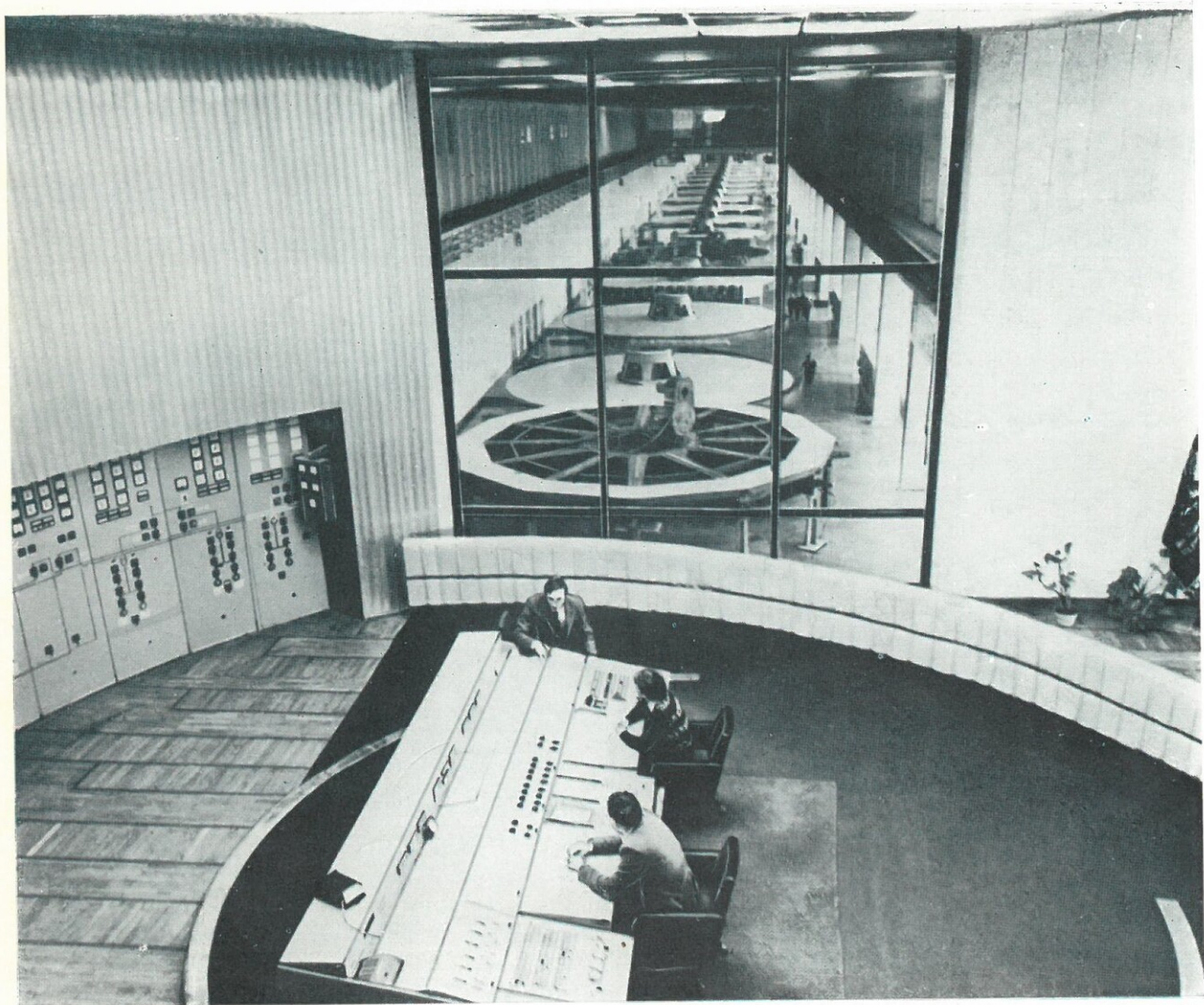




# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ



2

· ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ · 1986

ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г.М. КРЖИЖАНОВСКОГО  
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОСНОВАН В 1930 ГОДУ

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ФЕВРАЛЬ

2 1986

## СОДЕРЖАНИЕ

- СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ**  
Ильич В. Н., Фианцев В. С. — Основные положения по разработке и регламентированию системы управления энергопроизводством
- ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ**  
Шабалин Е. М., Дмитриев В. Б., Акашев Р. Д. — Повышение эффективности формирования и использования единого фонда развития науки и техники в электроэнергетике
- АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**  
Павлыш О. Н., Реуков Ю. Н. — Динамические характеристики парогенераторов энергоблока с реактором ВВЭР-1000 как объекта регулирования уровня
- ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**  
2 Дахов А. И., Сванбаева Л. А., Фартыгин А. А., Курбатов М. П. — Снижение злового износа конвективных поверхностей нагрева котлов, сжигающих высокозольные угли  
5 Шульгин Е. С., Пахутов А. А., Жуйков А. В. — Стабилизация эффективности золоулавливания  
6 Лисейкин И. Д., Кокарева Л. Р., Ковчегина Т. В. — Температурные и тепловые неравномерности в элементах поверхностей нагрева водогрейных котлов  
0 Плисскин Г. И., Чистый А. Н., Решетняк Л. И. — Химическая очистка котла среднего давления от сложных эксплуатационных отложений  
2 Рождественский С. С., Павлов И. И., Сорокин В. А., Зайцев А. Ю. — Долговечность и надежность водогрейных котлов, работающих на высокосернистом мазуте  
6 Бонско В. А., Бояльинский М. М., Дробь Д. Я., Мережко В. П., Шендеровский М. Л. — Повышение эффективности реконструированных конденсационных турбин  
8 Агапов А. П., Богомолов Д. С., Карев А. Н., Носихин В. Л. — О работе регуляторов безопасности паровых турбин  
0 Флос С. Л., Желялетдинова В. К. — Методика расчета поправок к характеристикам теплофикационных турбоагрегатов на изменение режима работы ПВД  
4 Кулик В. Ф., Завидин А. П. — Диагностика проточной части питательных насосов сверхкритического давления  
5 Баудина А. И., Романова О. А., Масютин И. И., Ежунов В. Е. — Коагуляция воды оксихлоридом алюминия  
8 Васильев В. П., Цирульников Л. М., Абдуллаев Ш. А., Ерденик О. Г., Кричман Р. Д., Блинцов А. В. — Сокращение выброса окислов азота путем зонального впрыска влаги в топку котлов
- ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**  
0 Альтерман Д. З., Макаров Б. Н. — Эксплуатация ГЭС при отключе-
- ном уравнительном резервуаре с использованием программного закрытия турбин
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**  
44 Брюханов Г. А., Князев С. А. — Метод и устройство для диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей
- РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**  
46 Долин А. П. — Определение термической стойкости шин из различных алюминиевых сплавов
- ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**  
49 Калужный А. А., Левинштейн М. Л. — Неполнофазные режимы линий электропередачи высокого напряжения
- ВОПРОСЫ ИЗОЛЯЦИИ**  
54 Беляков Н. Н., Казачкова Е. И., Рашкес В. С., Хоециан К. В., Шур С. С. — Эффективность применения ограничителя перенапряжений на шунтирующих реакторах 750 кВ  
57 Давыдова Л. И., Мерхалев С. Д., Проскуряков А. И. — Лабораторные исследования разрушения стеклянных изоляторов  
60 Морозов А. И., Сви П. М. — Особенности измерения емкости и диэлектрических потерь изоляции при рабочем напряжении
- ОБМЕН ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОПЫТОМ**  
63 Фильштинская Э. П., Исанбекова Э. Г., Захаров Ю. В. — Определение и прогнозирование располагаемой мощности тепловых электростанций  
66 Федотов А. А., Штромберг Ю. Ю., Веретенников О. К., Смирнов А. Ф., Баранов Н. А., Абатуров В. Ф., Орлик А. В. — Повышение ресурса работы бил углеразомольных молотковых мельниц  
68 Сальников Г. К., Колычев А. Ф., Пантелеев В. Г., Трофимов В. Н., Жолнерович В. Г., Глебов А. И. — Реконструкция золотавалов ТЭС  
70 Рогожкин В. В., Москвин А. И., Иванов В. И., Минули Р. С., Рапопорт В. Е., Паршуков В. С. — Металлоулавливание в системах пылеприготовления  
72 Завидин А. П. — Расчет на ЭВМ оптимальных режимов работы конденсационной установки турбины К-300-240 ХТГЗ  
73 Боркин М. А. — Ремонт и наладка электронных усилителей УДП2-03  
75 Мыслин Д. А. — Определение зоны защиты молниеотводов с помощью программируемого микрокалькулятора
- В ГОСИНСПЕКЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ**  
76 Сергеев А. Н. — Всесоюзное совещание «О дальнейшем повышении надежности и снижении аварийности на электростанциях, в сетях и энергосистемах»  
79 Борисов Е. И. (К 70-летию со дня рождения)

На обложке — Усть-Илимская ГЭС. Главный щит управления.

УДК 621.316.35.016.001.24  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШИН ИЗ РАЗЛИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

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

В соответствии с ПУЭ проводники считаются термически стойкими, если выполняется следующее неравенство

$$\Phi_k \leq \Phi_{доп} \quad (1)$$

где  $\Phi_k$  — конечная температура нагрева;  $\Phi_{доп}$  — допустимая температура нагрева шин при КЗ.

В нормативных документах [1, 2], литературе по электроэнергетике [3, 4], как правило, приводятся расчетные коэффициенты и кривые для определения температуры нагрева шин из алюминия, меди и стали. Для указанных материалов ПУЭ устанавливает допустимые температуры нагрева, например для алюминиевых шин  $\Phi_{доп} = 200^\circ\text{C}$ .

Вместе с тем, кроме технического алюминия (марки АД10) широкого распространение получили шины из алюминиевого сплава АД31, обладающего большей механической прочностью. В последние годы для изготовления жестких шин ОРУ напряжением 110 кВ и выше стали использовать высокопрочные алюминиевые сплавы АВ, 1915 и др. Физико-механические характеристики алюминиевых сплавов и технического алюминия могут существенно отличаться. Например, с увеличением прочности алюминиевых сплавов, как правило, возрастает электрическое сопротивление. Поэтому расчетные кривые и коэффициенты для определения конечной температуры нагрева, а также допускаемая при КЗ температура шин требуют дополнительного обоснования и уточнения.

Для изготовления шин в отечественной и зарубежной практике используют деформируемые алюминиевые сплавы, которые по химическому составу относятся к трем системам легирования: технический алюминий А1 (например, АД0, АД1, АД), сплавы алюминий-магниево-кремниевой группы А1 — Mg — Si (АД31, АД33, АД35, АВ) и алюминий-цинк-магниево-марганцевой группы А1 — Mg — Mn (например, АМг5).

Физические свойства материалов шин зависят не только от группы легирования и марки сплава, но и от технологии производства (прокатки, литья, прессовки, штамповки) и способа термической обработки [5—7]. Наиболее распространенный способ получения профилированных шин — прессование и прокатка. Вид термической обработки полуфабрикатов из алюминиевых сплавов указывается в буквенно-цифровой маркировке, добавляемой к основному обозначению сплава: М — отожженное, Н — нагартованные, Т — закаленные и естественно состаренные, Т1 — закаленные и искусственно состаренные и др.

Следует отметить, что физико-механические свойства сплавов могут изменяться в пределах марочного состава, а также при незначительных (допустимых) изменениях технологии производства полуфабрикатов [5].

Поэтому параметры сплавов, указанные в технических условиях, могут отличаться от типичных свойств. Типичные свойства являются математическими ожиданиями параметров, полученных для совокупности образцов, изготовленных из сплавов разного состава в пределах марки по серийной технологии. Например, в соответствии с техническими условиями временное сопротивление разрыву сплава АД31Т1 равно 196,2 МПа, а типичная прочность 240 МПа [7]. Согласно ГОСТ 15175-70 удельное сопротивление шин из этого сплава устанавливается не более  $0,0325 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, а типичное удельное сопротивление сплава  $0,0310 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [5] и т. д.

Предельно допускаемая температура нагрева шин при КЗ устанавливается с учетом снижения механической прочности проводникового материала. На рис. 1 приведены зависимости типичных временных сопротивлений разрыву алюминиевых сплавов (указанных в табл. 1) от температуры, построенные по данным [5, 6]. В табл. 1 приводятся также отношения временных сопротивлений разрыву при повышенной температуре  $\sigma_{\Phi 20}$  к сопротивлению разрыву при нормальной температуре  $\sigma_{20}$ . Для большинства сплавов, применяемых для изготовления шин (в том числе для отожженного технического алюминия), отношение  $\sigma_{\Phi 20}$  при допускаемой температуре шин  $200^\circ\text{C}$  к  $\sigma_{20}$  составляет более 0,5. Только для нагартованного алюминия (редко применяемого для изготовления шин) это отношение не превышает 0,3. Отношения  $\sigma_{\Phi 20}/\sigma_{20}$  при температуре больше  $200^\circ\text{C}$  для рассматриваемых алюминиевых сплавов остаются выше, чем для отожженного алюминия.

Таким образом, для шин из закаленных алюминиевых сплавов систем легирования А1 — Mg — Si и А1 — Zn — Mg, а также для отожженных сплавов А1 — Mg — Mn группы допускаемую температуру нагрева при КЗ оправдано принять равной  $200^\circ\text{C}$ , т. е. такой же, как для технического алюминия. Однако для нагартованного алюминия  $\Phi_{доп}$  по-видимому, целесообразно снизить до  $175^\circ\text{C}$ .

Изменение временного сопротивления разрыву от температуры может повлиять на снижение электродинамической стойкости ошиновки. Например, у конструкции напряжением 110 кВ и выше с низкой частотой собственных колебаний [8] амплитуды механических напряжений могут оставаться близкими к наибольшему значению, когда температура шин достигает  $150$ — $200^\circ\text{C}$ . В этих случаях расчет термической стойкости ошиновки оправдано проводить совместно с оценкой

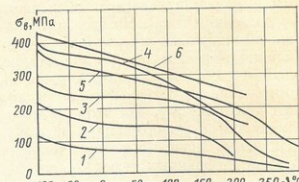


Рис. 1

электродинамической стойкости, учитывая снижение  $\sigma_{\Phi}$  при нагреве.

Для практических расчетов термической стойкости шин обычно используют кривые зависимости температуры их нагрева при КЗ от удельного интеграла Джоуля  $A = B/s^2$  ( $B$  — интеграл Джоуля;  $s$  — площадь поперечного сечения шины). Одни из первых расчетных кривых были опубликованы в 20-х годах И. Бирмансом. Позднее для отечественных сплавов они были рассчитаны С. А. Геликонским и вошли в Руководящие указания [1]. До настоящего времени эти кривые практически не претерпели изменений [4]. (Ряд авторов в различные годы проводил уточнения кривых  $\Phi = f(A)$  при иных параметрах технического алюминия и меди, чем принято в [1], но они незначительно отличались от кривых С. А. Геликонского и не получили широкого распространения.) Вместе с тем, как показали проведенные исследования, кривые в [1] для технического алюминия дают значительные погрешности при расчете температуры нагрева шин из алюминиевых сплавов других систем легирования.

Для сплавов, указанных в табл. 2, были проведены расчеты зависимости  $\Phi = f(A)$ . В качестве исходного использовалось известное уравнение теплового баланса для адиабатического процесса

$$i^2 R_{\Phi} dt = c_{\Phi} m \delta t, \quad (2)$$

где  $i$  — ток КЗ, А;  $R_{\Phi}$  — сопротивление проводника при температуре  $\Phi$ , Ом;  $c_{\Phi}$  — удельная теплоемкость;

Таблица 1

Система легирования	Кривая на рис. 1	Марка сплава в состоянии поставки	Полуфабрикаты	$\sigma_{\Phi}/\sigma_{20}$ при $\Phi$ , °С				
				150	200	250	300	
А1	1	АДМ	Катаные	0,750	0,525	0,350	0,225	
	2	АД1М		»				
	3	АДН						
А1—Mg—Si	4	АД1Н	Прессованные	0,733	0,280	0,186	0,120	
	5	АД31Т1		0,708	0,625	0,458	—	
	6	АД31Т		0,875	0,542	0,208	0,125	
	7	АД31Т1		0,774	0,645	—	0,290	
	8	АВТ1		0,788	0,667	0,424	—	
А1—Zn—Mg	9	АВТ1	Катаные	0,800	0,685	0,457	—	
	4	1915Т		0,616	0,500	—	—	
	6	1915Т1		0,778	0,694	—	—	
	7	1915Т		0,750	0,500	—	—	
А1—Mg—Mn	8	АМг4М	Катаные	0,785	0,607	0,500	0,393	
	9	АМг5М		0,767	0,600	0,467	—	
	5	АМг6М		0,781	0,590	0,500	0,406	
	6	АМг6М		0,781	0,590	0,500	0,406	

Таблица 2

Система легирования	Кривая на рис. 2	Марка сплава в состоянии поставки	$C_{\Phi}$ , А·с <sup>2</sup> /мм <sup>2</sup>	$\rho$ , 10 <sup>-6</sup> Ом·м	$\delta$ , кг/мм <sup>3</sup>	$c$ , Дж/(кг·К)	$\beta$ , 1/°С
А1	1	АД0	90	0,029	2710	924	0,00053
	2	АДОМ	92	0,029	2710	964	0,00053
	3	АД1М	90	0,030	2710	964	0,00053
А1—Mg—Si	4	АД31Т1	85	0,0325	2710	924	0,00050
	5	АД31Т	82	0,035	2710	924	0,00050
	6	АД33Т1	77	0,040	2700	920	0,00095
	7	АД33Т	74	0,043	2700	920	0,00095
	8	АВТ1	73	0,038	2700	797	0,00116
А1—Zn—Mg	9	АВТ	71	0,041	2700	797	0,00116
	4	1915Т	66	0,0517	2770	880	0,00051
А1—Mg—Mn	9	АМг5	63	0,059	2650	922	0,00092

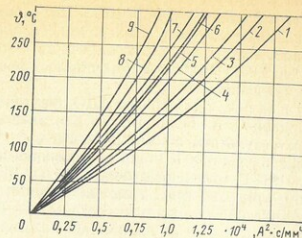


Рис. 2

Дж/(кг·К);  $m = \delta ls$  — масса шины, кг;  $\delta$  — плотность кг/м<sup>3</sup>;  $l$  — длина шины, м;  $s$  — площадь ее поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

Уравнение (2) не учитывает теплоотдачу в окружающую среду, распределение плотности тока по сечению проводника в переходном режиме, неравномерность нагрева шины, теплоотдачу между точками шины с разной температурой нагрева. Эти допущения справедливы при инженерных расчетах термической стойкости ошиновки. Неравномерность распределения плотности тока приблизительно можно учесть с помощью коэффициента дополнительных потерь  $k_{\Phi}$ . При продолжительности аperiodической составляющей тока КЗ коэффициент  $k_{\Phi}$  в переходном режиме приблизительно можно принять равным коэффициенту дополнительных потерь в установившемся режиме.

Сопротивление проводника

$$R_{\Phi} = k_{\Phi} \rho_{\Phi} l / s,$$

где  $\rho_{\Phi}$  — удельное сопротивление, Ом·м.

Удельное сопротивление и удельная теплоемкость обычно принимаются линейно зависящими от температуры, т. е.

$$\rho_{\Phi} = \rho_0 (1 + \alpha \Phi);$$

$$c_{\Phi} = c_0 (1 + \beta \Phi),$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — температурные коэффициенты сопротивления и теплоемкости, 1/°С;  $\rho_0$  и  $c_0$  — удельные электрическое сопротивление и теплоемкость при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Решение уравнения (2) дано, например, в [4]. После преобразований с учетом коэффициента дополнительных потерь оно приводится к виду

$$k_{\Phi} \frac{B}{s^2} = A (\Phi_k) - A (\Phi_n), \quad (3)$$

где

$$A (\Phi) = \frac{\delta c_0}{\rho_0} \left[ \frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln (1 + \alpha \Phi) + \frac{\beta}{\alpha} \Phi \right]; \quad (4)$$

$\Phi_n$  и  $\Phi_k$  — конечная и начальная температура шины при КЗ.

Функции  $A$  для различных сплавов вычислялись на ЭВМ. Результаты расчетов в виде зависимостей температуры  $\Phi$  от параметра  $A$  приведены на рис. 2. Физические характеристики сплавов, принятые в расчетах, даны в табл. 2. В основном они отвечают типичным свойствам материалов [5—7], за исключением удельных электрических сопротивлений сплавов АД31Т и АД31Т1, которые приняты равными наибольшему допускаемому зна-

чениям (в соответствии с ГОСТ 15175-70). Кроме того, для сплава 1915Т удельное электрическое сопротивление, изменяющееся (в пределах марочного состава) от  $0,0485 \cdot 10^{-6}$  до  $0,0517 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [5], считалось равным наибольшему значению.

Кривая 1 на рис. 2 для сплава АДО практически совпадает с кривой С. А. Геликонского для алюминия [1]. Полученные результаты показывают, что расчетные конечные температуры при КЗ шин из алюминия и, например сплава 1915Т, отличаются более чем на 150%. Таким образом, кривую 1 (рис. 2) можно использовать для расчета термической стойкости в соответствии с уравнением (3) только для шин из технического алюминия; для сплавов других систем легирования расчет приводит к значительной погрешности.

Все кривые на рис. 2 построены при температурных коэффициентах электрических сопротивлений, равных  $0,004$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Это значение характерно для чистого алюминия. Для алюминиевых сплавов значения  $\alpha$  обычно составляют  $0,0036-0,0044$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). При вариациях коэффициентов в пределах  $0,004 \pm 0,0004$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) функции  $A(\theta)$  изменяются примерно на 1,5–2%.

Также незначительно влияют на параметры  $A$  изменения температурных коэффициентов теплоемкости  $\beta$ . Если принять  $\beta$  равными  $0,00053$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) (как для технического алюминия), то значения  $A(\theta)$  отличаются от кривых рис. 2 максимум на 1,2%.

Таким образом, в инженерных расчетах термической стойкости шин коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  для алюминиевых сплавов вполне допустимо принимать одинаковыми.

Следовательно, в соответствии с уравнением (4)

$$\frac{A(\theta)}{A_1(\theta)} \approx \frac{\delta c_p}{\rho_0 \xi_0} \approx \frac{\delta c_{100}}{\rho_{20} \xi_{20}}, \quad (5)$$

где  $A(\theta)$  и  $A_1(\theta)$  — значения функций  $A$  при температуре  $\theta$  для сплава и технического алюминия;  $\delta$  — плотность сплава, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  и  $c_{100}$  — удельные теплоемкости сплава при 0 и 100  $^{\circ}\text{C}$ , Дж/(кг·К);  $\rho_0$  и  $\rho_{20}$  — удельные электрические сопротивления сплава при 0 и 20  $^{\circ}\text{C}$ , Ом·м;  $\xi_0$  и  $\xi_{20}$  — параметры сплава АДО

$$\xi_0 = \delta_{\text{Al}} c_{\text{Al}} / \rho_{\text{Al}} = \frac{2710 \cdot 877}{0,269 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 88,35 \cdot 10^{12} \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Ом} \cdot \text{К});$$

$$\xi = \delta_{\text{Al}} c_{\text{Al},100} / \rho_{\text{Al},20} = \frac{2710 \cdot 924}{0,029 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 86,35 \cdot 10^{12} \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Ом} \cdot \text{К}).$$

Согласно выражениям (3) и (5) получим:

$$k_d = \frac{B}{s^2} \xi \frac{\rho_{20}}{\delta c_{100}} \approx A_1(\theta_n) - A_1(\theta_n). \quad (6)$$

Последнее уравнение удобно использовать для расчетов конечной температуры шин из алюминиевых сплавов, для которых не построены кривые  $A(\theta)$ .

В результате расчетов для различных алюминиевых сплавов были определены параметры  $C_T$  минимальных сечений шин по условию термической стойкости

$$C_T = \sqrt{A(\theta_{\text{доп}}) - A(\theta_{\text{д. доп}})},$$

где  $\theta_{\text{доп}} = 200$   $^{\circ}\text{C}$  — допускаемая температура нагрева шин из алюминиевых сплавов при КЗ;  $\theta_{\text{д. доп}} = 70$   $^{\circ}\text{C}$  — начальная температура, равная длительно допускаемой температуре шин по условиям рабочего режима.

Минимальное сечение шин по условию термической стойкости

$$s_T = \frac{\sqrt{k_d B}}{C_T}. \quad (7)$$

Расчетные значения параметров  $C_T$  приведены в табл. 2.

**Пример.** Определить термическую стойкость трубчатых шин с наружным диаметром  $D=70$  мм и внутренним  $d=65$  мм из алюминиевого сплава 1915Т. Действующее значение периодической составляющей тока КЗ  $I_{\text{н0}}=40$  кА; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока  $T_a=0,1$  с; продолжительность КЗ  $t_{\text{откл}}=0,5$  с. Начальная температура шины 70  $^{\circ}\text{C}$ .

В соответствии с [2] интеграл Джоуля

$$B \approx I_{\text{н0}}^2 (t_{\text{откл}} + T_a) = 40^2 (0,5 + 0,1) = 960 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Коэффициент добавочных потерь  $k_d$  для кольцевых шин диаметром 70/65 мм практически равен 1 [3].

Сечение шины

$$s = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 530 \text{ мм}^2.$$

По кривой  $\delta$  (рис. 2) для  $\theta_n=70$   $^{\circ}\text{C}$  находим  $A(\theta_n) = 0,3 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$ . В соответствии с уравнением (3)

$$A(\theta_n) = A(\theta_n) + k_d \frac{B}{s^2} = 0,3 \cdot 10^4 + 1 \cdot 960 \cdot 10^6 / 530^2 =$$

$$= 0,64 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4.$$

Для вычисленного значения  $A(\theta_n)$  по кривой  $\delta$  находим  $\theta_k=149$   $^{\circ}\text{C}$ . Так как  $\theta_k < \theta_{\text{доп}}=200$   $^{\circ}\text{C}$ , шины термически стойки.

Такой же результат получим, если воспользуемся для определения температуры нагрева шин уравнением (6). Для этого предварительно определим по кривой 1 (рис. 2) параметр  $A_1(\theta_n)=0,6 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$ . Согласно уравнению (6)

$$A_1(\theta_n) = A_1(\theta_n) + k_d \frac{B}{s^2} \xi \frac{\rho_{20}}{\delta c_{100}} = 0,6 \cdot 10^4 + 1 \times$$

$$\times \frac{960 \cdot 10^6}{530^2} \cdot 86,35 \cdot 10^{12} \frac{0,0517 \cdot 10^{-6}}{2770 \cdot 880} = 1,23 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4.$$

Затем по кривой 1 находим конечную температуру шин, примерно равную 149  $^{\circ}\text{C}$ .

Минимальное сечение шин из сплава 1915Т по условию термической стойкости согласно выражению (7)

$$s_T = \frac{\sqrt{960 \cdot 10^6}}{68,7} = 451 \text{ мм}^2.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору по режиму короткого замыкания аппаратуры и проводников в электрических установках высокого напряжения. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1944.
2. Руководящие указания по расчету коротких замыканий, выбору и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания. М.: МЭИ, 1975.
3. Электрическая часть станций и подстанций/Под ред. А. А. Васильева. М.: Энергия, 1980.
4. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций. М.: Энергия, 1976.
5. Справочник по алюминиевым сплавам/Под ред. В. И. Елагина. М.: ВИЛС, 1978.
6. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов/Арганов З. И., Балахонов Ф. А., Васова И. Г. и др. М.: Металлургия, 1984.
7. Промышленные алюминиевые сплавы/Алиева С. Г., Альман М. Б., Амбарцумян С. М. и др. М.: Металлургия, 1984.
8. Куарьевцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой о шинки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.

## ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

УДК 621.215.1.004.6

### НЕПОЛНОФАЗНЫЕ РЕЖИМЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Калужный А. А., инж., Левинштейн М. Л., доктор техн. наук  
Сибирский НИИ энергетики

Линии высокого напряжения, питающие дефицитные энергозоны и имеющие слабые шунтирующие связи, должны обладать большей эксплуатационной надежностью, чем обычные линии. Одним из средств повышения эксплуатационной надежности таких линий является осуществление на них длительных неполнофазных режимов.

Основными факторами, ограничивающими величину передаваемых в неполнофазном режиме мощностей, являются токи и напряжения обратной последовательности в генераторах и синхронных двигателях, а также токи нулевой последовательности, вызывающие ложное срабатывание устройств релейной защиты на соседних с неполнофазной линией присоединениях. Влияние токов нулевой последовательности на линии связи существенно не ограничивает величину передаваемой по неполнофазной линии мощности [1]. Это объясняется тем, что вдоль трассы линий ВН и СВН прокладываются кабельные линии связи.

Компенсация токов обратной и нулевой последовательности в примыкающих к неполнофазной линии присоединениях может быть осуществлена при помощи устройств поперечной компенсации реактивной мощности и трансформаторного оборудования, установленных на подстанциях из условий нормального режима.

В работе исследованы компенсации токов обратной последовательности, осуществляемая при помощи шунтирующих реакторов, компенсация токов нулевой последовательности, реализуемая при помощи автотрансформаторов, и показана возможность осуществления неполнофазных режимов на линиях СВН при помощи несложных мероприятий.

Компенсация токов обратной последовательности при помощи шунтирующих реакторов. Для компенсации токов обратной последовательности в примыкающих к неполнофазной линии присоединениях к шинам подстанции этой линии следует подключить дополнительные источники тока обратной последовательности. Векторы этих токов должны быть равны по модулю вектору тока обратной последовательности в неполнофазной линии, а также быть в фазе с указанным током на приемной подстанции и в противофазе на отправной подстанции. При полной компенсации имеют место следующие соотношения

$$i_{\text{к, комп}}^{(2)} = -i_{\text{к}}^{(2)}, \quad i_{\text{н, комп}}^{(2)} = i_{\text{н}}^{(2)}, \quad (1)$$

где  $i_{\text{н}}^{(2)}$ ,  $i_{\text{к}}^{(2)}$  — векторы дополнительных источников тока обратной последовательности соответственно на отправной и приемной подстанциях;  $i_{\text{н}}^{(2)}$ ,  $i_{\text{к}}^{(2)}$  — векторы токов обратной последовательности на отправном и приемном концах неполнофазной линии. При выполнении соотношений (1) составляющие напряжений

обратной последовательности на шинах подстанций неполнофазной линии также равны нулю.

Дополнительные источники тока обратной последовательности можно создать, коммутируя фазы реакторов [2, 3], где переключения фаз ШР не являются оптимальными.

Рассмотрим оптимальное использование ШР для компенсации токов обратной последовательности, которые обусловлены передачей мощности по двум фазам. Предлагаемая компенсация токов обратной последовательности в примыкающих присоединениях осуществляется при помощи реактивных проводимостей, подключаемых к электропередаче по концам неполнофазной линии (рис. 1, а). Если на шинах подстанций неполнофазной линии имеются только составляющие напряжения прямой последовательности  $\dot{U}_n$  и  $\dot{U}_k$  (справедливость этого допущения будет показана ниже), то токи обратной последовательности по концам неполнофазной линии  $i_{\text{н}}^{(2)}$ ,  $i_{\text{к}}^{(2)}$  запишутся следующим образом

$$i_{\text{н}}^{(2)} = \frac{j}{3} (BU_{\text{к}} \cos \delta - AU_{\text{н}} + jBU_{\text{н}} \sin \delta),$$

$$i_{\text{к}}^{(2)} = \frac{j}{3} (AU_{\text{н}} \cos \delta - BU_{\text{к}} + jAU_{\text{н}} \sin \delta), \quad (2)$$

$$j_{\text{к}}^{(2)} = \frac{j}{3} (AU_{\text{н}} \cos \delta - BU_{\text{к}} + jAU_{\text{н}} \sin \delta),$$

где

$$A = \frac{3x_0}{x_1(x_1 + 2x_0)}, \quad B = \frac{3x_0}{x_1(x_1 + 2x_0)} + \frac{b_0 - 4b_1}{3},$$

$$x_1 = Z_c \sin \lambda, \quad x_0 = Z_{c0} \sin \lambda_0, \quad b_1 = \frac{\text{tg } \frac{\lambda}{2}}{Z_c}, \quad b_0 = \frac{\text{tg } \frac{\lambda_0}{2}}{Z_{c0}},$$

$\delta$  — угол между векторами напряжений  $\dot{U}_n$  и  $\dot{U}_k$ .

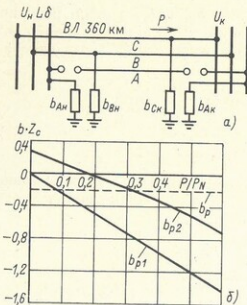
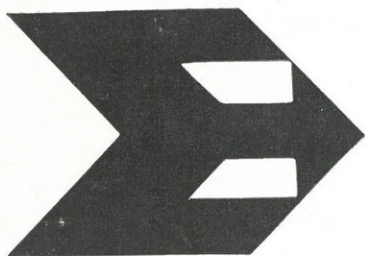
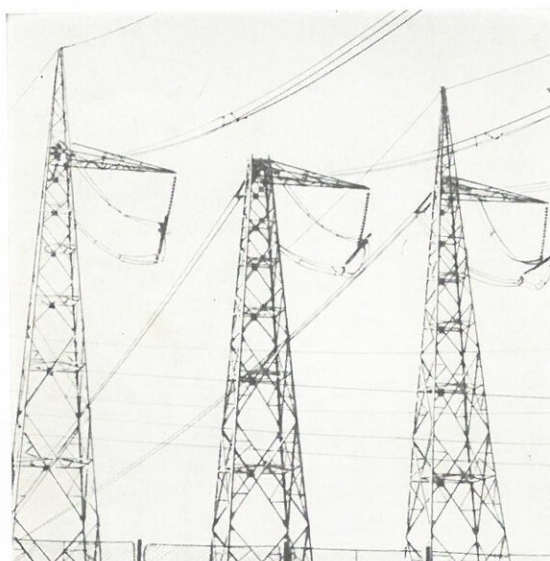


Рис. 1. Компенсация токов обратной последовательности, возникающих в электропередаче при отключении фазы А линии; а — схема участка ВЛ с компенсирующими реакторами; б — зависимости  $b_{p1}$  и  $b_{p2}$  от  $P$ ;  $x_{1п} = 0,302 \text{ Ом}/\text{км}$ ;  $b_{п1} = 3,75 \cdot 10^{-9} \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{км})$ ;  $x_{0п} = 799 \text{ Ом}/\text{км}$ ;  $b_{п2} = 2,13 \times 10^{-8} \text{ 1}/(\text{Ом} \cdot \text{км})$ ;  $Z_c = 283,7 \text{ Ом}$ ;  $Z_{c0} = 541 \text{ Ом}$ ;  $\lambda = 21,96^\circ$ ;  $\lambda_0 = 30,46^\circ$ ;  $U_{\text{ном}} = 500 \text{ кВ}$ ;  $P_N = 883 \text{ МВт}$ ;  $b_p = -\frac{0,184}{Z_c}$

X



# ENERGOIMPEX



- Импорт-экспорт угля, электроэнергии и других носителей энергии
- Поставка машин и оборудования для энергетики НРБ, стран — членов СЭВ и других стран
- Промышленное и торговое кооперирование в области энергетики
- Изыскания
- Проектирование
- Строительство
- Монтаж
- Эксплуатация
- Ремонт в гарантийный и внегарантийный сроки
- Электропроводы до 750 кВ и сети в населенных пунктах
- Подстанции высокого, среднего и низкого напряжений
- Супервайзерская деятельность
- Консультации в области энергетики

**Внешнеторговая организация «ЭНЕРГОИМПЕКС»**  
**Болгария, 1000, София, почтовый ящик 801,**  
**телефон: 518867, телекс: 22669,**  
**телеграммы; Энергоимпекс**  
**В/О «ВНЕШТОРГРЕКЛАМА»**