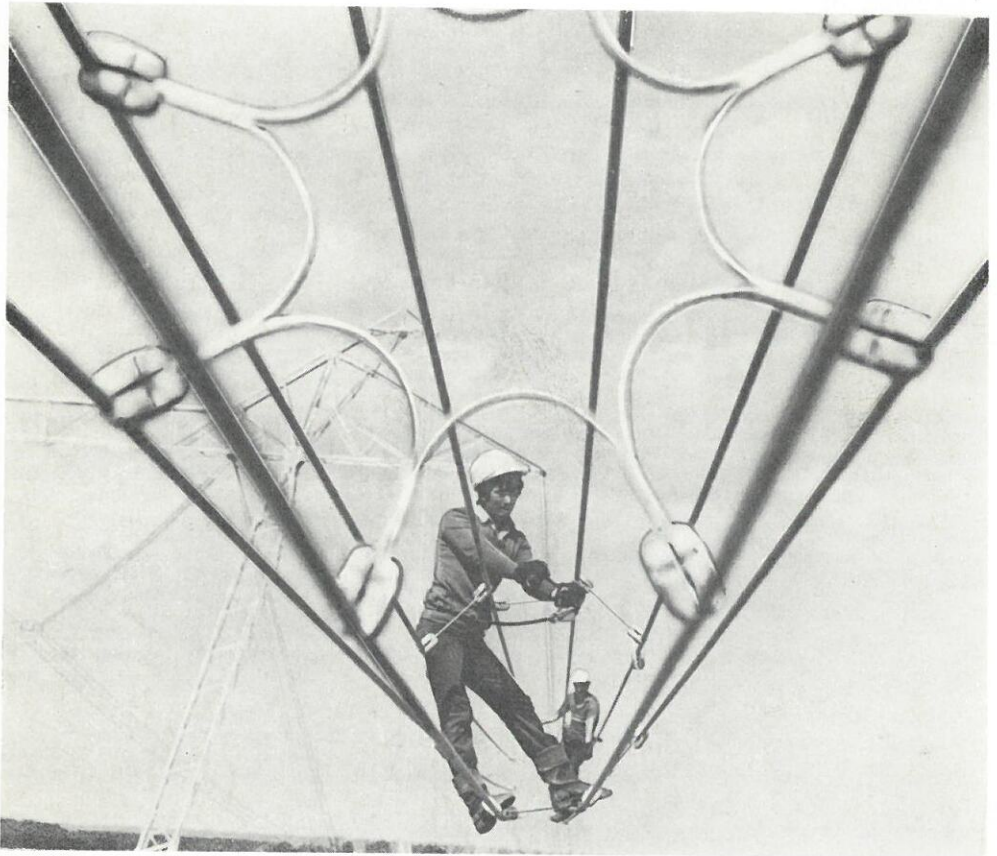




# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
И ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРАВЛЕНИЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА  
Г.М. КРЖИЖАНОВСКОГО

ежемесячный  
производственно-  
технический  
журнал



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1988

4

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Ежемесячный производственно-технический журнал

ИЗДАЕТСЯ  
С 1930 ГОДА

МОСКВА · ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 4

АПРЕЛЬ

1988

## СОДЕРЖАНИЕ

### РЕШЕНИЯ XXVII СЪЕЗДА КПСС — В ЖИЗНЬ!

2 Оганов В. М. Технический прогресс в ПЭО Львовэнерго

### АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

6 Швыряев Ю. В., Федотов Д. К., Деревянкин А. А. Оценка влияния надежности действий оперативного персонала на безопасность работы АЭС

### ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

9 Бреус В. И., Беляков И. И., Голованов Н. В. Исследование температурного режима и циркуляции в экранях малогабаритного котла ТГМЕ-428 с неошипованной камерой горения при работе на газе

12 Салихов А. А. О поддержании уровня в барабанах котлов ТЭС с поперечными связями

15 Соломаха М. А., Мокобоцкий С. И. О надежности гибов паропроводов из стали 12Х1МФ

19 Нахалов В. А., Гецфрид Э. И., Малыгина А. А. Повреждения экранных труб котла в зоне креплений

21 Сапотницкий А. Я., Козлов Е. Г., Рубинсон Я. Г. Прибор для испытания противоразгонной защиты турбины

24 Янков В. С., Хоштария А. Г., Клепинин В. Г. Состояние и перспективы развития тепловых насосов в СССР

26 Кривцов В. В., Козяр Н. Н. Особенности распределения напряженности магнитного поля по длине рабочего канала аппарата противонакипной обработки воды

27 Багаудинов З. С. Воздушные течения в замкнутых объемах главных корпусов ТЭС

30 Корбут В. П. Формирование микроклимата в главных корпусах ТЭС при применении зональных схем организации воздухообмена и теплоиспользования

35 Долин А. П., Бессонов С. А. Расчет длительно допустимых рабочих токов трубчатых шин ЗРУ и ОРУ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

40 Жураховский А. В., Данилюк А. В., Комаров В. И., Павлова Э. И. Применение источников реактивной мощности в Крымэнерго

### ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

43 Егоров Э. А., Масленников К. Н., Новосадов А. А., Капченко В. А., Шевченко А. А., Чмутов Л. П. О повышении надежности турбогенераторов с водомасляным охлаждением ТВМ-500

47 Каспаров Э. А., Фези-Жилинская М. С., Зозулин Ю. В. Динамическая устойчивость турбогенераторов с управляющей поперечной обмоткой на роторе

### ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

54 Карпова Г. И., Кислицкий Б. В., Раневич Б. Н., Шуплецов А. С. Оценка технического состояния стальных конструкций статора гидрогенератора ВГС 700/100-48

### ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

59 Дядищев Б. А., Вакуленко А. А., Шеляженко С. А., Езовит Г. П. Метод безопасного производства работ на ВЛ 110—750 кВ, находящихся под наведенным напряжением

62 Куртенков Г. Е., Казеев В. Г. Исследование характеристик линейных изоляторов, загрязненных уносами сернокислотного завода в условиях пустыни

65 Книжник Р. Г., Шехтман Ш. М. Устройства обработки и присоединения к изолированным проводам расщепленных фаз для каналов высокочастотной связи коротких линий 330 кВ

### КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

68 Кабала Ю. К., Элазян С. С., Лянзберг Е. Л., Минасян К. О. Кабели повышенной негорючести

71 Мирзоев А. Г., Трост Л. Е., Тимонин В. К. Термическая стойкость и условия возгорания силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией

### РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

76 Кутин В. М., Лагутин В. М., Коваль О. П. Устройство для определения групп соединения обмоток трансформатора (УКГ-3)

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ГОРОДОВ

80 Добрушкин Г. А. Оптимизация центров питания систем электроснабжения городов

### ОБМЕН ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОПЫТОМ

83 Канцдалов В. Г., Самойленко В. П., Топорков А. Т. Бесконтактный метод диагностики остаточной деформации ползучести паропроводов

84 Таубес И. Р. Режимы работы релейной защиты при плавке гололеда в сети 110 кВ

86 Цариков А. И. Источники электропитания с фиксированной и плавной регулировкой напряжения от 0,1 до 26 В

86 Левковский А. И., Радченко В. В. Отключение и включение ненагруженного трансформатора горизонтально-поворотным разъединителем РНДЗ-500

### ОТКЛИКИ И ПИСЬМА

87 Мурадян А. Е. По поводу статьи С. Г. Королева, Ф. И. Синьчугова «Нормирование надежности электрических сетей энергосистем и систем электроснабжения потребителей»

### КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

89 Школьник Г. Т. О книге В. Н. Казанского «Системы смазывания паровых турбин»

### ХРОНИКА

90 Островецкий Р. М., Новиков В. В. Донтехэнерго — 40 лет

93 Классон Р. Э. (К 120-летию со дня рождения)

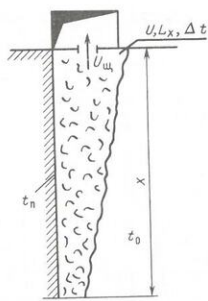


Схема улавливания конвективного потока у вертикальных поверхностей котлоагрегата

$t_{n2}$  — избыточные температуры более и мощного тепловых источников, °С;  $l_1$ ,  $l_2$ , ширина и высота нагретых поверхностей, м; поправочный коэффициент, учитывающий действие конвективных потоков. температура воздуха в верхней части того отделения может быть получена как средняя по расходу для средневысших значений каждой расчетной зоны помещения. Средняя скорость по сечению конвективного потока определяется по формуле

$$v = 0,822 \Delta t_n^{\frac{2}{3}} x^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

— средняя скорость, м/с. При отсутствии взаимодействия на требуемом уровне двух параллельных конвективных потоков вертикальных поверхностей —  $P=1$  и  $Q$ . Тогда формула (1) приобретает вид:

$$\Delta t_n = 0,125 \Delta t_n. \quad (4)$$

Теоретический и экспериментальный анализ потоков свободных и стесненных конвективных потоков у нагретых и охлажденных вертикальных поверхностей показал, что при существовании общей циркуляции воздуха в котельном отделении неизбежно значительное температурное понижение воздуха с увеличением высоты. Учитывая недостатки рассмотренных схем, которые приводят к значительному падению температуры воздуха в котельном отделении в период года и переохлаждению нижней зоны, предложены решения, обеспечивающие снижение температурного расслоения воздуха по высоте за счет создания зональной системы вентиляции с подачей и удалением воздуха на разных уровнях (рис. 2, б). Приточный воздух поступает в котельное отделение на разном уровне: перетоком из машинного отделения в верхнюю зону круглогодично с параметрами наружного воздуха, в нижнюю зону ниже рабочей площадки после соответствующей обработки в теплообменном блоке в зависимости от периода года.

Для повышения температуры дутьевого воздуха и уменьшения запыленности котельного отделения предусматривается забор воздуха на дутье при помощи воздухопроводов равномерного всасывания (кольцевой забор воздуха), расположенных у вертикальных поверхностей котлоагрегатов (рис. 4). Температура и расход удаляемого воздуха принимаются соответственно не более средней температуры и расхода воздуха в конвективных потоках, формулы (1), (2), (4). При расчете воздухопроводов равномерного всасывания необходимо принимать скорость в щели равной средней скорости воздуха в конвективном потоке на уровне всасывания, формула (3).

Удаление избытков воздуха производится естественным путем через вытяжные аэрационные панели (3).

Двухзональная схема организации воздухообмена в главных корпусах ТЭС также исследовалась для холодного периода года на тепловой модели энергоблока 800 МВт (рис. 2, б). Параметры наружного и приточного воздуха в нижнюю зону соответствовали аналогичным исследованиям существующих схем (рис. 2, а). В верхнюю зону приточный воздух поступает без подогрева.

Количество воздуха, подаваемого приточными установками в нижнюю зону  $G_{пр}^{н.з.}$  равно  $3,656 \cdot 10^6$  кг/ч, в верхнюю зону  $G_{пр}^{в.з.} = 0,54 \cdot 10^6$  кг/ч, забираемого дутьевыми вентиляторами  $G_3 = 3,37 \cdot 10^6$  кг/ч, удаляемого через аэрационные проемы  $G_{в.к.} = 0,826 \cdot 10^6$  кг/ч.

Рост температур по высоте котельного отделения, начиная с отметки +15,00, практически отсутствует (рис. 3, б). В нижней зоне средний градиент температур составляет  $0,27$  °С/м. В верхней зоне выше уровня котлоагрегата происходит снижение температуры, что соответствует теоретическим положениям, до  $20-25$  °С по сравнению с  $28-33$  °С для традиционной схемы воздухообмена (рис. 3, а). Средняя температура воздуха в нижней зоне составляет  $14-18$  °С по сравнению с  $10-17$  °С для применяющейся схемы (без учета охлаждения воздуха за счет инфильтрации).

Такое перераспределение температур в котельном отделении (понижение температуры в верхней зоне и повышение в нижней) приводит к уменьшению температурного градиента по высоте и соответственно гравитационного давления. Благодаря этому сокращается инфильтрация наружного холодного воздуха, что приводило к переохлаждению рабочих площадок в нижней зоне.

Применение кольцевых воздухопроводов равномерного всасывания обеспечивает максимальную локализацию загрязненных тепловых потоков в местах их образования, повышение температуры дутьевого воздуха и снижение температуры воздуха верхней зоны и выбрасываемого наружу.

В результате применения двухзональной системы достигается также значительная экономия

тепловых ресурсов за счет уменьшения расходов теплоты на подогрев приточного воздуха и подогрев дутьевого воздуха, улучшаются состояние воздушной среды на рабочих площадках и условия эксплуатации ограждающих конструкций в верхней зоне главного корпуса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корбут В. П. Способы эффективной организации вентиляционных потоков в главных корпусах теплоэлектростанций. В кн.— Улучшение условий труда на теплоэлектростанциях. Киев: Общество «Знание», 1976.
2. Яровой В. Г., Проскуровский Ф. Я. Отопление и вентиляция главного корпуса тепловой электростанции.— Электрические станции, 1975, № 9.
3. Корбут В. П., Дубровский Б. И. Новая конструкция аэрационных панелей. Экспресс-информация. Энергетика и электрификация. Серия: Строительство тепловых электростанций. М.: 1980, вып. 8.
4. Проблемы воздухообмена главных корпусов тепловых электростанций. Романов В. В., Крохалев Б. М., Багаутдин З. С. и др.— Электрические станции, 1984, № 3.
5. Корбут В. П. Конвективные потоки от нагретых вертикальных поверхностей и их взаимодействие.— Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1975, № 3.

УДК 621.311.15.001.24(047)

#### РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ РАБОЧИХ ТОКОВ ТРУБЧАТЫХ ШИН ЗРУ И ОРУ

Долин А. П., канд. техн. наук, Бессонов С. А., инж.

Московский энергетический институт

В настоящее время в токопроводах промышленных предприятий напряжением 10 кВ, в шинных конструкциях ЗРУ и ОРУ 35 кВ и выше, а также других токопроводах широко применяются круглые трубчатые шины. В токопроводах напряжением до 35 кВ шины выполняются из электротехнических алюминиевых сплавов АДЗ1Т, АДЗ1Т1, а также из алюминия марки АД0. Удельное электрическое сопротивление этих материалов составляет  $0,029 \cdot 10^{-6} - 0,035 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Шины ЗРУ и ОРУ 35 кВ и выше изготавливаются из более прочных конструктивных алюминиевых сплавов АВТ1, 1915, 1915Т, реже АМГ5, обладающих, однако, и более высоким удельным электрическим сопротивлением  $0,038 \cdot 10^{-6} - 0,064 \cdot 10^{-6}$  Ом·м (см. далее). Медные шины находят весьма ограниченное применение.

Удельное электрическое сопротивление при 20 °С,  $\rho$  —  $10^{-6}$  Ом·м

Марка сплава	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, $\rho$ — $10^{-6}$ Ом·м	Типичные значения по ГОСТ и ТУ	Типичные значения
АД0	0,029	—	0,029
АДОМ, АД1М	0,029	—	0,029
АДЗ1Т	0,035	—	0,034
АДЗ1Т1	0,0325	—	0,031
АДЗЗТ	—	—	0,043
АДЗЗТ1	—	—	0,04
АВТ	—	—	0,041
АВТ1	—	—	0,038
1915	0,0485—0,0517	—	—

1915Т	0,9485—0,0517	—
1925Т	—	0,064
1925Т1	—	0,059
АМГ4М	—	0,061
АМГ5М	—	0,059

Примечание. Источник ГОСТ 15 176-84, [4], [5].

В рабочих режимах температура нагрева шин  $\theta$  не должна превышать допустимого значения  $\theta_{доп}$ . В соответствии с ГОСТ 8024-84 [1] длительно допустимая температура шин устанавливается равной  $120$  °С, разъемных контактных соединений —  $90-120$  °С, нормированное значение температуры окружающего воздуха  $\theta_0$  составляет  $35-40$  °С. Следует отметить, что в ПУЭ  $\theta_{доп}$  устанавливается равной  $70$  °С, а температура окружающего воздуха принимается  $25$  °С. Опыт эксплуатации ошинок, экспериментальные исследования подтверждают успешную работоспособность шин при температуре до  $120$  °С и нормированных температурах контактных соединений.

Наибольший рабочий ток  $I_{раб.иб}$  при котором выполняется условие  $\theta \leq \theta_{доп}$ , называется длительно допустимым током  $I_{доп}$ . Таким образом, работоспособность шин по условиям нагрева в рабочем режиме определяется неравенством

$$I_{раб.иб} \leq I_{доп}. \quad (1)$$

Допустимые рабочие токи, как правило, определяются в результате испытаний. Однако провести испытания шин всех профилей, изготовленных из различных материалов, при температурах окружающего воздуха, характерных для различных климатических зон, весьма трудоемкая задача. Кроме того, испытания обычно проводятся в закрытых помещениях, условия в которых не адекватны условиям работы шин ОРУ. Далее рассматривается методика расчета нагрузочной способности трубчатых шин ЗРУ и ОРУ, обсуждается влияние на допустимый ток шин удельного электрического сопротивления материала, скорости и направления ветра, солнечной радиации, температуры окружающей среды и других факторов.

Уравнение теплового баланса шин записывается в виде

$$I^2 r_{ш} + Q_c = Q_k + Q_{изл}, \quad (2)$$

где  $I$  — рабочий ток, А;  $r_{ш}$  — активное сопротивление шины при температуре  $\theta$ , Ом;  $Q_c$  — энергия, поглощаемая шиной при солнечной радиации, Вт;  $Q_k$  и  $Q_{изл}$  — тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением (лучеиспусканием), Вт.

Уравнение (2) применимо в установившемся режиме к однородным длинным проводникам, если влияние концов шин пренебрежительно мало. Таким образом, температура шин по длине постоянна, а теплообмен происходит только с их поверхности. В соответствии с уравнением (2) допу-

рабочий ток, А, вычисляется по формуле

$$I = \frac{Q_{\text{эл}} - Q_{\text{с}}}{r_{\text{ф}}} \quad (3)$$

где  $Q_{\text{эл}}$  — тепловые потоки и сопротивление опрени при температуре  $\theta$  равной допустимой температуре шины  $\theta_{\text{доп}}$ .

Удельное сопротивление шины, Ом, на один метр, равно

$$r_{\text{ф}} \approx k_{\text{а}} k_{\text{с}} \frac{\rho_{\text{с}}}{S} [1 + \alpha_{\text{с}}(\theta - \theta_0)] \quad (4)$$

— коэффициент поверхностного эффекта, коэффициент близости,  $r_{\text{ф}}$  — сопротивление токовому току при температуре  $\theta$ ;  $\rho_{\text{с}}$  — удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре  $\theta_0$ ;  $S$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{с}}$  — температурный коэффициент электрического сопротивления в интервале температур от  $\theta_0$  до  $\theta_{\text{доп}}$ , 1/°C.

Коэффициент поверхностного эффекта определяется по кривым, приведенным, например, в [2], приближенно по формуле [3]

$$+ 3,3 \cdot 10^{-10} \left(\frac{t}{D r_{\text{ф}}}\right)^2 \quad (5)$$

где  $t$  — внешний диаметр и толщина стенки м.

Коэффициент поверхностного эффекта трубчатых шин, применяемых в настоящее время, как  $\theta_0$ , составляет 1,00—1,15. Для принятых яний между фазами токопроводов напряжением 10 кВ и выше, а также между проводом и составных шин из нескольких труб в РУ напряжением 330 кВ коэффициент близости практически равен 1. Удельное электрическое сопротивление  $\rho_{\text{с}}$ , как правило, определяется при температуре  $\theta_0$ , равной 20 °C. Удельные сопротивления алюминиевых сплавов существенно зависят от степени легирования сплава и состояния поверхности (которая указывается в буквенно-цифровой маркировке: М — отожженные; Т — закаленные; е — естественно состаренные; Т1 — закаленные (условно состаренные)). Кроме того, сопротивление образцов одной марки сплава может разниться в связи с незначительными (допустимыми) изменениями технологии производства полуизготовителей и их химического состава. Поэтому приведенные в технических условиях и ГОСТ на верхние значения  $\rho_{\text{с}}$  отличаются от фактических значений электрических сопротивлений, которые являются математическими ожиданиями совокупности образцов, изготовленных из сплавов разного состава в пределах марки по данной технологии.

Удельные коэффициенты теплового сопротивления алюминия в интервале температур 0—100 °C равны 0,004 1/°C, а его значения лежат в пределах 0,0036—0,0044 1/°C. Как коэффициенты  $\alpha_{\text{с}}$  сплавов отличаются друг от друга, в инженерных расчетах их можно считать одинаковыми равными 0,004 1/°C.

Тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением, составляют

$$Q_{\text{к}} = F_{\text{к}} q_{\text{к}}; Q_{\text{л}} = F_{\text{л}} q_{\text{л}} \quad (6)$$

где  $q_{\text{к}}$  и  $q_{\text{л}}$  — плотности теплового потока (удельные теплоотдачи) конвекцией и излучением, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{\text{к}} = F_{\text{л}} = \pi D$  — конвектирующие и излучающие поверхности шин (на 1 м длины).

Удельная теплоотдача конвекцией определяется как

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \Delta \theta = \frac{N_{\text{к}} \lambda_{\text{в}}}{D} \Delta \theta \quad (7)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  — коэффициент теплоотдачи при конвекции, Вт·°C/м<sup>2</sup>;  $\Delta \theta$  — перепад температур между шиной и воздухом, °C;  $\lambda_{\text{в}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);  $N_{\text{к}}$  — число Нуссельта — которое для газов является критерияльной зависимостью вида  $Nu = f(Gr, Re)$ ; здесь  $Gr$  — число Грасгофа;  $Re$  — число Рейнольдса, равные

$$Gr = g \beta_{\text{в}} \Delta \theta \frac{D^3}{\nu^2}; Re = \frac{VD}{\nu} \quad (8)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta_{\text{в}}$  — температурный коэффициент объемного расширения воздуха, примерно равный  $1/T_{\text{в}}$ ; где  $T_{\text{в}} = 273 + \theta_{\text{в}}$  — термодинамическая температура воздуха, К;  $\nu$  — кинетический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $V$  — скорость ветра, м/с.

Внутри помещений (в ЗРУ) теплоотдача  $q_{\text{к}}$  в основном, определяется свободной конвекцией ( $Re=0$ ). В области чисел Грасгофа  $1,4 \cdot 10^3 \leq Gr \leq 1,4 \cdot 10^8$  характерных для жестких трубчатых шин число Нуссельта составляет [6, 7]

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25} \quad (9)$$

В соответствии с уравнениями (7) — (9) тепловой поток конвекцией в ЗРУ на один метр длины равен

$$Q_{\text{к}} = C_{\text{к}} D^{0,75} \quad (10)$$

где

$$C_{\text{к}} = \pi \cdot 0,46 \cdot \lambda_{\text{в}} \left(\frac{g}{T_{\text{в}} \nu^2}\right)^{0,25} \Delta \theta^{1,25} \quad (11)$$

Значения параметра  $C_{\text{к}}$ , при различных расчетных температурах воздуха  $\theta_{\text{в}}$  (соответствующих значениям теплопроводности  $\lambda_{\text{в}}$  и кинетической вязкости  $\nu$ ) и перепадах температур  $\Delta \theta$  приведены в таблицу.

Вне помещения (в ОРУ) теплоотдача  $q_{\text{к}}$  в основном определяется вынужденной конвекцией. Без учета свободной конвекции число Нуссельта определяется по формулам [6, 7]

$$Nu = \begin{cases} 0,437 Re^{0,5}, & \text{при } 5 < Re \leq 10^3 \\ 0,218 Re^{0,6}, & \text{при } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,0201 Re^{0,7}, & \text{при } 3 \cdot 10^5 \leq Re < 2 \cdot 10^6. \end{cases} \quad (12)$$

Если ветер направлен под углом к шине меньше  $\pi/2$ , конвективная теплоотдача снижается.

Параметр С	Условия эксплуатации	Значения параметров С при			
		$\theta_{\text{в}} = 25^\circ \text{C}$ $\theta_{\text{доп}} = 70^\circ \text{C}$	$\theta_{\text{в}} = 40^\circ \text{C}$ и $\theta_{\text{доп}}$ равных		
			90	110	120
$C_{\text{к}}$	ЗРУ ОРУ (штыль)	478 713	542 818	825 1266	975 1506
$C_{\text{л}}$	ЗРУ и ОРУ	1061	1383	2047	2539

а коэффициент теплоотдачи примерно равен [6].

$$\alpha_{\text{к}} \psi \approx \alpha_{\text{к}} (1 - 0,54 \cos^2 \psi) \quad (13)$$

где  $\psi$  — угол атаки (угол между направлением ветра и осью шины);  $\alpha_{\text{к}}$  — коэффициент теплоотдачи при угле  $\psi = \pi/2$ . Выражение (13) справедливо при углах  $\psi$  от 30—90° [6]. При углах атаки меньше 30° погрешность результата незначительно возрастает.

Наиболее тяжелые условия работы шин ОРУ возникают при малых скоростях ветра, т. е. при числах Рейнольдса, близких к 0. В литературе экспериментальных данных о значении числа  $Nu$  при свободновынужденном движении теплоносителя не приводятся. Для практических расчетов удельной теплоотдачи при штыле можно воспользоваться данными для проводов [8], которые приводятся к виду

$$q_{\text{к}} = 1,61 \Delta \theta^{0,3} D^{-0,25} \quad (14)$$

Экспериментальные исследования [8] показывают, что даже при полном штыле ( $V=0$ ) конвективный теплообмен проводников в ОРУ остается выше, чем в ЗРУ (при свободной конвекции), так как вне помещения всегда имеется слабое движение воздуха, которое трудно зарегистрировать обычными приборами.

В соответствии с выражениями (8) и (14) тепловой поток шин ОРУ при штыле определяется по формуле (10), в которой

$$C_{\text{к}} = 1,61 \pi \Delta \theta^{0,3} \quad (15)$$

Теплоотдача излучением в соответствии с уравнением Стефана — Больцмана, равна

$$q_{\text{л}} = \epsilon C_0 \left[ \left(\frac{T_{\text{ш}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4 \right] \quad (16)$$

где  $\epsilon$  — степень черноты поверхности шины,  $C_0 = 5,67$  — излучающая способность абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{ш}} = 273 + \theta_{\text{ш}}$  — термодинамическая температура шины, К;  $T_{\text{в}} = 273 + \theta_{\text{в}}$  — термодинамическая температура воздуха, К.

Для инженерных расчетов тепловой поток излучением согласно (8), (6), (16) удобно записать в виде

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{л}} \epsilon D, \quad (17)$$

где

$$C_{\text{л}} = C_0 \pi \left[ \left(\frac{T_{\text{ш}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4 \right]$$

Энергия, поглощаемая шиной при солнечной радиации (на единицу длины), равна

$$Q_{\text{с}} = a_{\text{с}} q_{\text{с}} D, \quad (18)$$

где  $a_{\text{с}}$  — коэффициент поглощения солнечной радиации;  $q_{\text{с}}$  — интенсивность радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Коэффициенты  $\epsilon$  и  $a_{\text{с}}$  зависят от материала шин, состояния их поверхности. Они существенно изменяются при окраске шин эмальными, масляными и другими красками. При этом степень черноты почти не зависит от цвета, в отличие от коэффициента поглощения солнечной радиации (см. далее).

Материал	$\epsilon$	$a_{\text{с}}$
Алюминий и его сплавы:		
полированный	0,04—0,06	0,15—0,26
шероховатый	0,05—0,1	0,25—0,52
окисленный	0,11—0,19	0,3—0,6
Эмаль белая	0,6—0,8	0,3
Масляная краска:		
белая	0,8—0,8	0,3
желтая	0,8—0,9	0,44
зеленая	0,9—0,92	0,61—0,7
красная	0,8—0,9	0,63
черная	0,9—0,98	0,9—0,98

При толщине слоя эмали или краски более 40—50 мкм значения  $\epsilon$  и  $a_{\text{с}}$  практически не зависят от материала основы и равны коэффициентам излучения и поглощения покрытия шины [9].

Интенсивность солнечной радиации  $q_{\text{с}}$  зависит от широты местности, времени года, суток, состояния атмосферы. Наибольшие значения  $q_{\text{с}}$  на территории страны достигают 900—950 Вт/м<sup>2</sup>.

Для удобства определения длительно допустимых токов круглых цилиндрических шин численные значения параметров  $C_{\text{к}}$  и  $C_{\text{л}}$  при допустимых температурах нагрева 70, 90, 110 и 120 °C и температурах воздуха 25 и 40 °C приведены ранее.

В соответствии с разработанной методикой расчета были проведены вычисления на ЭВМ допустимых рабочих токов не окрашенных и окрашенных эмалью и красками трубчатых шин из различных алюминиевых сплавов, внутри и вне помещений, при различной температуре воздуха и перепадах температур, с учетом и без учета солнечной радиации. В результате были построены кривые зависимости  $I_{\text{доп}}$  от диаметра шин при различной толщине стенки, удобные для практического использования. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены кривые допустимых токов шин из сплава 1915Т, соответствующие для окрашенных шин ЗРУ при  $\theta_{\text{в}} = 25^\circ \text{C}$ ,  $\theta_{\text{доп}} = 70^\circ \text{C}$  и неокрашенных шин ОРУ при штыле ( $V=0$ ) с учетом солнечной радиации при  $\theta_{\text{в}} = 40^\circ \text{C}$ ,  $\theta_{\text{доп}} = 120^\circ \text{C}$ . В расчетах степень черноты  $\epsilon$  для окрашенных шин принята 0,6, неокрашенных — 0,11, удельное электрическое сопротивление  $\rho_{\text{с}} = 0,0517 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, коэффициент поглощения  $a_{\text{с}} = 0,6$ , интенсивность солнечной радиации  $q_{\text{с}} = 900$  Вт/м<sup>2</sup>.

Кривые допустимых токов (рис. 1 и 2) можно использовать для практических оценок работоспо-

и температурах воздуха от 0 до +45 °С показали, что погрешность приближенной формулы (20) не превышает 10 %, а в интервале температур воздуха 25—40 °С составляет менее 1 %. Вместе с тем для шин ОРУ при интенсивной солнечной радиации погрешность расчета  $I_{доп2}$  по (20) значительно выше. Так, при штиле ( $V=0$ ),  $q_c = 900 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\vartheta_{доп1} = 70 \text{ °С}$ ,  $\vartheta_{в1} = 25 \text{ °С}$ ,  $\vartheta_{доп2} = 120 \text{ °С}$ ,  $\vartheta_{в2} = 40 \text{ °С}$  она достигает 13—15 %.

Результаты расчетов длительно допустимых токов шин ЗРУ и ОРУ при различном состоянии их поверхности, допустимой температуре, атмосферных условиях показал следующее. Окраска шин эмалью позволяет увеличить  $I_{доп}$  на 20—25 %. На рис. 3 для трубчатых шин с толщиной стенки 10 мм из алюминиевого сплава 1915Т приведены зависимости допустимого тока от диаметра при  $\vartheta_{доп} = 120 \text{ °С}$  и  $\vartheta_{в} = 40 \text{ °С}$ . Сплошные кривые 1 и 4 на рис. 3 построены для окрашенных шин ОРУ с учетом солнечной радиации при скоростях ветра соответственно 5 и 0 м/с, а 5 — для шин ЗРУ; пунктирные кривые 3 и 7 — для неокрашенных шин ОРУ с учетом радиации при тех же скоростях ветра, а 8 — для шин ЗРУ; штрихпунктирные кривые 2 и 6 — для неокрашенных шин ОРУ без учета солнечной радиации. Состав краски влияет на интенсивность охлаждения и величину допустимого тока. Предпочтением следует отдавать окраске шин эмалью, а также масляными красками; использование алюминиевых красок нецелесообразно. В ОРУ под действием солнечной радиации шины, окрашенные разными цветами, нагреваются неодинаково: желтые — меньше, красные — больше. Здесь оправдана окраска шин белой эмалью (имеющей наименьший коэффициент поглощения).

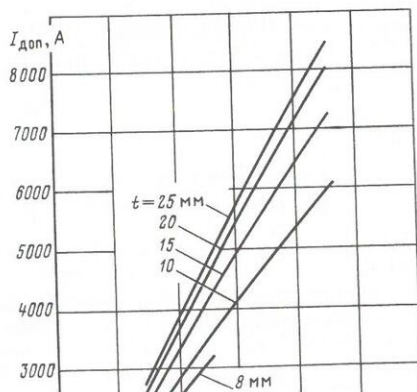


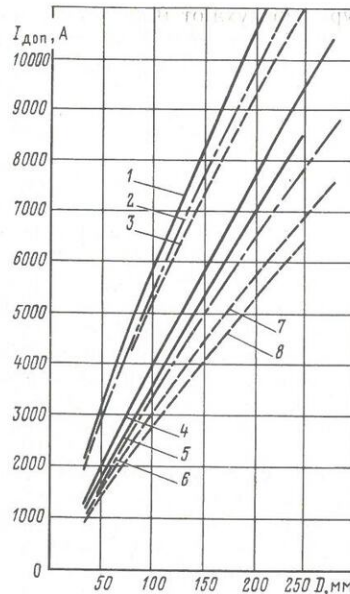
Рис. 3. Кривые зависимости длительно допустимого тока от внешнего диаметра трубчатых шин с толщиной стенки 10 мм из алюминиевого сплава 1915Т при  $\vartheta_{доп} = 120 \text{ °С}$  и  $\vartheta_{в} = 40 \text{ °С}$

ния). Для маркировки фаз на шины могут быть нанесены узкие цветные поперечные полосы.

Допустимый ток окрашенных шин в ОРУ (при штиле,  $\vartheta_{доп} = 70 \text{ °С}$ ,  $\vartheta_{в} = 25 \text{ °С}$  и  $q_c = 900 \text{ Вт/м}^2$ ) незначительно (на 8—10 %) больше тока шин ЗРУ, а неокрашенных шин наоборот на 5—15 % меньше. Однако при  $\vartheta_{доп} = 120 \text{ °С}$ ,  $\vartheta_{в} = 40 \text{ °С}$ , штиле солнечной радиации допустимый ток неокрашенных шин в ОРУ больше, чем в ЗРУ, на 7—9 % (см. кривые 4 и 5 на рис. 3).

При солнечной радиации допустимый ток уменьшается примерно на 14—20 % (см. кривые 2 и 3, 6 и 7). Однако в период максимума нагрузки (обычно в 16—18 ч) интенсивность радиации  $q_c$  снижается, а в зимний период в эти часы становится близкой к нулю.

Скорость и направление ветра существенно влияют на охлаждение шины. Так, допустимые токи окрашенных и неокрашенных шин при ско-



рости ветра, направленной перпендикулярно шине, 5 м/с (кривые 1—3) примерно на 30—40 % больше токов этих шин при штиле (кривые 4, 6 и 7). Если ветер направлен вдоль шины, допустимый ток снижается примерно на 20 %.

## Вывод

Принимая во внимание разницу между максимальными температурами воздуха, а также наибольшими значениями нагрузок в зимний и летний периоды, при проектировании ОРУ проверку шин по допустимому рабочему току целесообразно проводить для двух режимов работы: во-первых, в период прохождения зимнего максимума нагрузки при наибольшей ожидаемой температуре воздуха, штиле и отсутствии солнечной радиации; во-вторых, в период прохождения летнего максимума нагрузки при наибольшей ожидаемой температуре воздуха, штиле, при солнечной радиации в часы прохождения максимума нагрузки. Некоторые уточнения расчетных условий можно получить на основе статистического подхода, предложенного, например в [8].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8024-84 Аппараты и электрические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В (норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний). Госстандарт СССР.
2. Электрическая часть станций и подстанций. Под ред. А. А. Васильева. М.: Энергия, 1980.
3. Залесский А. М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. М.: Энергия, 1967.
4. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд. / Алиева С. Г., Альтман М. Б., Амбарцумян С. М. и др. М.: Металлургия, 1984.
5. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Справ. изд. / Арганова З. Н., Балахонцев Г. А., Басова И. Г. и др. М.: Металлургия, 1984.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.
7. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
8. Бургдорф В. В., Никитина Л. Г. Нагрев проводов, их термическая стойкость и повышение передаваемой мощности по линиям электропередачи. В кн.: Воздушные линии электропередачи. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-80). М.: Энергоиздат, 1982.
9. Хан В. А. Влияние толщины лакокрасочного покрытия на его радиационные характеристики.— Гелиотехника, 1986, № 1.
10. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1970.

