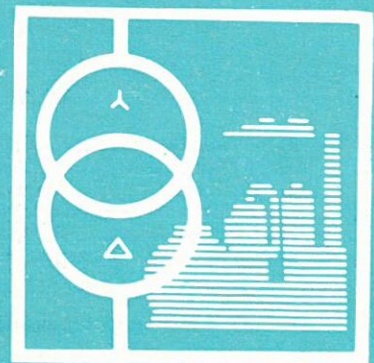


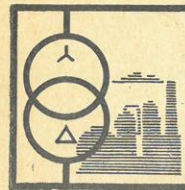
# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ЭЭБ  
12



Поздравляем, дорогие товарищи,  
с Днем энергетика!

Коммунизм — это есть Советская власть  
плюс электрификация всей страны.  
Ленин



# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал  
ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ССРС  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА  
ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени академика Г. М. Кржижановского

12

1983  
Декабрь

Москва, Энергоатомиздат

Основан в 1944 году

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭНЕРГЕТИКА АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Жижин В. В., Хараз Д. И. — Пути экономии энергоресурсов на предприятиях по производству минеральных удобрений . . . . . 2

### ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Музыченко И. И. — Опыт работы Новокузнецкого алюминиевого завода по экономии энергоресурсов . . . . . 4  
Козаренко О. П. — Опыт экономии топливно-энергетических ресурсов на Суходолжском заводе «Вторцветмет» . . . . . 4  
Бондарчук П. И. — Использование древесных отходов в качестве топлива . . . . . 6

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Гернер А. Ш., Ластенко В. В. — Тирсторный привод питателя обжиговой печи . . . . . 7  
Айдаров Ф. А., Задорожный В. И., Гордиенко Ю. Д. — Совершенствование схемы исполнительного органа максимальной токовой защиты косвенного действия . . . . . 8  
Ляляев Г. Г., Мартыненко И. И., Чен Ю. А., Хван М. А. — Автоматизированный учет и контроль потребления электроэнергии на предприятиях черной металлургии . . . . . 10  
Егоричев А. П., Розенбит Г. И. — Современное оборудование — важнейшее условие технического перевооружения и совершенствования теплоэнергетического хозяйства предприятий черной металлургии . . . . . 12  
Важенин Е. В., Кручинина Л. П., Слесарев В. В. — Опыт применения волоконистых огнеупорных материалов в тепловых агрегатах цветной металлургии . . . . . 15  
Экстер А. М. — Об использовании ВЭР в промышленно-отопительных котельных . . . . . 17

### ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Винославский В. Н., Гаскевич П. А. — Учет сопротивлений шахтной распределительной сети при расчетах токов короткого замыкания . . . . . 19

Щапенко Е. Ф. — Влияние сопротивления трансформаторов контроля изоляции на перенапряжения в сетях 6—35 кВ . . . . . 22  
Долин А. П. — Электродинамическая стойкость сварных шин . . . . . 23  
Рахманова Т. С., Родштейн Л. С., Тренихин В. Б. — Промышленные тепловые испытания мощных тиристорных агрегатов с водяным охлаждением . . . . . 26  
Бакластов А. М., Ефимов А. Л., Быстров В. П. — Эффективные теплообменники для утилизации теплоты вентиляционных выбросов . . . . . 28  
Безродный М. К., Волков С. С., Иванов В. Б., Петров В. И. — Применение метода термодинамического подобия для обобщения характеристик предельного теплопереноса в двухфазных термосифонах с вставками . . . . . 30  
Черномордик Л. И., Залькина Н. В., Эренбург В. П. — Политриптический метод анализа чистоты проточной части осевых компрессоров . . . . . 33  
Давидин Е. А., Ключков В. И. — О контроле режима сжигания природных и промышленных газов . . . . . 35

### ПРЕДОВИКИ ТРУДА

Труд по призванию . . . . . 38  
Трудовая биография энергетика . . . . . 38

### ХРОНИКА

Порядок установления лимитов электрической мощности и контроля за их соблюдением . . . . . 39  
Перечень опубликованных межотраслевых методических указаний и рекомендаций по методам расчетов и испытаний на прочность . . . . . 42  
Алфавитный указатель статей, помещенных в журнале «Промышленная энергетика» в 1983 г. . . . . 43

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Бражелов, Г. Л. Багиев, О. Н. Багров, С. И. Веселов (главный редактор), Юлощенко, П. И. Головкин, В. Л. Громова, И. А. Гукаленко, Е. А. Джпаридзе, Егоричев, Г. М. Ермолов, Е. Ф. Мельниченко, В. В. Михайлов, Л. А. Новелла (павного редактора), В. Р. Окорочков, Г. Б. Онищенко, М. Н. Павлов, Ю. Л. Рыж-И. Рябцев, В. И. Савин, Б. В. Сазанов, А. Г. Смирнов, Б. А. Соколов, Ю. А. Тив, Л. Е. Федоров, Е. М. Феськов, И. А. Шадрухин (зам. главного редактора),

Адрес редакции: 103012, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10.  
Телефон 221-66-04.

# сопротивлений трансформаторов контроля изоляции на перенапряжения в сетях 6—35 кВ

ЦАПЕНКО Е. Ф., доктор техн. наук  
Московский горный институт

между фазами сети и землей трансформации для контроля изоляции вносит определение относительно земли. Поскольку это индуктивный характер, а сеть относительно земли, то образуются резонансы, в которых могут возникать резонансные

стемы трансформаторов напряжения (ТН) из трех не связанных между собой Ш-образной формы, на средних стержнях по три обмотки одной фазы, над другой.

примера показан магнитопровод фазы А, к условно расположенных рядом. закона Ома для магнитной цепи магнитному потоку Ф

$$R_M = \frac{l_1}{\mu_0 s_1} + \frac{l_2}{2\mu_0 s_2}, \quad (1)$$

— средние линии магнитной индукции и соответствующих участков магнитной отная магнитная проницаемость стали

м что индуктивность катушки в общем равна квадрату числа ее витков, индукция первичной обмотки с числом витков а напряжения для промышленной частоты

$$\omega L_1 = 2\pi f \frac{w_1^2}{R_M}. \quad (2)$$

практике схема соединения обмоток напряжения показана на рис. 2. Для этой и законов Кирхгофа нетрудно найти выходы в первичных обмотках ТН в функции фаз сети относительно земли  $U_A$ ,

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{k^2 r_0} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C); \\ \frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{k^2 r_0} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C); \\ \frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{k^2 r_0} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \end{aligned} \right\} (3)$$

$= w_1/w_2$  — коэффициенты трансформации сопротивления в цепи соединенных соответствующим треугольником и в звезду вторичных матора напряжения.

являются основными для исследования безопасности и расчета перенапряжений с трансформаторами напряжения типа

Поскольку токи  $I_0$  и напряжения  $U_0$  нулевой последовательности находятся из уравнений

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C = 3I_0; \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0, \end{aligned}$$

то полная проводимость ТН относительно земли одной фазы

$$\frac{I_0}{\dot{U}_0} = \frac{1}{k^2 r_1 r_n} + \frac{3}{k^2 r_0} + \frac{1}{j\omega L_1}. \quad (4)$$

Таким образом, вносимое трансформатором напряжения активное сопротивление

$$r_1 = \left( \frac{1}{k^2 r_1 r_n} + \frac{3}{k^2 r_0} \right)^{-1}, \quad (5)$$

а индуктивное  $\omega L_1 = 2\pi f L_1$ . (6)

На рис. 3 показана схема замещения сети с учетом сопротивлений трансформатора напряжения для контроля изоляции.

Формулы (5) и (6) справедливы и для однофазных трансформаторов напряжения типа НОМ, но в этом случае следует принимать значение  $\frac{3}{k^2 r_0}$  равным нулю.

Перенапряжения относительно земли удобно характеризовать напряжением смещения нейтрали  $U_N$ , так как оно

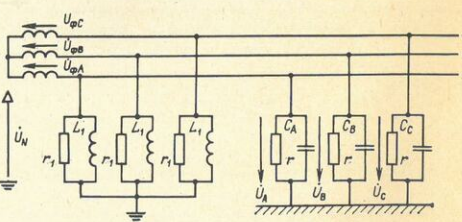
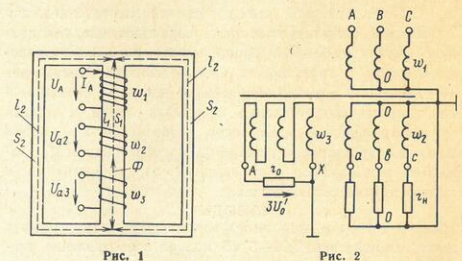


Рис. 3

определяет значение напряжений фаз относительно земли:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{\Phi A} - \dot{U}_N; \dot{U}_B = \dot{U}_{\Phi B} - \dot{U}_N; \dot{U}_C = \dot{U}_{\Phi C} - \dot{U}_N.$$

Для схемы сети с внесенными трансформаторами напряжения сопротивлениями (см. рис. 3) напряжение смещения нейтрали определяется по формуле

$$\dot{U}_N = U_{\Phi} \frac{j\omega(C_A + a^2 C_B + aC_C)}{\frac{3}{r_1} + \frac{3}{r} + j\left(\omega(C_A + C_C + \omega C_C - \frac{3}{\omega L_1})\right)},$$

где  $C_A, C_B, C_C$  — емкости отдельных фаз сети относительно земли;  $r$  — сопротивление изоляции отдельных фаз сети. Предположим, что  $C_A < C_B < C_C$ , получим

$$C_B = C_A + C'_B; C_C = C_A + C'_C,$$

где  $C'_B, C'_C$  — емкости, учитывающие асимметрию сети. При этом напряжении смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = U_{\Phi} \frac{j\omega(a^2 C'_B + aC'_C)}{\frac{3}{r_1} + \frac{3}{r} + j\left[\omega(3C_A + C'_B + C'_C) - \frac{3}{\omega L_1}\right]}. \quad (7)$$

Здесь возможны два предельных случая:  
1)  $C'_B = C'_C = C$ ;  
2)  $C'_B = C, C'_C = 0$  или  $C'_C = C, C'_B = 0$ , где  $C$  — емкость асимметрии.

При таком соотношении переменных  $C'_B$  и  $C'_C$  модуль числителя уравнения (7) имеет наибольшее значение. Поэтому при резонансе, когда

$$3C_A + C'_B + C'_C = \frac{3}{\omega^2 L_1}, \quad (8)$$

напряжение смещения  $U_N$  также имеет наибольшее значение и определяется по формуле

$$U_N = U_{\Phi} \frac{\omega C}{\frac{3}{r} + \frac{3}{r_1}}. \quad (9)$$

УДК 621.316.016.352.001.24

## Электродинамическая стойкость сварных шин

ДОЛИН А. П., канд. техн. наук  
Московский энергетический институт

В соответствии с [1] шины считаются электродинамически стойкими, если выполняется условие

$$\sigma_{доп} \geq \sigma_{max}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{доп}$  и  $\sigma_{max}$  — допустимое и максимальное расчетное напряжения в материале шины; допустимое напряжение принимается равным  $0,7 \sigma_B$  (временное сопротивление разрыву).

Вместе с тем для обеспечения электродинамической стойкости шин, имеющих сварные соединения, условие (1) является необходимым, но недостаточным. В области сварного шва за счет отжига наблюдается снижение прочности материала шины. Зона отжига достигает 70 мм [2]. В качестве примера в табл. 1 приводятся значения временных

В связи с этим кратность перенапряжений можно найти из соотношения

$$\frac{U_N}{U_{\Phi}} = \frac{\omega C r_1 r}{3(r_1 + r)} = \omega C r_0, \quad (10)$$

где  $r_0$  — эквивалентное сопротивление. Полученная формула позволяет при известных емкости  $C$ , создающей асимметрию, и параметрах изоляции сети и трансформатора напряжения определить кратность перенапряжений.

Известно, что индуктивность  $L_1$  одной фазы трансформатора напряжения типа НТМИ-6 равна примерно 180 Гн, поэтому

$$C_A + C_B + C_C = \frac{3 \cdot 10^9}{314^2 \cdot 180} \approx 0,16 \text{ мкФ}.$$

Как видим, резонанс возникает при малых емкостях сети относительно земли, т. е. в тех случаях, когда сеть имеет небольшую протяженность. В этом случае активное сопротивление проводов относительно земли может достигать больших значений, а в пределе — бесконечности.

Пусть, например, емкость несимметрии составляет 30 % суммарной (0,16 мкФ) емкости сети. Тогда при  $r = r_0 = 300 \text{ кОм}$  кратность перенапряжений

$$U_N / U_{\Phi} = 2\pi f C r_0 = 314 \cdot 0,048 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6} = 4,52.$$

Таким образом, в данном примере с реальными параметрами сети возможно более чем четырехкратное увеличение напряжения смещения нейтрали, а следовательно, напряжений сети относительно земли.

Во избежание резонансных перенапряжений большой кратности, вызванных индуктивностями трансформаторов напряжения, необходимо строго соблюдать требования «Правил устройства электроустановок», в которых рекомендуется в цепь соединенной в разомкнутой треугольник вторичной обмотки трансформатора напряжением 3—35 кВ, работающего по схеме контроля изоляции, включать активное сопротивление 25 Ом, рассчитанное на длительное протекание тока 4 А.



Таблица 1

Марка сплава	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{доп}$ , МПа	$\sigma_{в,св}$ , МПа	$\sigma_{доп,св}$ , МПа	$\sigma_{в,св}/\sigma_B$ , %
АДЗТ	127	89	120*	84*	94
АДЗ1Т1	196	137	120*	84*	61
АВТ1	304	213	152	106	50
1915Т	353	247	318	220	90

\* При ручной сварке (с неплавящимся электродом)  $\sigma_{в,св} = 100 \div 110 \text{ МПа}$  [2],  $\sigma_{доп,св} = 70 \div 77 \text{ МПа}$ .

Шинная конструкция	Расчетная схема	Параметр частоты $r_1$	Параметр $1/\lambda(x)$	Наибольшее значение параметра $1/\lambda(x)$	Координаты сечения шины	
					наибольших напряжений	наименьших напряжений
Многопролетная с нерезными шинами	Крайний пролет многопролетной балки (с шарнирным опиранием на первый изолятор)*	4,73	$\left  0,394 \frac{x}{l} - 0,5 \frac{x^2}{l^2} \right $	1/9,5	l	0; 0,79l
	Второй пролет многопролетной балки*	4,73	$\left  0,529 \frac{x}{l} - 0,5 \frac{x^2}{l^2} - 0,106 \right $	1/9,5	0	0,27l; 0,79l
	Средние пролеты многопролетной балки (балка с жестким опиранием на оба изолятора пролета, рис. 1, а)	$\leq 4,73$	$\left  \frac{1}{2} \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} - \frac{1}{6} \right $	1/12	0; l	0,21l; 0,79l
С разрезными шинами, длины которых равны длине одного пролета	Балка с шарнирным опиранием на оба изолятора пролета (рис. 1, б)	$\leq 3,14$	$\left  \frac{1}{2} \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right $	1/8	l/2	0; l
С разрезными шинами, длины которых равны длине двух пролетов	Балка с жестким опиранием на один и шарнирным на другой изолятор пролета (рис. 1, в)	$\leq 3,92$	$\left  \frac{5}{8} \frac{x}{l} \frac{c_p}{c_a + 3} - \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2} - \frac{1}{8} \frac{c_p - 12}{c_a + 3} \right $	$\frac{1}{8} \frac{c_p - 12}{c_a + 3}$	0	$\frac{l}{4}; l$
	То же для конструкций с жесткими опорами	3,92	$\left  \frac{5}{8} \frac{x}{l} - \frac{1}{2} \frac{x^2}{l^2} - \frac{1}{8} \right $	1/8	0	$\frac{l}{4}; l$

\*Для конструкций с жесткими опорами.  
Примечание.  $c_a = c_{оп} l^3 / EJ$ .

Таблица 3

№ кривой на рис. 3	$f_1$ , Гц	$c_{оп} l^3 / EJ$	$M_{оп} / ml$	Фаза
1	75	100	0	B
2	150	1500	0,5	B
3	250	$\infty$	0	B
4	8	1000	-0	A
5	2,5	1500	1	A

напряжение (иногда называемое коэффициентом максимального напряжения [3]), равное  $\eta \cdot \sigma_{max}$  при решении задачи на основе уравнения (3) колебаний системы с одной степенью свободы;  $\eta = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{max}^*}{k^2 y_{уд}}$  — динамический коэффициент при трехфазном к. з.

На рис. 2 представлены кривые динамических коэффициентов параллельных шин, расположенных в одной плоскости, при трехфазном к. з. в зависимости от первой (основной) частоты собственных колебаний шины (на упругих опорах) при различных значениях постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока к. з.  $T_a$ . Кривые на рис. 2 справедливы при любом условии опирания шин на изоляторы пролета.

Значение первой собственной частоты колебаний шин, Гц,

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (7)$$

где  $r_1$  — параметр частоты;  $E$  — модуль упругости материала, Па;  $J$  и  $m$  — момент инерции шины,  $m^4$ , и ее погонная масса, кг/м.

Параметр частоты  $r_1$  является функцией отношений  $c_{оп} l^3 / EJ$  и  $M_{оп} / ml$  и определяется граничными условиями шины. В табл. 2 указаны наибольшие значения  $r_1$  (при высокой жесткости опор).

Максимальные напряжения в материале шины в обла-

сти сварного шва определяются по формуле

$$\sigma_{max св} = |\sigma_{max}(x)| = |M_{max}(x)| / W, \quad (8)$$

где  $x$  — расстояние от левой опоры (изолятора) до сварного шва;  $|\sigma_{max}(x)|$  — наибольшее по модулю напряжение в сечении шины  $x$ ;  $|M_{max}(x)|$  — наибольший абсолютный изгибающий момент в этом сечении.

Расчет напряжений в различных сечениях шины на основе решения уравнения колебаний балки на упругих опорах показал, что распределение наибольших напряжений в пролете при к. з. близко к распределению напряжений при статической нагрузке. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости модулей относительных напряжений от координаты сечений шин для трехфазного к. з. при  $T_a = 0,05$  с и различных значениях  $c_{оп} l^3 / EJ$ ,  $M_{оп} / ml$  и  $f_1$  (табл. 3) для конструкций с жестким закреплением шин на обоих изоляторах пролета. Зависимость  $|\sigma_{max}|$  от координаты шины при статической нагрузке  $q_{ст}$ , равной максимуму электродинамической силы, практически совпадает с кривой 3 на рис. 3.

Таким образом, наибольшие напряжения в области сварного шва шины

$$\sigma_{max св} \approx \frac{M_{max}}{W} \frac{|M_{ст}(x)|}{M_{max ст}}, \quad (9)$$

где  $M_{ст}(x)$  и  $M_{max ст}$  — изгибающий момент в сечении  $x$  и максимальный по модулю момент в шине при равномерном распределенной статической нагрузке  $q_{ст}$ .

После преобразований уравнение (9) приводится к виду формулы (6):

$$\sigma_{max св} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} I^2}{\lambda(x) a W} i^2 y_{уд} \eta, \quad (10)$$

где  $1/\lambda(x) = |M_{ст}(x)| / q_{ст}$ .

составляют 50—94 %  $\sigma_x$ . Таким образом, электродинамической стойкости шин, соединения, помимо условия (1) должно быть равно

$$\sigma_{доп. св} \geq \sigma_{max св}, \quad (2)$$

максимальное расчетное напряжение в обла- щин;  $\sigma_{доп. св}$  — допустимое напряжение прочности после сварки, которое равно 0,7  $\sigma_{св. св}$ .

расчета электродинамической стойкости [3 и др.] шина рассматривается как (удельных опор (изоляторах). Опоры су  $M_{оп}$ , сосредоточенную в опорном се- дают жесткостью  $c_{оп}$  (в частном случае считается бесконечно большой).

опирания (закрепления) шин на изоля- выделить три основные расчетные схе- укций: с жестким опиранием на оба изо- (рис. 1, а), с шарнирным опиранием стким опиранием на один и шарнирым кой изоляторы (рис. 1, в). Жесткое опи- для средних пролетов конструкции с не- и. Такие конструкции наиболее часто пределительных устройствах напряжением арнирное опирание характерно для раз- ы целых или сварных отрезков которых ета. Смешанное закрепление имеют раз- ными целых отрезков, равными длине оследние два условия опирания шин на характерны для конструкций распре- тв напряжения 110 кВ и выше.

динамической стойкости ошиновки свод- дифференциального уравнения четвертого х производных [3]. Решение зависит от 4, определяемых способом опирания шин лета. Однако инженерные расчеты элек- тоустойкости изоляторов и шин можно про- на основе решения задачи о колеба- юй степенью свободы [3]. В этом случае ной координаты шинной конструкции при обыкновенным дифференциальным урав- рядка:

$$m_{ш} \frac{d^2 y}{dt^2} + c_{ш} y = Q, \quad (3)$$

приведенная масса, кг, прогиб, м, и жест- ной односторонней схемы;  $t$  — время, с; ая нагрузка на пролет шины, Н.

не учитывает рассеяния энергии при ко- не допустимо при расчетах в нерезонан- гем самым обеспечивает дополнительный шинной конструкции. Решение уравнения сматриваемых конструкций (см. рис. 1)

$$y = \frac{2 \cdot 10^{-7} I^2}{a c_{ш}} I^2 m y_{ш}, \quad (4)$$

модулю напряжения в материале ши- щазном к. з. определяется по формуле

$$= \frac{M_{max}}{W} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I^2}{\lambda a W} I^2 m^3 \sigma_{max} \quad (5)$$

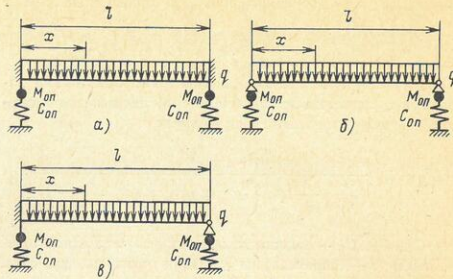


Рис. 1

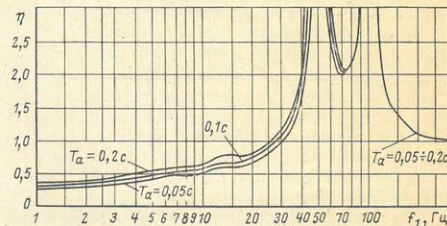


Рис. 2

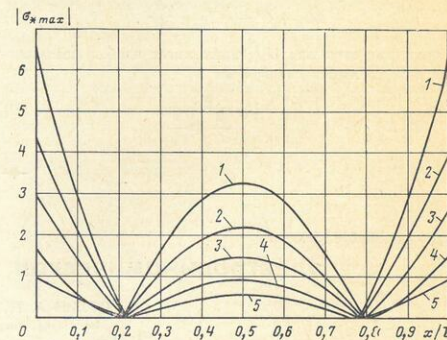


Рис. 3

или

$$\sigma_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} I^2}{\lambda a W} i^2 y_{уд} \eta, \quad (6)$$

где  $l$  — длина пролета шины, м;  $a$  — расстояние между фа- зами, м;  $y_{ш}$  — относительный прогиб шины;  $I_m$  — амплитуда периодической составляющей тока к. з., А;  $i_{уд} = k_{уд} I_m$  — ударный ток к. з., А;  $k_{уд}$  — ударный коэффициент;  $M_{max}$  — максимальный изгибающий момент, Н·м;  $W$  — момент сопротивления поперечного сечения шины,  $m^3$ ;  $\lambda$  — параметр, зависящий от условий опирания шин на изоляторы пролета (табл. 2);  $\sigma_{max}$  — максимальное относительное

при различных условиях опирания шин эта приводятся в табл. 2. Здесь указаны сечений наибольших и наименьших рас- шны, которые в реальных конструк- тивно отличаться. Например, расчеты личных сечениях шин с жестким опи- адатливые или жесткие опоры (рис. 1, а), нове решения уравнения колебаний бал- ной массой, показали, что минимальные в сечениях с координатами  $x$  от 0,2l до 0,8l (см. рис. 3). Кроме того, во льные по абсолютному значению напря- несколько больших нуля (см. рис. 3) етных значений (равных нулю), получен- 10).

ито, что в конструкциях с неразрезными ия в двух крайних пролетах (примыкают ным опиранием) отличаются от напряже- олятах. Необходимые для расчетов край- метры приводятся в табл. 2.

ерить шины ОРУ напряжением 110 кВ на суо стойкость. Трубочатые круглые шины сплава АВТ1 имеют внешний диаметр ений  $d=80$  мм, погонную массу  $m=$  б упругости  $E=7 \cdot 10^{10}$  Па. Шины сварены длиной 2,6 и 2 м. Длина сваренного не пролета  $l=10$  м.

ры собраны из трех изоляторов типа есткость опоры  $c_{оп}=290$  кН/м, частота баний  $f_{оп}=15$  Гц. Расстояние между фа- . Ударный ток трехфазного к. з.  $I_{уд}=$  ая времени затухания аperiodической со- к. з.  $T_{д}=0,05$  с.

омента инерции и сопротивления шины:

$$\omega = \frac{\pi(0,09^4 - 0,08^4)}{64} = 121 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2;$$

$$= \frac{2 \cdot 121 \cdot 10^{-8}}{0,09} = 26,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

масса опоры [3]

$$\frac{c_{оп}}{(2\pi f_{оп})^2} = \frac{290 \cdot 10^3}{(2\pi \cdot 15)^2} = 32,6 \text{ кг}.$$

Находим отношения:

$$c_{оп}^{1/3} / EI = \frac{290 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{7 \cdot 10^{10} \cdot 121 \cdot 10^{-8}} = 3424;$$

$$M_{оп} / ml = \frac{32,6}{3,7 \cdot 10} = 0,88.$$

Определяем параметр частоты  $r_1$  по кривым, приведен- ным, например, в [3], для расчетной схемы конструкции с шарнирным опиранием шины на изоляторы пролета. При данных значениях  $c_{оп}^{1/3} / EI$  и  $M_{оп} / ml$  параметр  $r_1=3,1$ . По формуле (7) вычисляем первую частоту собственных коле- баний шины:

$$f_1 = \frac{3,1^2}{2\pi \cdot 10^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 121 \cdot 10^{-8}}{3,7}} = 2,3 \text{ Гц}.$$

По кривым на рис. 2 находим значение динамического коэффициента  $\eta=0,3$ .

Для конструкций с шарнирным опиранием согласно табл. 2 параметр  $\lambda=8$ , значение функции  $1/\lambda(x)$  при  $x=$   $=l/5$  составляет 0,08.

По формулам (6) и (10) вычисляем максимальные на- пряжения в шине и в области сварного шва шины:

$$\sigma_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 10^2}{8 \cdot 1,1 \cdot 26,9 \cdot 10^{-6}} \cdot 75^2 \cdot 0,3 = 123 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{max св} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 10^2}{1,1 \cdot 26,9 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,08 \cdot 75^2 \cdot 0,3 = 79 \text{ МПа}.$$

Поскольку  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{max св}$  остаются меньше допустим- ых значений  $\sigma_{доп}=213$  МПа и  $\sigma_{доп св}=106$  МПа, шины удовлетворяют условиям электродинамической стойкости (1) и (2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. (ПУЭ-76): Раздел 1. 5-е изд. — М.: Энергоиздат, 1982.
2. Семчинов А. М. Токословы промышленных пред- приятий. — Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982.
3. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой оши- новки распределительных устройств. — М.: Энергия, 1981.



621.314.241].001.4

## Промышленные тепловые испытания ших тиристорных агрегатов с водяным охлаждением

РАХМАНОВА Т. С., РОДШТЕЙН Л. С., ТРЕНИХИН В. Б., инженеры

ПО «Уралэнергоцветмет»

нным объединением «Уралэнергоцветмет» изготавливаются мощные преобразователь- а токи в диапазоне от 6300 до 50 000 А ектролизеров и других технологических емой водяного охлаждения силовых полу- риборов (СПП).

авляемые выпрямители (СУВ), размещен- ной конструкции, выполнены с примене-

нием силового водоохлаждаемого модуля, включающего в себя групповой охладитель, тиристоры таблочной кон- струкции (Т-630), предохранитель (ПП-57) и индуктивный делитель тока. В качестве группового охладителя, являю- щегося одновременно и токоведущей шиной, использован медный профиль квадратного сечения 60×60 мм с внутрен- ним каналом диаметром 30 мм.

В результате применения одностороннего охлаждения

СПП уменьшилось до минимума число охладителей и водоводов, упростилось изготовление и эксплуатация СУВ. Плотность теплового потока при указанном охлаждении в среднем составляет около 300—400 кВт/м<sup>2</sup>.

Благодаря симметрии внутреннего теплового сопротив- ления СПП их можно располагать на охладителе любой стороной, что обеспечивает универсальность применяемой конструкции. В реверсивных СУВ тиристоры расположены с одной стороны охладителя, а в реверсивных — с двух противоположных сторон [1].

Охлаждение СПП осуществляется по двух- или одно- контурной схеме. В случае применения двух контуров дис- тиллированная вода, циркулирующая во внутреннем контуре, проходит через все последовательно соединенные групповые охладители СУВ и поступает в теплообменник, где охлаж- дается технической водой второго контура [2]. Одноконтур- ная система охлаждения с использованием обычной техни- ческой воды применяется в установках до 115 В. В системе предусматривается прибор теплового контроля, обеспечи- вающий отключение агрегата по максимальной температуре воды. Контроль удельного электрического сопротивления воды осуществляется с помощью специального датчика.

При разработке СУВ выполнены тепловые расчеты тиристоров по методу тепловых схем замещения с рядом допущений. Известно, что температурное поле СУВ неста- ционарно, и, хотя мощность потерь других термически активных частей СУВ значительна (около 60% мощности потерь в тиристорах), определение температуры этих эле- ментов аналитическим путем не может быть выполнено с достаточной степенью точности.

С целью изучения тепловых режимов СУВ в эксплуа- тации, определения оптимального расхода воды, а также возможности увеличения тока тиристора на предприятиях цветной металлургии проведены испытания ряда преоб- разователей (см. таблицу). Их результаты, методики и специ- фические особенности могут представить интерес как для разработчиков мощных полупроводниковых агрегатов, так и для эксплуатационного персонала.

Тип преобразова- теля	Ток нагруз- ки при ис- пытаниях секции, А	Назначение	Режим работы	Система охлажде- ния
САПТ-6300/230	6300	Питание элек- тролитизера водо- родора	Реверсив- ный	Двухкон- турная
САПТ-12530/36	6300	То же цинка	"	Однокон- турная
ПТ-4800/230-1а	5000 (эксплуата- ционный)	То же воды	"	"
САПТ-25000/450	6300	То же никеля	"	Двухкон- турная
ПТЦ-25000/450	6300	То же меди	Реверсив- ный	"

При тепловых испытаниях измеряли температуру корпусов тиристора и охладителей, контактных выводов предохранителя, шин постоянного и переменного тока, металлоконструкций шкафа, расход воды и ее температуру на входе и выходе. Температуру измеряли на самых нагруженных тиристорах (до установки термомпар измеряли ток каждого тиристора СУВ), а также тиристоры на входных и выходных охладителях с помощью термомпар типа ХК; выходы д. с. фиксировалась потенциометром. Оказалось, что с учетом внутреннего теплового сопротив- ления тиристора расчетная температура р-п структуры составляет не более 105°C (допустима 125°C).

Рис. 1. Зависимость превышения температуры контактного вывода предохранителя (кривая 1), шины постоянного тока (кривая 2) и корпуса тиристора (кривая 3) от расхода охлаждающей воды

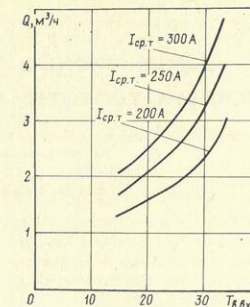
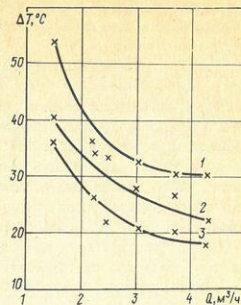


Рис. 2. Зависимость расхода охлаждающей воды от температуры ее на входе при различных средних токах тиристора

При испытаниях СУВ с одноконтурной системой охла- ждения была получена зависимость (рис. 1) температу- ры корпуса тиристора и других элементов СУВ от расхода охлаждающей воды (при низких по сравнению с темпе- ратурой окружающего воздуха температурах воды). Однако, если в летнее время температура воздуха достигает 40°C, а охлаждающей воды — менее 10°C, возникает опасность появления конденсата, резко снижающего электрическую прочность изоляции СУВ. Для предотвращения этого не- обходимо контролировать и регулировать поток охлажда- щей воды в системе.

Расчетный расход охлаждающей воды, необходимый для предотвращения 22 кВт потерь, выделяемых в тири- сторах СУВ-6300, составляет 4 м³/ч при температуре воды на входе 35°C. Испытания показали, что при температуре входящей воды ниже 30°C расход охлаждающей воды может быть снижен до 3 м³/ч.

Было проведено несколько опытов по определению ра- ботоспособности СУВ при отключении одного или двух из десяти параллельно работающих тиристоров. При односто- роннем охлаждении средний ток тиристора может быть повышен до 300 А при температуре р-п структуры в пре- делах допустимого значения.

При среднем токе тиристора 250 А с учетом коэффи- циента формы и неравномерности деления тока между фазами, а также между параллельно работающими тири- сторами действующее значение токов некоторых СПП мо-

коп.

