электрификации линии связи каблированы [Л. 7]. Лишь на протяжении 10,5 км для различных опытов оставлена воздушная линия из четырех проводов. На этом же участке в опытных целях смонтированы на протяжении 9,8 км три отсасывающих трансформатора и питаемый специальным трансформатором изолированный провод противонапряжения для снижения электростатических влияний на связь [Л. 5, 7]. Опыты показали, что при постоянстве напряжения в контактной сети и при заданном расположении проводов связи подвеска провода противонапряжения ведет к снижению электростатического влияния с коэффициентом уменьшения 10...15. Однако французские инженеры считают, что эти условия практически не соблюдаются и монтаж относительно дорогого провода не оправдывается, и такую схему можно предлагать только для специальных случаев [Л. 9].

Схема с отсасывающим трансформатором и обратным проводом оказалась более эффективной. Малое количество трансформаторов не позволило выявить коэффициент защиты. Крайние трансформаторы оказались не эффективными, средний же обеспечил снижение опасного напряжения примерно в 6 раз.

Исследования на линии связи, находящейся на расстоянии 6...8 м от пути, показали, что при токах контактной сети 40...200 а напряжения, индуктированные в этой линии, составляли 140 мв/акм, для линии, удаленной на расстояние порядка 100 м и имеющей сближение на длине 1,1 км, напряжение равно 60 мв/акм.

На кабелях продольное индуктированное напряжение составило примерно 50 мв/акм, на более удаленном кабеле — 30 мв/акм.

Устройства автоблокировки. Для исследования влияния тягового тока 50 гц на работу автоблокировки смонтировано несколько опытных участков: два участка (длинной 2 000 и 300 м) с применением в двухниточных рельсовых цепях тока с частотой 83,3 гц, короткий участок с применением лущирующего выпрямленного тока и участок одниточной блокировки на постоянном токе.

## Литература

1. Labadie. Подстанция Аннеси. Revue Gen des Chemins de fer, № 11, стр. 606, 1951.
2. Bernard. Падение напряжения в контактной и влияние различных типов электропоездов однофазного тока на стационарные устройства. Там же, стр. 587.
3. Vaubourdoille и Walter. Электрическое оборудование 20 000 в 50 гц линии Э ле Бэн—Ля Рош сюр Форон. Там же, стр. 495.
4. Crepet. Контактная сеть. Там же, стр. 572.
5. Walter. Электрическое оборудование пунктов питания однофазного тока 50 гц. Там же, стр. 561.
6. Barbouton. Конденсаторы, временно включаемые последовательно на линии Э ле Бэн—Ля Рош сюр Форон. Bull. SFE № 9, стр. 603.
7. Sigrist. Связь. Там же, стр. 579.
8. Chappée. Стационарные устройства на линии Э ле Бэн—Ля Рош сюр Форон. Bull. SFE № 9, стр. 1951.
9. Walter. Электрификация железных дорог однофазным током 50 гц. Оборудование линии Э ле Бэн—Ля Рош сюр Форон. Rev. Gen. de l'Electricité, № 1, 1952.

Инж. Л. А. ВИС

## ПРОЕКТ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 300 кВ (Обзор)

Энергетическая система Американской газовой и электрической компании, обслуживающей северо-восточную часть США и имеющей в 1950 г. максимальную мощность 2 250 тыс. квт, ведет проектные разработки для своей программы, предполагающие удвоение мощности в течение ближайших 12 лет. Эта компания обладает рядом электростанций, довольно равномерно распределенных по обслуживаемой территории, и поэтому считает, что она не нуждается в разрешении проблемы дальнейшей передачи энергии. Однако пропускная способность сети линий электропередачи напряжением 132 кв, обслуживающих в настоящее время эту систему, будет недостаточна, если мощность этой системы возрастет, и поэтому намечен переход на более высокое напряжение.

При выборе следующей ступени напряжения берется в основу ряд требований. Нагрузка одной линии магистрального назначения, соединяющей электростанцию с центрами потребления, равна от 10 до 330 тыс. квт (более высокие цифры нагрузки относятся к более коротким линиям). Нагрузка линий маневренного назначения, соединяющих отдельные электростанции, не превышает 200 тыс. квт на одну цепь. Длины отдельных намечаемых линий электропередачи от 80 до максимум 280 км. Пропускная способность линий определяется от 1,5-кратного значения натуральной мощности (375 тыс. квт при 315 кв) для наиболее длинной линии и до 2,5-кратного значения (625 тыс. квт — при 315 кв для наиболее короткой). Для длинных линий пропускная способность определяется требованиями устойчивости параллельной работы в условиях режима напряжений, для коротких же — ограничениями токовой нагрузки проводов по нагреву и потерям.

Для рассматриваемых условий сети был произведен ряд расчетов для различных уровней напряжения — 300, 315, 330, 345 и 360 кв. Выяснилось, что все перечисленные уровни напряжений удовлетворяют требованиям нагрузки этой сети.

Кроме нагрузки линий и их пропускной способности при выборе уровня напряжения были выдвинуты дополнительные эксплуатационные требования, а именно: возможность плавления гололеда, возможность проведения ремонта под напряжением. Кроме того, учитывая зарекомендовавшие себя отводом земли под трассы линий, было отмечено требование применения двухцепных опор при умеренной концентрации мощности на одной трассе.

Далее учитывались требования снижения потерь в корону и уменьшения радиопомех.

Очень важное значение при выборе ступени напряжения придавалось радиопомехам, вызываемым линиями высокого напряжения. На основании материалов исследований, проведенных на опытной установке, на действующей

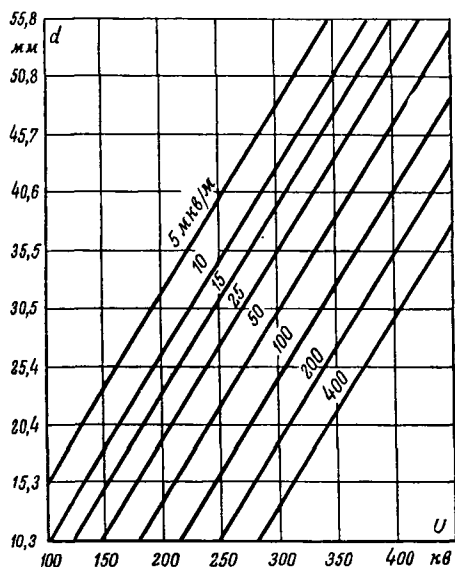


Рис. 1. Типичная величина радиопомех на расстоянии 30 м от провода высоковольтной линии. Хорошая погода.

$d$  — диаметр провода, мм;  $U$  — линейное напряжение, кв.

и в лабораториях, при проектировании исходили из типичной радиопомехи при хорошей погоде, указанных на рис. 1. Допуская величину радиопомех не выше 15 мВ/м на расстоянии 30 м от провода, минимальные диаметры проводов линий при различных напряжениях определены по данным табл. 1.

Таблица 1

Линейное напряжение, кв	Диаметр провода, мм	Радиопомехи, мВ/м
138	12,6	15
230	29,2	15
287	35,4	25
300	40,6	17
315	40,6	25
345	45,8	25
360	48,4	25

Из этой таблицы видно, что для линий 345 и 360 кв необходимо применение проводов с чрезмерно большими диаметрами. В проектах рассматривалось применение расщепленных проводов, но они были исключены вследствие того, что проектировщики считали, что расщепленные провода вызывают усложнение и удорожание монтажа проводов, удорожают опоры и вносят затруднения при плавлении гололеда и ремонте линии под напряжением.

Потери энергии на корону определены на основании данных на опытной установке 500 кв Тидд, сводные данные этих испытаний приведены на рис. 2 и 3. Из этих данных можно судить о значительном увеличении потерь на корону при уменьшении диаметра провода и при повышении линейного напряжения. Однако при правильном выборе уровня напряжения и диаметра проводов потери энергии на корону не являются решающим экономическим фактором.

В итоге всех соображений проектом выбрано для сети высоковольтных линий передачи номинальное напряжение 132 кв, максимальное рабочее напряжение 315 кв, т. е. не выше.

При выборе проводов необходимо было удовлетворить требованиям минимальных радиопомех, экономики потерь энергии, условиям нагрева провода при максимальных нагрузках и требованиям плавления гололеда. Токовая нагрузка одной цепи при 625 тыс. квт и 315 кв равна 190 а. По требованиям экономики потерь было желательно иметь сечение 430 мм<sup>2</sup> (медь). Однако, исходя из требований возможности плавления гололеда, путем зако-

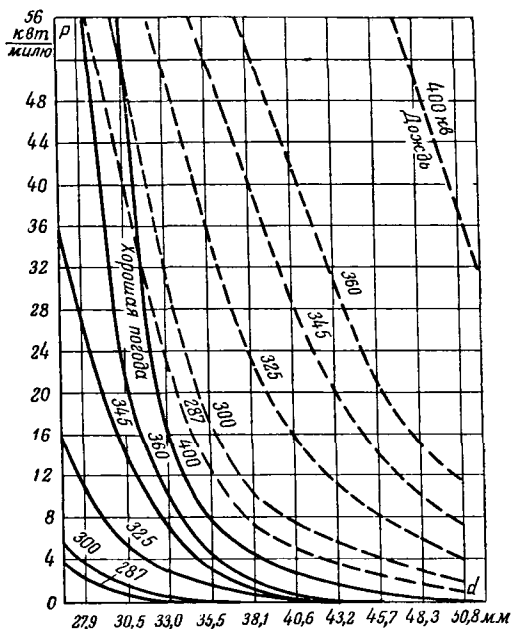


Рис. 2. Типичные кривые трехфазных потерь на корону.

$P$  — трехфазные потери на милю, квт;  $d$  — наружный диаметр провода, мм.

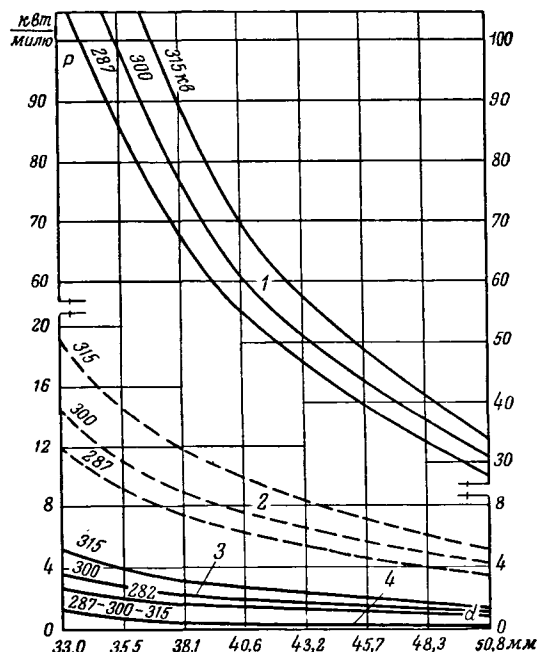


Рис. 3. Типичные кривые трехфазных потерь на корону для различных условий погоды.

$P$  — трехфазные потери на милю, квт; 1 — очень плохая погода; 2 — плохая погода; 3 — ясная погода; 4 — очень хорошая погода;  $d$  — наружный диаметр провода, мм.

расширения участка линии 100..120 км, включаемой на напряжение 132 кв, было принято меньшее сечение — 404 мм<sup>2</sup> (медь).

Для сооружения линий 300 кв принят сталь-алюминевый провод с сечением алюминия 643 мм<sup>2</sup> (эквивалентно 404 мм<sup>2</sup> меди) диаметром 40,6 мм. Провод состоит из двух повивов алюминиевых жил и стального сердечника из 19 жил диаметром 2,22 мм каждая. Общее сечение стали 70,5 мм<sup>2</sup>; таким образом, отношение площади сечения алюминия к площади сечения стали равно 9,15. Для создания наружного диаметра 40,6 мм между

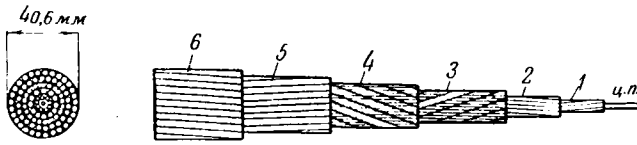


Рис. 4. Сталь-алюминиевый провод с наружным диаметром 40,6 мм.

ц. п. — центральная стальная проволока; 1 — первый повив: 6 стальных проволок; 2 — второй повив: 12 стальных проволок; 3 и 4 — третий и четвертый повивы из алюминиевых жил и заполнителя из бумажного пропитанного шнура; 5 — пятый повив из 22 алюминиевых жил; 6 — шестой повив из 28 алюминиевых жил.

стальным сердечником и повивам алюминевых жил расположены два слоя из пропитанного бумажного шнура. Для обеспечения прочности провода на сжатие в каждом слое бумажного шнура вплетены по 2 алюминиевых жилы (рис. 4). Вес провода 2610 кг/км. Временное сопротивление 19 т.

Для приведенных выше нагрузок сети 300 кв плотность тока для наиболее нагруженных линий будет порядка 1 а/мм<sup>2</sup> алюминия.

Как уже указывалось, для линий 300 кв выбраны двухцепные опоры. Для первой предполагаемой к сооружению линии длиной 100 км от станции Спорн до станции Канава (штат Западная Виргиния) выбраны расчетные пролеты 518 м, что при принятом габарите проводов до земли 10,7 м определяет высоту нижней траверзы опоры 26,8 м и высоту всей опоры 45 м (рис. 5). Промежуточная опора может быть применена как угловая с максимальным углом поворота 5°, при этом расчетный пролет должен быть сокращен до 335 м. Анкерные опоры допускают угол поворота линии до 30°. В качестве меры предохранения проводов при вибрациях применяются комбинированно прутки армодс и демпферы. Подвесные зажимы — глухие. Линия защищена одним защитным заземленным молниеотводом из стального троса сечением 80,5 мм<sup>2</sup>, защитный угол 33,5°. Защитная экранирующая арматура предусмотрена только на линейном конце гирлянды.

Исследование перенапряжений в системе 300 кв, которая предусматривает глухое заземление нейтралей трансформаторов, производилось в нескольких направлениях. Емкостной эффект линий вследствие их сравнительно небольшой длины невелик, и напряжение промышленной частоты может быть лишь на 18% выше максимального рабочего напряжения. Результаты исследований коммутационных перенапряжений, вызываемых повторными зажиганиями дуги в выключателях, сведены в таблицу.

Таблица 2

Число повторных зажиганий дуги в выключателях	Кратность коммутационных перенапряжений по отношению к наибольшему рабочему фазовому напряжению
0	2...2,5
1	2,8
2	3,2
3	3,3

В качестве расчетного принято одно повторное зажигание, т. е. уровень коммутационных перенапряжений 2,8 U<sub>фаз. макс.</sub>

Для этих условий выбрана гирлянда изоляторов с мокроразрядным напряжением 725 кв (18 стандартных изоляторов 5 1/4" X 10"), что дает кратность по отношению к фазному напряжению 4,0. Для действующей линии 287 кв Гувер-Дэм — Лос-Анжелос это отношение равно 4,5, для проектируемой шведской линии 380 кв равно 4,0.

Для линии с гирляндами из 18 изоляторов при сопротивлении заземления опор не более 20 ом и при расстоянии проводов в середине пролета от троса 14,6 м возможно одно грозовое перекрытие на 100 миль за три года.

Линия предусматривает оборудование выключателями с быстродействующим автоматическим повторным включением. Изоляция трансформаторов рассчитана по уровню 315 кв (максимальное рабочее напряжение 330 кв). Одноминутное испытание напряжением промышленной частоты

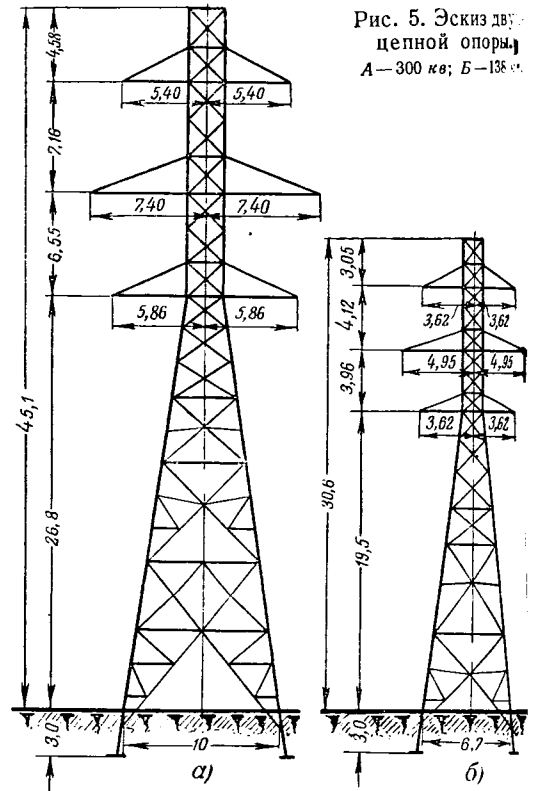


Рис. 5. Эскиз двухцепной опоры: А — 300 кв; Б — 138 кв.

(60 гц) установлено 500 кв, что определяет импульсную прочность изоляции трансформатора равной 1125. Уровни изоляции остальной аппаратуры еще не определены. Масляные выключатели 300 кв должны иметь выключательную мощность порядка 10 млн квд, время отключения 3 периода, повторное включение через 15...20 периодов.

Схемы коммутации подстанций 300 кв предполагают обычные с двумя системами шин. Цепь трансформатора предусматривается с двумя выключателями, цепь 300 кв — с одним.

Как уже указывалось выше, предполагается строить в первую очередь линию длиной 100 км на двухцепных опорах, причем будет первоначально подвешена только одна цепь.

Материал, изложенный в рецензируемой статье, иллюстрирует известное положение, что в условиях пикалестической системы невозможно комплексное решение энергетических проблем, в частности использование преимуществ, создаваемых мощными дальними линиями.

Дальнейшее развитие сети высокого напряжения в этом проекте даже не поставлена задача классификации возможностей напряжения 220 кв (применение расщепленных проводов, продольной компенсации). Отказ от применения расщепленных проводов приводит к спорным конструктивным решениям — увеличению диаметра сталеалюминиевого провода за счет двух слоев пропитанного бумажного шнура. Необоснован выбор барита от наименьшей точки провода в пролете до земли 10,7 м.

Экономически и технически совершенно необоснованное решение проекта — выбор напряжения 300 кв, поскольку в этом проекте даже не поставлена задача классификации возможностей напряжения 220 кв (применение расщепленных проводов, продольной компенсации).

Отказ от применения расщепленных проводов приводит к спорным конструктивным решениям — увеличению диаметра сталеалюминиевого провода за счет двух слоев пропитанного бумажного шнура. Необоснован выбор барита от наименьшей точки провода в пролете до земли 10,7 м.

(Sporn, Peterson, Cross, St. Clair. The 300/315 kv High Voltage Transmission System of the American Gas and Electric Company. AIEE Transactions т. 70, ч. 1, стр. 64, 1951)



## Совещание по энергетике и электрификации новых орошаемых районов

Совет содействия великим стройкам коммунизма Президиуме АН СССР совместно с Энергетическим центром им. Кржижановского провели в марте с.г. совещание по энергетике и электрификации орошаемых земель на базе великих строек коммунизма.

На совещании присутствовало 110 делегатов от 33 учреждений, в том числе представители: АН БССР, ТСХА, ВИСХОМ, ВНИГМ, Института экономики АН УССР, Института теплоэнергетики АН УССР, Энергетического института АН Азербайджанской ССР, Всесоюзного института гидромашиностроения, Латвийской сельскохозяйственной Академии, МИМЭСХ, Сталинградского сельскохозяйственного института, Саратовского института мелиорации и электрификации сельского хозяйства, Минсельхоза совхозов, Главсельэлектро, Гипросельэлектро, Гипроэлектромаш, Главного управления мтс МСХ СССР, Харьковского тракторного завода и др.

На совещании было заслушано 17 докладов и сообщений по следующим основным темам: энергетические характеристики орошения; электро-мтс; распределение электроэнергии в районах орошаемого земледелия и использование местных ресурсов в районах орошаемого земледелия. В прениях приняло участие 20 человек.

Открывая совещание, Г. М. Кржижановский отметил, что в это время как капиталистические государства расходуют огромные средства на вооружение и подготовку новых войн, страна социализма ведет грандиозное строительство мощных источников энергии — гидроэлектростанций, ирригационных сооружений для превращения пустынь и засушливых земель в цветущие сельскохозяйственные районы. По окончании ведущихся ныне пяти лет будет орошено 6 млн. га и обводнено 22 млн. га орошаемых площадей будут получаться устойчивые, в 5 раз более высокие урожаи всех сельскохозяйственных культур. Расширение орошаемых и обводняемых земель даст возможность дополнительно производить 3 млн. т хлопка-сырца (т. е. более 1/3 среднего добываемой этой культуры в США), полмиллиарда пудов пшеницы, 30 млн. пудов риса, 6 млн. т сахарной свеклы. Урожай овса увеличится на 2 млн. голов крупного рогатого скота и на 2 млн. овец. Улучшится климат. Великие стройки коммунизма — это образец социалистического преобразования природы.

Основными задачами в области энергетики, — подчеркнул Г. М. Кржижановский, — является: 1) увязка схем энергоснабжения с требованиями энергетики, 2) разработка научных основ электро-мтс в орошаемых районах, 3) научное обоснование системы электроснабжения орошаемых районов, 4) использование местных энергетических ресурсов.

По первой теме — энергетические характеристики схем орошения на базе использования энергии Куйбышевской и Сталинградской ГЭС сделали доклады инженеры Гипровода Краснобрыжжев Г. А. Игнатюк и инженеры Ленинградского института мелиорации и электрификации сельского хозяйства З. Ш. Маринов и А. Ф. Румянцев. Доклад о схематическом обосновании использования энергии Цимлянской ГЭС сделал инж. Т. Н. Крылов (Украинского института мелиорации и электрификации сельского хозяйства). Инж. Б. И. Филиппов (Украинского института мелиорации и электрификации сельского хозяйства) сделал доклад по той же теме применительно к Каховской ГЭС. Кроме того, инж. А. В. Давыдов сделал доклад на тему «Нормативы и графики сельскохозяйственной электрической нагрузки в районах орошаемого земледелия» сделал инж. Н. А. Краснобрыжжев. Докладчики сообщили, что в число потребителей электрической энергии все находящиеся в проектируемых на рассматриваемых территориях колхозы, совхозы, мтс, предприятия легкой промышленности, районные сельские центры и неосвоенное население. Проектами предусмотрена электрификация процессов животноводства, подсобных предприятий и производств (всего 40 производств), а также осветительная и бытовая нагрузки. Электрифицируются насосные станции, охватывающие зону орошения как

на местном стоке, так и на волжской, донской и днепровской воде.

По второму тематическому разделу об электро-мтс были заслушаны следующие доклады.

Доктор техн. наук П. Н. Листов (ЭНИН) сделал доклад об опыте применения электротракторов и о научно-технических задачах в области создания электро-мтс. Подтвердилась техническая возможность и целесообразность применения электротракторов с кабельным способом питания, но условия работы кабели должны быть коренным образом улучшены. Электрическим трактором освоены все виды вспашки, посева и культивации полей, но еще не освоены обработка междурядий пропашных культур и уборочные работы. Кандидат эконом. наук Г. М. Лоза (ТСХА) ознакомил участников совещания с экономической эффективностью применения электротракторов в мтс на основе трехлетнего опыта их эксплуатации. Первый опыт применения электрических тракторов в сельском хозяйстве доказывает их экономическую эффективность. Докладчик осветил организационно-экономические вопросы электромашино-тракторных станций. Кандидат эконом. наук С. В. Шуров (ВИЭСХ) ознакомил совещание с основными вопросами проектирования и организации электромашино-тракторных станций в Ростовской области на базе Цимлянской ГЭС. Кандидат эконом. наук В. С. Цыганов (ТСХА) сообщил об основных вопросах проектирования и организации Георгиевской электро-мтс в Куйбышевской области.

По третьему тематическому разделу — вопросы распределения электрической энергии в районах орошаемого земледелия — представили доклады: доктор техн. наук А. Г. Захарин (ЭНИН АН СССР) и инж. М. И. Гитман (Гипросельэлектро МСХ). В своих сообщениях докладчики осветили вопрос об организации распределительных сетей 110, 35 и 10 кв, которые в общей сложности составят протяженность в десятки тысяч километров. А. Г. Захарин особенно подробно остановился на вопросе о полевых сетях, питающих электротракторы, и наметил темы дальнейших исследований в этой области. М. И. Гитман ознакомил совещание с вопросом улучшения cos φ и указал на необходимость проведения исследований в области создания саморегулирующихся конденсаторных установок как для монтажа в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. Проф. Ю. В. Скобельцин (Казанский филиал АН СССР) сообщил о повышении эффективности малых и средних сельских гидроэлектростанций в новых зонах орошения. Намеченные мероприятия дают возможность увеличить использование местного стока малых рек и удешевить себестоимость киловаттчаса сельских гидроэлектростанций.

Следующие затем доклады были посвящены четвертому тематическому разделу — об использовании местных энергетических ресурсов в районах орошаемого земледелия. Кандидат техн. наук Н. А. Караулов (ЭНИН АН СССР) ознакомил совещание с особенностями использования местных ресурсов гидроэнергии в новых орошаемых районах Поволжья и Нижнего Дона, показав при этом существенную роль местных гидроэнергетических ресурсов в общем энергетическом балансе орошаемых районов. Инж. В. И. Сидоров (Главсевморпуть) остановился на вопросе использования энергии ветра для целей орошения.

Кандидат техн. наук И. А. Турлюн (ВНИИГИМ) сообщил о возможностях искусственного дождевания в новых районах орошения.

В своем выступлении действительный член ВАСХНИЛ А. П. Костяков осветил вопрос орошения в засушливых районах европейской части СССР.

В прениях по докладам главного конструктора Харьковского тракторного завода Н. Г. Зубарев отметил трудности, главным образом, организационного порядка, стоящие перед заводом при разработке новых типов электрических тракторов, и указал на необходимость создания единого

руководящего центра в этом деле. Инж. Я. С. Теплицкий (Главсельэлектро) обратил внимание на важность дальнейшей разработки системы подвода энергии к электро-трактору. Кандидат техн. наук А. А. Климов (Сталинградский сельскохозяйственный институт) обратил внимание на характерную особенность орошаемого земледелия — смещение максимума нагрузки из зимнего графика в летний. Это обеспечивает благоприятное сочетание промышленной и коммунальной нагрузок с расходом электроэнергетики на цели орошения и электропахоты. Инж. Б. А. Протопопов (редакция журнала «Электричество») отметил недостаточное внимание, уделяемое вопросам, связанным с удовлетворением потребности в тепле, особенно в районах, бедных местными топливными ресурсами, подчеркнув возможности использования для этой цели энергии ветра путем применения специальных ветротепловых установок. Доктор техн. наук И. А. Будзко (МИМЭСХ) указал, что в предложенных схемах не применяется система смешанного распределения и не уделяется должного внимания стабилизации напряжения. Он отметил также большую целесообразность использования ветра для покрытия тепловых нагрузок. Проф. С. А. Бургучев (МИМЭСХ) в своем выступлении

указал, что четвертый (заземляющий) провод в данном случае не нужен. Вопрос о целесообразности применения сельскохозяйственных сетей напряжения 20 кв спорадически должен решаться промышленностью. Кандидат наук В. Т. Полторацкий (ЭНИИ) остановился на благоприятных условиях для использования в Большом Туркменском канале солнечной энергии для нагрева и опреснения воды. Он указал на большие возможности совместного использования солнечного тепла и энергии ветра для удовлетворения тепловых нагрузок.

По окончании прений совещание приняло решение.

Председательствовавший на совещании член-корреспондент АН СССР В. И. Вейц в заключительном слове обобщил результаты совещания по научно-техническим вопросам энергетики и электрификации орошаемых районов в условиях строительства коммунизма. Он отметил особую важность комплексного учета взаимосвязей между энергетикой орошаемых районов, организацией и технологией сельскохозяйственного производства.

Инж. Б. А. ПРОТОПОВ

## Конференция-семинар по новой технике на электрических железных дорогах

В начале мая в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова состоялась вторая<sup>1</sup> конференция-семинар по новой технике на электрических железных дорогах.

В работах конференции приняло участие свыше 350 чел., из числа которых значительную часть (более 250 чел.) составили производственники — работники железных дорог страны, инженеры ряда проектных организаций, а также научные сотрудники Академии наук СССР и Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Участниками конференции явились, кроме того, и научные работники Ленинградского политехнического института им. Калинина, Московского энергетического института им. Молотова, Московского, Днепропетровского и Томского электро-механических институтов инженеров транспорта и других вузов.

Открывая конференцию-семинар, доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев уделил особое внимание расширению связей энергетического факультета ЛИИЖТ с дорогами и дальнейшим успехам в области разработки новых электровозных и тепловозных схем.

На пленарном заседании с докладом «Применение переменного тока промышленной частоты для электрической тяги поездов» выступил доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов (Секция научных разработок проблем транспорта АН СССР). В докладе «О наиболее выгодной характеристике и типе двигателя для магистральных электрических железных дорог» кандидат техн. наук, доц. В. А. Беляков (ЛПИ им. Калинина) привел мотивы, свидетельствующие о целесообразности гиперболической характеристики двигателя, в которой более всего приближается характеристика однофазного коллекторного двигателя промышленной частоты.

В прениях по докладу Д. К. Минова и В. А. Белякова доктор техн. наук, проф. К. Г. Марквард предложил проектировать тяговый двигатель с известным запасом мощности для возможности увеличения скорости поезда при сниженном напряжении в контактной сети. Доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд указал, что опытные исследования электроподвижного состава для новой системы магистральной тяги следует вести по трем направлениям: а) электровоз с ионным преобразователем и двигателем постоянного тока; б) электровоз с однофазным коллекторным двигателем промышленной частоты; в) электровоз с регулируемым вентиляльным асинхронным двигателем. Доктор техн. наук А. С. Димитрадзе и инж. Д. И. Комаров высказали соображения о том, что в условиях электрической тяги, не ограниченной мощностью автономного двигателя, может оказаться целесообразным применение двигателей не с гиперболической характеристикой,

а с характеристикой постоянной скорости, например, в хронных двигателях трехфазного тока.

На заседаниях секции энергоснабжения было сделано 13 докладов. Инж. Л. О. Грубер (ГПИ Тракторостроения) сделал доклад «Типизация проектов тяговых станций и индустриализация их строительства и монтажа». Затраты силовых и контрольных кабелей сокращены по проекту на 30...40%, а кубатура зданий подстанций с первичным напряжением 110 кв — на 34%. 35 кв — на 10% и 6...10 кв — на 22%. На такую же тему представил доклад инж. В. С. Сорокин (Ленгипротранс), указав на некоторые отличия проектных решений по тяговым станциям, принятые Ленгипротрансом. При обмене мнениями по этим докладом были сделаны замечания о недостаточном отражении в типовом проекте требований эксплуатации и о недостаточном обсуждении проекта широкой общественной общественностью.

Отмечалась целесообразность создания специализированных районных строительно-монтажных предприятий с производственной базой и постоянным квалифицированным монтажным персоналом.

В докладе «О расчете сечений проводов контактной сети электрических железных дорог» доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд (МЭИ) критически отнесся к наблюдаемому стремлению к достижению излишней точности расчетов систем энергоснабжения электрических железных дорог, не ставя перед собой практическими результатами. Во же время предложенные и применяемые принципы экономического расчета тяговых сетей мало увязаны с принципами экономического расчета сетей общего пользования. Специфика устройства и эксплуатационные особенности тяговых сетей позволяет рекомендовать пользование в расчетах значительными экономическими нагрузками, определенных в функции от потерь энергии (а не экономическими плотностями, как это делается в сетях общего пользования). Однако предлагаемая методика выбора сечений проводов контактной сети нуждается в дальнейшей разработке на базе глубокого научно-технического анализа.

Доктор техн. наук, проф. К. Г. Марквард (МЭИ) в докладе «Развитие принципов и методов проектирования систем энергоснабжения электрических железных дорог» указал на большое значение усовершенствования и уточнения методов расчета для повышения эффективности электрических железных дорог постоянного тока. В основу методов, разработанных коллективом МЭИИТ, положены технико-экономический принцип, в котором учитываются также и требования организации движения. Введенные в экономические расчеты сечений тяговых сетей так называемых «скоростных расходов», отражающих влияние снижения напряжения в контактной сети на экономиче-

<sup>1</sup> См. Электричество, № 6, 1951, стр. 85—86.

характеристики электрической тяги неправильно, так как пропорциональность между скоростью и напряжением является лишь при стопроцентном использовании локомотива по скорости при любых весах поездов и на любом профиле. В действительных же условиях тяговые двигатели, по мнению докладчика, обладают достаточным запасом мощности для возмещения потери скорости от падения напряжения в сети средствами, заложенными в подвижном составе, без привлечения к этому устройств энергоснабжения. Докладчик отметил, что именно в этом подходе к вопросу о влиянии напряжения на основные параметры системы энергоснабжения и заложен основной источник разногласий и причина существования различных расчетных методов (МЭМИИТ, с одной стороны, МЭИ и ЛИИЖТ, — с другой).

Кандидат техн. наук, доц. **С. Е. Кузин** (ЛИИЖТ) в докладе «Вопросы расчета системы энергоснабжения электрических железных дорог» указал, что как в книге К. Г. Марквардта «Энергоснабжение электрических железных дорог», так и в методических расчетах МЭМИИТ учет организации движения выходя с несправильных исходных позиций. Основой для учета должно являться рассмотрение графика движения как железного закона работы транспорта. Разработанные методики расчетов должны вестись так, чтобы на первом этапе могли быть составлены оптимальные, с точки зрения работы устройств энергоснабжения, варианты графика движения.

При обсуждении докладов **В. Е. Розенфельда**, **К. Г. Марквардта** и **С. Е. Кузина** научный сотрудник АН СССР **А. Рожков** обратил внимание на недостаточный учет основной системы распределения электрической энергии в существующих разработках методов расчета системы энергоснабжения электрических железных дорог, имея в виду существенное влияние, которое нагрузки последних оказывают на основные сети энергосистем своим линейно-растянутым расположением.

Инж. **М. Н. Соломатин** (Ленгипротранс) указал на некоторые преимущества методики расчетов, предложенной МЭМИИТ по сравнению с ранее применявшимися способами; но при этом он отметил, что основные параметры (мощность подстанций и расстояния между ними) должны быть определены любым способом с одинаковым результатом.

Кандидат техн. наук, доц. **Е. В. Чеботарев** (МЭИ) и кандидат техн. наук **Б. Э. Пейсахсон** (ЦНИИЖТ) критично отметили позицию **К. Г. Марквардта** в вопросе о создании резерва запаса мощности.

Было принято решение, в котором предусмотрено участие комиссии из представителей научных и проектных организаций для составления на основе уже разработанных руководящих указаний по расчету тяговых сетей. Рекомендуется также дальнейшая разработка инженерной **В. Е. Розенфельдом** методики, сближающей различные способы выбора сечений контактной сети, применяемыми при проектировании сетей обслуживания.

Сообщения кандидата техн. наук, доц. **И. Я. Рышкова** (Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта) о величине общей и избыточной энергии рекуперации и типе прерывателей тяговых подстанций были подтверждены данными обследования участка с горным профилем, согласно которым величина избыточной энергии рекуперации составила в среднем не более 3%. Двигатели следует считать морально устаревшими, однако, это не значит, что их следует немедленно демонтировать и заменить ртутными выпрямителями, как это было неправильно предложено инж. **Тавадзе** в «Техника железных дорог», № 6, 1951). Докладчик рекомендовал ряд мероприятий для более широкого применения рекуперативного торможения.

Инж. **А. А. Ефимов** (Свердловская ж. д.) сообщил о предложенной им и применяемой на практике новой безреостатной формовки ртутных выпрямителей, чивающей экономии энергии в 5...7 раз.

Кандидат техн. наук **Л. К. Шангина** (ЛИИЖТ) продемонстрировала действующее устройство для отбора энер-

гии от контактной сети постоянного тока. Демонстрация установки вызвала большой интерес.

Доклады научного сотрудника ЦНИИ **Л. А. Вислоуха** и инж. **М. С. Причинина** (Мосэлектротрагострой) были посвящены вопросам испытания типовой арматуры и опыту механизации монтажных работ по контактной сети.

На заседаниях секции электроподвижного состава доктор техн. наук, проф. **А. Е. Алексеев** (ЛИИЖТ) и инж. **А. А. Погосов** (Новочеркасский электровагоностроительный завод) сделали доклад о проекте нового восьмиосного электровагона для магистральных железных дорог. Расположение электрического оборудования в электровагоне выполнено, исходя из требований обеспечения максимального удобства управления электровагоном и безопасности его обслуживания в эксплуатации. Система рекуперативного торможения электровагона построена на новых принципах, получивших название «схема с циклической стабилизацией» (разработанная инженерами **Тихменевым** и **Птицыным**). Новый двигатель имеет высокое использование активных материалов, хорошие тепловые характеристики и вписывается в прежние габариты.

Кандидат техн. наук, доц. **Н. Н. Сидоров** (ЛИИЖТ) доложил о результатах испытания новой электровагонной схемы ЛИИЖТ и о работах по дальнейшему совершенствованию схем электрического подвижного состава. Новая схема была осуществлена на двух электровагонах Свердловской железной дороги.

Результаты испытаний схемы подтвердили ее эксплуатационные преимущества.

Доктор техн. наук, проф. **Д. К. Минов** (МЭИ) сделал доклад о своей новой теории сцепления колес с рельсами при электрической тяге.

Кандидат техн. наук **М. Р. Барский** (Рижский электромашиностроительный завод) в докладе «Экспериментальное исследование сцепления колес с рельсами и способы предотвращения бокового скольжения электровагонов» сообщил о результатах исследований электровагонов серии ВЛ-22м, подтверждающих основные положения теории, выдвинутой **Д. К. Миновым**.

Инж. **С. В. Милютин** (ЛИИЖТ) сообщил о выполненной в содружестве с электродом «Ленинград-Балтийское» работе по улучшению электрических схем моторных вагонов с реостатным торможением.

Доктор техн. наук, проф. **В. В. Медель** (Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта) доложил «О реализации силы тяги электровагоном и о мерах по уменьшению износа бандажей и рельсов в кривых».

В докладе «Вопросы коммутации тяговых двигателей» кандидат техн. наук **Д. М. Лупкин** (ЛИИЖТ) сообщил о результатах своих исследований по изучению условий работы двигателей, приводящих к возникновению кругового огня на коллекторе. Докладчик изложил принципы разработанной им методики расчета устойчивости тягового двигателя против кругового огня.

Сообщения были сделаны также инж. **Н. А. Каршем** (ЛИИЖТ) о переходных процессах в цепях тяговых двигателей, работающих с глубоким ослаблением поля, инж. **И. В. Витевским** (Пермская ж. д.) об импульсном воздействии напряжения на изоляцию тяговых двигателей и инж. **К. Б. Александровым** (ЛИИЖТ) о некоторых причинах неудовлетворительной работы аппаратов грозозащиты электровагона.

В тепловозной секции состоялись доклады **Е. Я. Гаккель**, **М. А. Никулина**, **К. Бердыева**, **В. Г. Сидоренко**, **В. И. Шапошникова**, **В. Г. Лейко**, **Е. В. Платонова**.

На заключительном пленуме конференции-семинара с докладом о ближайших задачах в области электрификации железных дорог выступил начальник Главного управления электрификации Министерства путей сообщения Союза ССР **С. С. Калинин**.

Заместитель председателя Правления ВНИТОЭ **Г. О. Левит** сообщил, что Президиум ВНИТОЭ принял решение об организации в составе ВНИТОЭ секции электрического транспорта.

*Кандидат техн. наук С. Д. ВОЛОБРИНСКИЙ  
Кандидат техн. наук К. К. ШЕЛЕСКОВ*



## В доме инженера и техника им. Дзержинского

Секция промэлектротехники МОНТОЭ совместно с секцией Дома инженера и техника им. Дзержинского провели в начале текущего года совещание, посвященное обсуждению книги Г. А. Ривкина «Преобразовательные установки большой мощности» и рецензии на эту книгу Ю. Г. Толстова, опубликованной в журнале «Советская книга» в октябре 1951 г.

Участники этого совещания (свыше 40 чел.) подробно

обсудили достоинства и недостатки названной книги, отметили, что отдельные положения упомянутой работы на нее в журнале «Советская книга» являются скорее частично неправильными. Автор рецензии доктор наук Ю. Г. Толстов не смог участвовать в совещании независимым от него причинам и сообщил письменно в редакцию журнала «Электричество» о своем несогласии с решением совещания.



## Библиография

**Ю. В. БУТКЕВИЧ, А. А. ВАСИЛЬЕВ, А. А. ГЛАЗУНОВ, И. Я. ГУМИН, С. А. ГЕЛИКОНСКИЙ, М. В. МЕТЛИНА** ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ. Под ред. проф. А. А. Глазунова. Издание 3-е, переработанное. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических институтов и факультетов. 744 стр. Ц. 25 руб. 35 коп. Госэнергоиздат, 1951.

Курс «Электрическая часть станций и подстанций» охватывает обширный круг вопросов. Третье издание этого учебника заново переработано и является дальнейшим шагом вперед. Книга с нетерпением ожидалась студентами и инженерами-электриками.

Общий план книги соответствует учебным программам по этому курсу и соответствует также установившейся во втузах практике изложения этой дисциплины.

Книга разбита на 16 глав, написанных разными авторами, имеет вводную часть и приложения. Отдельные главы книги достаточно между собой увязаны как по содержанию, так и по методике изложения.

Во введении (А. А. Глазунов) дан краткий исторический обзор развития отечественной электроэнергетики.

В гл. 1 (М. В. Метлина) рассматривают вопросы нагрева аппаратуры и токоведущих частей нормальными и ненормальными токами. Гл. 2 (М. В. Метлина) посвящена электродинамическим воздействиям. Гл. 3 (Ю. В. Буткевич) содержит данные о работе контактов. В гл. 4 (Ю. В. Буткевич) рассмотрена электрическая дуга, возникающая при отключении электрических цепей. Написанные Ю. В. Буткевичем гл. 5, 6, 7 и 8 посвящены разбору конструкций выключателей, предохранителей, разъединителей и реакторов соответственно. В гл. 9 (В. В. Васильев и С. А. Геликонский) рассмотрены измерительные трансформаторы. Гл. 10 (М. В. Метлина) посвящена выбору токоведущих частей и аппаратов электрических станций. В гл. 11 (А. А. Глазунов) даны основные сведения о работе энергетических систем. Гл. 12 (А. А. Глазунов) рассматривает схемы электрических соединений. Собственные нужды, включая выбор двигателей, трансформаторов и схем, рассмотрены в гл. 13 (И. Я. Гумин). В гл. 14 (А. А. Васильев) разобраны источники и схемы вспомогательного постоянного тока. Гл. 15 (И. Я. Гумин) посвящена управлению, контролю и сигнализации на электростанциях и подстанциях. Вопросы конструкции распределительных устройств рассмотрены в последней, 16, главе книги (А. А. Васильев).

Помещенные в конце книги приложения (М. В. Метлина) содержат необходимые для выбора аппаратуры и токоведущих частей каталожные данные.

Приведенные в книге сведения при условии знакомства с другими основными курсами по специальности «электрические станции, сети и системы» достаточно для того, чтобы изучивший этот курс получил представление о современном состоянии электрооборудования электростанций и подстанций и смог бы приступить к проектированию электрической части. Изложение материала ведется на теоретическом уровне, соответствующем требованиям к специальному втузам.

Касаясь общего объема книги, следует отметить, что она будет использована не только как учебник. Наряду с проектными организациями, издающими соответствующие типовые расчеты, руководящие указания и т. п.,

в стране имеются сотни организаций и десятки тысяч инженеров-энергетиков, для которых рассмотренный учебник является основным руководством в их практической деятельности. Повидимому, назрела необходимость в выпуске учебника 2...3 лет серии пособий и учебников по электрической части систем и электростанций, ибо без дополнительных руководств проектные организации и инженеры встретят затруднения при решении отдельных вопросов. Здесь речь идет не об энциклопедии или справочнике по электрической части, а именно серия учебников, охватывающих прос всесторонне и обязательно под общей редакцией общего плану. Начало такой серии уже положено, по моему мнению, выпуском рецензируемого учебника, а именно учебников: «Техническая эксплуатация электрических станций и подстанций» (П. Г. Грудинский, 1949 г.), «Короткие замыкания в электрических системах» (С. А. Удальцов, 1949 г.) и «Сети электрических систем» (А. А. Глазунов, 1947 г.) и др. К этим курсам желательно было бы дополнить написанные по тому же общему плану учебники по вопросам защиты и экономике электросистем.

Рассматривая рецензируемую книгу с точки зрения упомянутой серии учебников, хотелось бы в ней отметить также изложение вопросов, связанных с выбором основного оборудования — генераторов и трансформаторов — применительно к требованиям энергосистем. Как известно, вопросы выбора основного оборудования в соответствующих курсах электрических машин почти не рассматриваются. В учебных планах электротехнических факультетов дисциплины «электрическая связь в системах». Основными положениями по электросвязи систем, видимо, следует руководствоваться в курсе «Электрическая часть станций и подстанций».

Перейдем к рассмотрению некоторых замечаний. Краткий очерк истории русской электротехники (в введении) желательно начинать с «первого русского электротехника» В. В. Петрова, а не с Б. С. Якоби, а лучше было бы начать этот очерк с М. В. Ломоносова.

Нельзя не отметить за одно, что авторы основных курсов, хотя и базируются на изложении на отечественных конструкциях, почти не называют конструкторов, строителей, ученых, обогативших советскую энергетику важными разработками.

При выводе в гл. 1 уравнений теплового состояния проводника совершенно правильно принят для учета видов теплоотдачи общий коэффициент  $K$ . Однако следовало бы уже при пояснении обозначений, принятых в уравнении (1-1), перечислить эти виды теплоотдачи, сославшись на последующее изложение, где эти коэффициенты рассмотрены в отдельности.

Хотя объем знаний по математике студентов 4-го курса и дает им возможность самим решить дифференциальное уравнение теплоотдачи и прийти к конечному результату (1-2), но все же в учебнике следовало бы вести и кое-какие промежуточные выкладки.



на стр. 27 с оговорками отмечается независимость  $\sigma$  от постоянной от тока. На наш взгляд правильнее же эту зависимость рассмотреть, ибо, как известно, при  $\sigma$  зависит от плотности тока, скажем от 1 до 5 а/мм<sup>2</sup>, постоянная же меняется от 156 до 6 мин.

Упомянув об эффекте близости, стоило бы, как это было, например, у А. Я. Буйлова («Основы электроаппаратостроения») дать хотя бы в первом приближении кар- физических явлений.

Гл. 2 не содержит упоминания о поведении шинных трупиков при механическом резонансе, о чем желатель- же сказать.

В гл. 6 следовало бы дать представление о предохра- вляющих многократного действия.

Едва ли можно целиком и для всех случаев согла- саться с утверждением в гл. 8 о непригодности реакторов, т. е. железный сердечник.

Имея в виду дальнейшее развитие электроэнергетики, следовало бы отказываться в гл. 9 от рассмотрения сформаторов постоянного тока.

В гл. 10 приведен пример выбора шин по экономи- кой плотности тока. В примере сравнивается стоимость лнгельных потерь при выборе по нагреву со стоимо- перерасходованной меди при рекомендуемом выборе

шиной по экономической плотности тока. При перерас- в 600 кг стоимость меди определена в 5 000 руб., стои- ть же дополнительных потерь исчислена в 2 500 руб.

При цене 1 кВтч потерянной энергии 18 коп. На ос- нии этого делается вывод, что перерасход меди окуп- ся в 2 года. Однако, как известно, экономическая плот- ь тока является директивой, отражающей возможности

подозания проводникового материала с точки зрения одноклассовых интересов на данном этапе. Дирек- ым было бы и решение в отношении применения для

шета шин экономической плотности тока. Если в отно- ении сетей расчет проводников по экономической плотно- а не по нагреву оправдывается и теми обстоятельст- ьми, что при этом дается некоторый запас в пропускной

способности линии, который может быть использован при не нагрузки, а также облегчается поддержание нужной

ичины напряжения у приемников, то в рассматривае- ь примере шинного соединения генератор — трансфор- ь эти соображения не имеют значения.

В гл. 10 следовало осветить вопрос правильного выбо- рохранивателей.

В гл. 11 во вводной части к расчету графиков нагруз- желательно отделить построение проектных перспектив- ь графиков нагрузки от построения эксплуатационных

ьфиков. Надо напомнить студенту о том, что отчетные ьфики за прошедшие периоды времени получают также а записывающем ваттметре.

На стр. 336 указано, что суммарные суточные графики ьзук получаются путем графического сложения состав- ьщих графиков. В проектной практике обычно пользу- ьются методом сложения часовых ординат по таблицам.

му такой таблицы желательно было бы привести.

Из методических соображений следовало бы графики ьвой и реактивной нагрузок рассматривать порознь и ьзяком случае более подробно выяснить существо и ве- ьную потерь реактивной мощности.

На стр. 332 упоминается о необходимости борьбы за ьжий коэффициент мощности. К этому вопросу надо о привлечь внимание читателей несколько глубже. ьше внимания следовало также уделить и вопросу

ли норматива при расчете нагрузки в условиях плано- ь хозяйства СССР.

В гл. 11 необходимо было дать общее представление ьемах соединений и привести общие указания о мето-

дике вычерчивания схем, причем изложение схем электри- ьческих соединений было бы весьма полезным вести, начи- ьная с элементов схем присоединений потребительских цепей, ьзмерительных трансформаторов, реакторов, схем главных ьборных шин и т. п. Такой метод значительно облегчает ь рассмотрение и усвоение более сложных схем.

Рассматривая в разделе 12-9 реактирование сборных ьшин, следовало вести сравнение вариантов реактирования ь с оценкой величины допустимого уровня напряжения на ьсекции при выдаче реактивной мощности в систему.

Нельзя согласиться с отсутствием материала, посвя- ьщенного основным принципам построения схем ртутно- ьпреобразовательных установок, область применения кото- ьрых все возрастает.

Изложение режимов работы трансформаторов (стр. 427 ь и далее) следовало вести, пользуясь коэффициентом за- ьгрузки  $\sigma$ , введенном в официальное издание МЭС — руко- ьводство по эксплуатации трансформаторов.

В гл. 13, во вводной части, надо было вкратце пока- ьзать, на что именно расходуется энергия, идущая на пи- ьтание собственных нужд паротурбинных электростанций, а ьтакже электростанций с тепловыми двигателями других ьтипов, гидростанций и ветростанций. Желательно привести ьданные об относительных размерах потребления энергии ьна собственные нужды для этих станций. При этом нужно ьбыло бы назвать не только средние данные, как это сде- ьлано в табл. 13-1, а давать пределы, в которых наблюда- ьются отклонения от этих средних данных.

Приведенные на стр. 593 замечания о нагреве стали ьстатора и ротора не совсем точны.

Вызывает некоторые возражения метод изложения ьвопроса синхронизации. В частности, здесь, повидимому, ьуместно было бы привести схему блокировки от неправильной ьсинхронизации либо по меньшей мере упомянуть о ней, ьотослав для более подробного изучения к соответствую- ьщему курсу.

В гл. 16, при рассмотрении распределительных уст- ьройств введены термины «наружные» и «внутренние» рас- ьпределительные устройства, хотя на практике и в офици- ьальных изданиях, вроде «правил устройства», применяются ьсоответственно термины «закрытые» и «открытые» распе- ьделительные устройства.

Изложение вопросов конструкций распределительных ьустройств должно начинаться с элементов открытых и за- ькрытых установок. Едва ли принятое в учебнике рассмо- ьтрение всего распределительного устройства в целом мето- ьдически более правильно. В тексте отсутствует описание ьнаиболее современного распределительного устройства на- ьпряжением 110 кв с одноколонковыми разъединителями. ьБыть может именно в связи с этим вопрос о преимущест- ьвах и недостатках открытых и закрытых распределитель- ьных устройств изложен недостаточно подробно.

При рассмотрении трансформаторной камеры жела- ьтельно, хотя бы в самом простом виде, привести расчет ьвентиляции.

Приведенные замечания ни в коей мере не исключают ьсделанной в начале рецензии общей положительной оцен- ьки учебника. Полагаем, что при последующих переизда- ьниях наши замечания будут учтены.

В заключение необходимо отметить, что в обсуждении ькниги и данной рецензии участвовали сотрудники кафедры ьцентральных электрических станций Киевского политехни- ьческого института кандидат техн. наук, доц. А. Б. Будницкий ьи кандидат техн. наук, доц. М. Л. Калниболотский.

Проф. А. В. ОРЛОВСКИЙ  
Киевский политехнический институт



П. Н. ГОРЮНОВ, С. М. ПИГИНА и Н. Н. ШУМИЛОВСКИЙ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ.

490 стр., п. 26 руб. 20 коп. Госэнергоиздат, 1951.

Счетчики электрической энергии получили в сравне- с другими электрическими измерительными приборами ьширокое распространение. Вместе с тем после 1933— ь1934 гг., когда были изданы работы П. Н. Седова, Н. Н. ьШумиловского и других авторов, книг о счетчиках элек- ьтрической энергии больше не выходило. Поэтому издание рецен- ьзированной книги должно приветствоваться.

В данной книге, состоящей из введения и девяти глав, ьрассматриваются: общие вопросы теории электрических ьсчетчиков электромеханической группы (гл. I), теория и ьрасчет электродинамических и магнитоэлектрических ьсчетчиков (гл. II); теория однофазных и трехфазных индук- ьционных счетчиков (гл. III и IV); расчет индукционного ьсчетчика — методика и примерный расчет (гл. V); описа-



ние конструкций и технические данные счетчиков постоянного и переменного токов (гл. VI и VII); специальные типы счетчиков и счетчики специальных тарифов (гл. VIII и IX). Таким образом, книга охватывает весь комплекс вопросов, связанных с теорией, расчетами и конструкциями счетчиков электрической энергии, за исключением вопросов их исследования (измерение вращающего момента, момента трения, магнитных потоков и т. п.) и пересчетов с одних номинальных токов и напряжений на другие, что представляет большой практический интерес. Отсутствие хотя бы кратких сведений по таким вопросам является одним из недостатков книги.

К достоинствам книги, выгодно отличающим ее от вышедших ранее аналогичных работ, можно отнести следующее.

1) В историческом обзоре книги отмечены главнейшие работы отечественных ученых; 2) теоретические вопросы, общие для всех типов счетчиков (за исключением электрохимических), рассматриваются в одной главе, предшествующей всему дальнейшему изложению; 3) приведенные в книге в развернутом виде уравнения погрешностей счетчиков электромеханической группы позволяют произвести подробный анализ их и применить для расчета счетчика; 4) предложена и сопровождается подробно выполненным примером методика расчета индукционного счетчика на основе величины допустимой погрешности, позволяющая рассчитать и дополнительные погрешности проектируемого счетчика, в то время как ранее применявшиеся методы расчета позволяли определить только размеры элементов счетчика и, следовательно, погрешности проектируемого счетчика не могли быть определены до его осуществления.

Недостатки рецензируемой книги различны по своему значению. В числе более существенных недочетов могут быть отмечены, например, такие:

1) содержание гл. I с недостаточной полнотой освещает общие вопросы теории счетчиков электромеханической группы — отсутствует определение основных и дополнительных моментов, не приведено общее уравнение движения подвижной системы, совсем не рассмотрен вопрос об удельном давлении подвижной системы на подпятник, нет ни слова о дополнительных погрешностях;

2) отсутствует всякое упоминание о регламентах, установленных инструкцией 30-41 Комитета по делам мер и измерительных приборов, а также о существовании са-

мой инструкции; в книге дано недостаточное число тех же конструкций; в нескольких имеющихся чертежах отсутствуют размеры;

3) вместо современного образцового счетчика явной нагрузки рассмотрен менее точный и менее образцовый счетчик устаревшей конструкции; мянуты вовсе суммирующие счетчики;

4) при рассмотрении счетчиков потерь и электрических счетчиков ничего не сказано о разработанных в СССР конструкциях этих счетчиков;

5) рекомендуемая авторами нагрузочная кривая счетчиков класса I (включаемых через трансформаторы) характерна неоправданно высокой перегрузочной способностью, не могущей быть практически использованной.

К менее существенным недостаткам может быть отнесено применение индексов, представляющих сокращенные иностранные слова, например,  $M_{med}$  вместо  $M_{cp}$  или вместо  $r_{in}$  и др.; допущение в отдельных местах иностранного языка и неправильной или неудачной терминологии («центральный диаметр», «массовая плотность», «центральный диаметр», «обороты подвижной части пропорциональны количеству электричества», «равномерность скорости» и др.); наличие отдельных не вполне точных с точки зрения физики явлений, выражений, например, стр. 41, где говорится о наличии одного полюса магнита или на стр. 139, где говорится об «э. д. с. активного протывления» и т. д.

Однако в целом рецензируемая книга может служить полезным руководством для учебных и производственных целей.

Сравнительно небольшой и быстро разошедшийся спрос этой книги и большой интерес к ней со стороны широкого круга работников, деятельность которых связана в том или ином направлении со счетчиками электрической энергии, приводят к выводу о безусловной целесообразности повторного издания. При подготовке нового издания легко исправить отмеченные недочеты.

**Бригада кафедры «Автоматические и измерительные устройства» Львовского политехнического института: Б. Л. РЫБИЦКИЙ, В. А. КОЧАН, В. А. ПЕТРОВСКИЙ, Б. В. МОЧАЛОВ**

## Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1952 г.)

Аделунг О. В. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ КОЛХОЗА ИМЕНИ СТАЛИНА (ШУЯРС. РАЙОН. ИВАН. ОБЛ.). 55 стр., ц. 80 коп. Сельхозгиз.

АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ. Под общ. ред. П. И. Устинова. 264 стр., ц. 13 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

Апраксин А. И., Афанасьев В. В., Красногородцев С. А. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ. Под ред. С. А. Красногородцева. 104 стр., ц. 7 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.

ВРЕМЕННЫЕ ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ ПРОВОДОВ ИЗ СПЛАВА «АЛЬДРЕЙ» для подвески на линиях связи в энергосистемах. 15 стр., ц. 65 коп. Госэнергоиздат.

Глазунов А. А. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЕЛИКИХ СТРОЕК КОММУНИЗМА. Стенограмма публичной лекции. 24 стр., ц. 60 коп. «Знание».

Грановский В. Л. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗЕ. т. I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ГАЗОВ. 432 стр., ц. 23 руб. 10 коп. Гостехиздат.

Каменский М. Д. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. Изд. 2-е, перераб. и доп. 248 стр., ц. 13 руб. Госэнергоиздат.

Комар В. Г. РАБОТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ. 256 стр., ц. 10 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

Мееров М. В. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВА-

НИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. 176 стр., ц. 9 руб. 30 коп. Энергоиздат.

Лебедев М. В. УЛИЧНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ГОРОДОВ И СЕЛКОВ. 52 стр., ц. 1 руб. 55 коп. Изд-во Мин. коммунального хозяйства РСФСР.

Лебедев Н. Н. ЭЛЕКТРОМОНТЕР-ЭКСПЛУАТАЦИОННИК СТРОИТЕЛЬСТВЕ. 211 стр., ц. 6 руб. 70 коп. Госстройиздат.

Тажиев И. Т. ЭНЕРГИЯ ВЕТРА КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БАЗА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА 2-е издание, пересмотр. и доп. 192 стр., ц. 12 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. СВОИ СТАТЕИ под ред. К. М. Поливанова. 84 стр., беспл. Госэнергоиздат.

Ферми Э. ЛЕКЦИИ ПО АТОМНОЙ ФИЗИКЕ. Пер. с итал. А. С. Компанейца. 121 стр., ц. 7 руб. 15 коп. Изд. иностр. литературы.

Фефилос М. С. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ОПЫТ КОЛХОЗОВ УДМУРТСКОЙ АССР. 63 стр., ц. 85 коп. Сельхозгиз.

Фогель А. А. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ. 72 стр., ц. 2 руб. 10 коп. Машиз.

Черненко М. С. РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ДНЕПРОПЕТРОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В СВЯЗИ СО СТРОИТЕЛЬСТВОМ КАХОВСКОЙ ГЭС. 47 стр., ц. 3 руб. Изд-во Киев. университета.

Шамрай П. А. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ КОЛХОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА. 307 стр., ц. 8 руб. 60 коп. Гостехиздат УССР.



### Поправка

В тексте к «Номограмме для определения частного двух комплексных чисел  $a + jb$  и  $c + jd$ », помещенной в журнале № 5, 1952 г., должно быть:

$$q = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}$$

$$Q = (p + jq) 100 = 100 (0,468 - j0,6) = 46,8 - j60.$$

