

---

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ  
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

---



**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**  
**ОАО «ФСК ЕЭС»**

**СТО**  
**56947007-29.060.10.006-2008**

---

**Методические указания по расчету и испытаниям  
жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ**

**Дата введения - 2007-06-25**

Издание официальное

ОАО «ФСК ЕЭС»

2007

## **Предисловие**

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения стандарта организации - ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».

### **Сведения о стандарте**

1 РАЗРАБОТАН: ООО Научно – производственное объединение «Техносервис-Электро»

2. ИСПОЛНИТЕЛИ: А. П. Долин; Е. П. Кудрявцев; М. А. Козина

3. ВНЕСЕН: Департаментом текущего планирования технического обслуживания, ремонтов и диагностики оборудования, Дирекцией технического регулирования и экологии ОАО «ФСК ЕЭС»

4. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ: приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 25.06.2007 № 176

5. ВВЕДЕН: ВПЕРВЫЕ

## Содержание

Введение .....	4
Область применения .....	4
Нормативные ссылки.....	4
Обозначения и сокращения.....	5
<b>1 Выбор изоляции шинных конструкций, проверка шин по условиям короны, допустимым температурным удлинениям, нагревам шин в рабочем режиме и при КЗ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Выбор изоляторов .....	9
1.2 Выбор изоляционных расстояний .....	9
1.3 Проверка шин по условиям короны .....	11
1.4 Проверка элементов ошиновки по допустимым температурным деформациям шин .....	12
1.5 Выбор шин по нагреву в рабочих режимах .....	13
1.6 Термическая стойкость шин.....	21
<b>2 Расчет шинных конструкций на прочность .....</b>	<b>23</b>
2.1 Проверка шин по допустимым прогибам от собственного веса.....	23
2.2 Внешние нагрузки и условия прочности изоляторов и шин.....	25
2.3 Расчет на прочность от статических нагрузок (собственного веса шины, веса гололеда и ответвлений) .....	30
2.4 Особенности расчетов жесткой ошиновки на стойкость при воздействии динамических нагрузок.....	35
2.5 Расчет на ветровую стойкость.....	40
2.6 Проверка жесткой ошиновки на ветровой резонанс .....	45
<b>3 Электродинамическая стойкость шинных конструкций .....</b>	<b>47</b>
3.1 Расчет электродинамических нагрузок .....	47
3.2 Расчет на электродинамическую стойкость конструкций с параллельными шинами, расположенными в одной плоскости .....	49
3.3 Расчет электродинамической стойкости конструкций с параллельными шинами, расположенными по вершинам треугольника, а также шинных конструкций с поворотами и ответвлениями. ....	52
<b>4 Методика испытаний элементов жесткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ на воздействие различных эксплуатационных факторов.....</b>	<b>53</b>
4.1 Общие положения .....	53
4.2 Внешний осмотр .....	54
4.3 Испытание на нагрев номинальным током .....	54
4.4 Испытание относительного сопротивления электрического контакта болтовых и опрессованных зажимов.....	55
4.5 Проверка прочности заделки проводов.....	56
4.6 Проверка узла свободного крепления шины.....	57
4.7 Проверка максимального прогиба шины .....	57
4.8 Проверка качества сварных соединений .....	57
4.9 Проверка прочности сварных соединений .....	58
4.10 Испытания на термическую и электродинамическую стойкость.....	58
4.11 Испытание на стойкость к воздействию климатических факторов.....	60
4.12 Испытание на сейсмоустойчивость .....	61
4.13 Испытание ошиновки на радиопомехи и корону .....	62
4.14 Испытание на прочность при гололеде .....	62
4.14 Проверка шин на ветровую стойкость и отстройку от ветровых резонансов.....	62
4.16 Испытание на прочность при транспортировании.....	64

## **Введение**

### **Область применения**

Стандарт организации составлен на основе исследований, результатов испытаний, опыта проектирования и эксплуатации жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ напряжением 110 кВ и выше.

Стандарт распространяется на жесткую ошиновку ОРУ и ЗРУ, выполненную трубами, закрепленными на опорных изоляторах, оборудовании и других жестких или упругоподатливых опорах.

Стандарт следует применять проектным организациям, заводам-изготовителям, испытательным центрам, а также эксплуатационным и монтажным предприятиям.

### **Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:  
Правила устройства электроустановок. – 7-е изд.

Правила устройства электроустановок. – 6-е изд.

ГОСТ 10434-82. Сварные контактные электрические. Классификация. Общие технические требования

ГОСТ 14782-86. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.

ГОСТ 16962.1-89. Изделия электротехнические. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам

ГОСТ 16962.2-90. Изделия электротехнические. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний.

ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 18482-79. Трубы прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.

ГОСТ Р 50254 – 92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания.

ГОСТ Р 51155-98. Арматура линейная. Правила приемки и методы испытаний

ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств

ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.

СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия

СНиП 23-01-99. Строительная климатология

РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования

## Обозначения и сокращения

$A_{\phi-з}$  - наименьшие допустимые расстояния между токоведущими частями и заземленными частями, м;

$A_{\phi-\phi}$  - наименьшие допустимые расстояния между токоведущими элементами, м;

$a_c$  – коэффициент поглощения солнечной радиации;

$A$  – расстояние между фазами (между осями шин), м;

$a_{\phi-з1}$  - наименьшее расстояние в свету между токоведущими и заземленными элементами, м;

$a_{\phi-\phi1}$  - наименьшее расстояние в свету между токоведущими частями разных фаз, м;

$a_{\phi-з,0}$  – расстояние в свету между ошиновкой и заземленными элементами без учета внешних воздействий, м;

$a_{\phi-з2}$  - наименьшее расстояние в свету между токоведущими частями и заземленным оборудованием после отключения КЗ, м;

$a_{\phi-\phi2}$  - наименьшее расстояние в свету между фазами после отключения КЗ, м;

$b_p$  – расчетная толщина стенки гололеда, мм;

$b_r$  – нормированная толщина стенки гололеда на высоте 10 м над поверхностью земли, мм;

$B$  - толщина стенки шины, м;

$B$  - коэффициент пропорциональный жесткости шины;

$B_k$  -интеграл Джоуля;

$C_1$  и  $c_2$  - жесткость верхнего и нижнего элемента, Н/м;

$c_{из}$  – жесткость одного изолятора, Н/м;

$c_0 = 5,67$  – излучающая способность абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$c_{хиз}$  – коэффициент лобового сопротивления изолятора,

$c_{оп}$  - жесткость опоры, Н/м;

$c_{ш}$  – жесткость шины, Н/м;

$c_x$  – аэродинамический коэффициент (нормативный коэффициент лобового сопротивления),

$c_{yo}$  - коэффициент аэродинамических нагрузок (коэффициент подъемной силы),

$d_{из}$  – характерный размер, равный среднему арифметическому наибольшего и наименьшего диаметра фарфорового тела изоляторов (опоры), м;

$D_{эк}$  – эквивалентный диаметр шины, м;

$D$  - внешний диаметр шин, м;

$D_n (D_i, D_1, D_2)$  – функции, зависящие от угла включения тока КЗ;

$D_{доп}$  - минимально допустимый диаметр шин, м;

$D$  –внутренний диаметр шины, мм;

$E_{max}$  – максимальная напряженность электрического поля на поверхности шин при среднем эксплуатационном напряжении;

$E_0$  – начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда;

$E$  - модуль упругости материала шины, Па;

$F_k$  - конвектирующая поверхность трубчатых шин (на 1 м длины);

$F_{л}$  - излучающая поверхность трубчатых шин (на 1 м длины);

$F_x$  – нагрузка на изоляторы по оси  $x$ , которая является функцией времени  $t$ , Н;

$F_y$  – нагрузка на изоляторы по оси  $y$ , которая является функцией времени  $t$ , Н;

$F_{x,max}$  – максимальная (по модулю) нагрузка на изолятор по оси  $x$ , Н;

$F_{y,max}$  – максимальная (по модулю) нагрузка на изолятор по оси  $y$ , Н;

$F_{max}$  - максимальная расчетная сила (нагрузка) на изоляторы, Н;

$F_{доп}$  - допустимая сила (нагрузка) на изоляторы, Н;

$F_{разр.}$  - минимальная разрушающая нагрузка одного изолятора (опоры), Н;

$F_{разр,\Sigma}$  – суммарное разрушающее усилие спаренных изоляторов (опор), Н;

$F_{max}$  – нагрузка, действующая на опоры (изоляторы) при ветре, Н;

$f_{оп}$  – первая (основная) частота собственных колебаний опоры  
(парциальная частота опоры), Гц;

$f_1$  – первая частота собственных колебаний шины (шинной конструкции), Гц;

$f_{1y}$  - первая (основная) частота собственных колебаний шины в вертикальной плоскости, Гц;

$G = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$Gr$  – число Грасгофа;

$H$  – расстояние от опасного сечения изолятора соответственно до центра тяжести поперечного сечения шины, м;

$H_1$  и  $h_2$  – высота верхнего и нижнего элемента, м;

$H_{ц.т.оп}$  – расстояние от основания опоры соответственно до центра тяжести опоры, м;

$H_{ц.т.ш.}$  – расстояние от основания опоры соответственно до центра тяжести шины, м;

$H_i$  - расстояние от основания опоры до центра тяжести  $i$ -ого элемента, м;

$H$  – расстояние от опасного сечения изолятора до его вершины, м;

$H_{оп}$  – высота изоляционной опоры, м;

$I_{раб. нб}$  - наибольший рабочий ток, А (кА);

$I_{доп}$  - допустимый ток шины, А;

$I_{доп1915}$  – допустимый ток шины из сплава 1915, А;

$I_{п0}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени, кА;

$I_{доп}$  – длительно допустимый рабочий ток, А;

$I_m$  – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А (кА);

$i_{уд}$  - ударный ток трехфазного КЗ, кА;

$i_{дин}$  – ток электродинамической стойкости, А (кА);

$I_{ном ОРУ}$  – номинальный ток шин в ОРУ, А;

$I_{ном ЗРУ}$  - номинальный ток в ЗРУ, А;

$k_d$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра шины;

$k$  – коэффициент эффективности использования длины пути утечки изолятора или изоляционной конструкции;

$k_{\text{п}}$  – коэффициент поверхностного эффекта;  
 $K_w$  – коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра (ветрового давления) по высоте;  
 $k_1$  и  $k_2$  - коэффициенты, определяющие область скоростей ветра при устойчивых резонансных колебаниях;  
 $L$  - длина неразрезного отрезка при минимальной  $v_{\text{min}}$  и максимальной  $v_{\text{max}}$  температурах шины;  
 $L_{\text{ут}}$  - длина пути утечки изолятора, см;  
 $L_0$  - начальная (монтажная) длина шины при температуре  $v_0$ ;  
 $L_{\text{доп max}}$  - максимальная допустимая длины неразрезного отрезка шины, м;  
 $L_{\text{доп min}}$  - минимальная допустимая длина неразрезного отрезка шины, м;  
 $L_0$  – длина шины между опорами, м;  
 $L$  – длина пролета шины, м;  
 $m$  - масса шины на единицу длины, кг/м;  
 $m_{\text{г}}$  – масса гололедных отложений на единицу длины шины, кг/м;  
 $M$  – изгибающий момент;  
 $M$  – масса опоры, кг;  
 $M_{\text{оп}}$  – приведенная масса опоры, кг;  
 $M_i$  – масса  $i$ -ого элемента (яруса) опоры, кг;  
 $Nu$  - число Нуссельта;  
 $P$  - сила тяжести ответвления, Н;  
 $Q_{\text{к}}$  – тепловой поток, обусловленный конвекцией, Вт;  
 $Q_{\text{л}}$  - тепловой поток, обусловленный излучением (лучеиспусканием) , Вт;  
 $Q_{\text{с}}$  –тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации, Вт;  
 $q_{\text{к}}$  - плотность теплового потока (удельная теплоотдача) конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_{\text{л}}$  - плотность теплового потока (удельная теплоотдача) излучением, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_{\text{с}}$  - интенсивность радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $R$  – сопротивление шины постоянному току, Ом/м, при температуре  $v_{\text{доп}}$  ;  
 $R_a$  – активное сопротивление шины при температуре  $v$ , Ом;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $R_{1x(y)}$  – параметр первой частоты собственных колебаний шины в соответствующей плоскости;  
 $R_1$ – параметр первой частоты собственных колебаний шины;  
 $S$  – площадь поперечного сечения шины, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>);  
 $S$  – номинальное сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  
 $S_{\text{т}}$  – минимальное сечение шины по условию термической стойкости, мм<sup>2</sup>;  
 $Sh \approx 0,2$  – число Струхала;  
 $T_{\text{в}} = v_{\text{в}} + 273$  – термодинамическая температура воздуха, К;  
 $T = v + 273$  – термодинамическая температура шины, К;  
 $T_a$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с;  
 $t_{\text{откл}}$  – время отключения КЗ, с;  
 $t_3$  - времени действия основной токовой защиты, с;  
 $t_{\text{п.в}}$  - полного времени отключения цепи выключателем (включая время гашения дуги), с;  
 $T_n$  - функции времени  $t$

$U$  - наибольшее рабочее междуфазное напряжение, кВ;  
 $\Delta v_i$  - температурный интервал;  
 $V$  - скорость ветра, м/с;  
 $v$  - температура шины,  $^{\circ}\text{C}$   
 $v_{\text{КЗ}}$  - конечная (наибольшая) температуры шин при КЗ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v_{\text{КЗ.доп}}$  - допустимая (кратковременная) температуры шин при КЗ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v_{\text{в,ном}}$  - номинальная температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v_{\text{в}}$  - фактическая температура воздуха  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v_{\text{доп}}$  - длительно допустимая температура шины в рабочем режиме  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $Z_{nm}$  - функция координаты шины  $z$  и угла включения тока КЗ  $\varphi$ ;  
 $U_{1\text{max}}$  - максимальный прогиб ошиновки (шины или изолятора)  
при воздействии ветровой нагрузки, м;  
 $U_{\text{ст.мах}}$  - статические прогибы;  
 $U_{\text{р.мах}}$  - максимальный расчетный прогиб шины при резонансных ветровых колебаниях, м;  
 $U_{\text{р.доп}}$  - допустимый прогиб шины при вихревых возбуждениях, м;  
 $\alpha_{li}$  - коэффициент температурного удлинения материала шин;  
 $\alpha_{\text{лср}}$  - среднее значение коэффициента температурного удлинения в рабочем диапазоне температур;  
 $\alpha_p$  - температурный коэффициент электрического сопротивления,  $1/^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи при конвекции,  $\text{Вт}\cdot^{\circ}\text{C}/\text{м}^2$ ;  
 $\beta_{\text{в}}$  - температурный коэффициент объемного расширения воздуха, примерно равный  $1/T_{\text{в}}$ ;  
 $\gamma$  - коэффициент надежности нагрузки;  
 $\gamma_1 = c_1/c_2$   
 $\Delta$  - плотность материала шины,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $\delta_y$  - логарифмический декремент затухания при колебании шины в вертикальной плоскости,  
 $\delta_x$  - логарифмический декремент затухания при горизонтальных колебаниях шин;  
 $E$  - степень черноты поверхности шины;  
 $\eta_{\text{в}}$  - динамический коэффициент при ветровых нагрузках равный  
 $\eta$  - динамический коэффициент;  
 $\eta^{(2)}$  и  $\eta^{(3)}$  - динамические коэффициенты при двух- и трехфазном КЗ;  
 $\Theta$  - перепад температур между шиной и воздухом,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\lambda_{\text{в}}$  - коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,  
 $\lambda_{\text{э}}$  - удельная эффективная длина пути утечки, зависящая от степени загрязнения атмосферы,  $\text{см}/\text{кВ}$ ;  
 $\lambda$  и  $\beta$  - параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы (опоры) пролета, а также числа опор;  
 $N$  - кинетическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  
 $v_{\text{в}}$  - кинетический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  
 $P_{\text{г}}$  - нормативная плотность гололеда,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $\rho_{\text{в}}$  - плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $R$  и  $\rho_{1915}$  - удельные электрические сопротивления материала шины и сплава 1915;  
 $R$  - удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре  $v_0$  обычно равной  $20^{\circ}\text{C}$ ;



$\sigma_x$  – напряжение в шине, обусловленное действиями сил в горизонтальной плоскости, Па;  
 $\sigma_y$  - напряжение в шине, обусловленное действиями сил в вертикальной плоскости, Па;;  
 $\Sigma_{max}$  - максимальное расчетное напряжение в материале шин, Па;;  
 $\Sigma_{доп}$  - допустимое напряжение в материале шин, Па;;  
 $\Sigma_{max, св}$  - максимальное расчетное напряжение в области сварного шва шины, Па;;  
 $\sigma_{доп, св}$  - допустимое напряжение в материале шин с учетом снижения ее прочности после сварки, Па;  
 $\Psi$  – угол включения тока КЗ, рад;  
 $\omega$  - угловая частота тока в сети, рад/с

## 1 Выбор изоляции шинных конструкций, проверка шин по условиям короны, допустимым температурным удлинениям, нагревам шин в рабочем режиме и при КЗ

### 1.1 Выбор изоляторов

1.1.1 Изоляторы и изоляционные опоры выбираются по длине пути утечки и проверяются на стойкость (прочность) при электродинамических, ветровых и гололедных нагрузках.

Согласно ПУЭ–7 [п.1.9.7.] изоляторы и изоляционные опоры выбираются по удельной эффективной длине пути утечки в зависимости от степени загрязненности (СЗ) в месте расположения электроустановки и ее номинального напряжения. Выбор изоляторов и изоляционных опор может производиться также по разрядным характеристикам.

Геометрическая длина пути утечки изолятора  $L_{ут}$ , см, согласно ПУЭ-7 [п.1.9.9.] должна отвечать условию,

$$L_{ут} \geq \lambda_{э} \cdot U \cdot k, \quad (1.1)$$

где  $\lambda_{э}$  – удельная эффективная длина пути утечки, зависящая от СЗ атмосферы, см/кВ;  
 $U$  - наибольшее рабочее междуфазное напряжение, кВ;  
 $k$  – коэффициент эффективности использования длины пути утечки изолятора или изоляционной конструкции.

Нормированные значения параметров  $\lambda_{э}$  и коэффициентов  $k$  следует принимать согласно рекомендациям ПУЭ-7 глава 1.9.

Проверка опорных изоляторов на стойкость при ветровых и электродинамических нагрузках рассматривается в параграфе 2.5 и главе 3.

### 1.2 Выбор изоляционных расстояний

1.2.1 Наименьшие расстояния в свету между неизолированными токоведущими частями, элементами оборудования и изоляции, находящимися под напряжением, до заземленных конструкций  $a_{ф-з1}$ , а также между токоведущими частями разных фаз  $a_{ф-ф1}$  должны оставаться больше наименьших (допустимых) расстояний, соответственно,  $A_{ф-з}$  и  $A_{ф-ф}$ , приведенных в ПУЭ –7 [табл. 4.2.5 и 4.2.7]:

$$a_{ф-з1} \geq A_{ф-з}; \quad (1.2)$$

$$a_{ф-ф1} \geq A_{ф-ф}. \quad (1.3)$$

В ЗРУ  $a_{ф-з1}$  и  $a_{ф-ф1}$  соответствуют монтажным расстояниям в свету  $a_{ф-з0}$  и  $a_{ф-ф0}$  (рис.1.1.) и определяются без учета внешних воздействий. В ОРУ  $a_{ф-з1}$  и  $a_{ф-ф1}$  определяются с учетом воздействия ветровой нагрузки, равной 60% максимальной расчетной (п.2.5.1).

Наименьшие расстояния в свету между ошиновкой и заземленными элементами ОРУ определяются по формуле

$$a_{\phi-31} = a_{\phi-3,0} + y_{1\max}, \quad (1.4)$$

где  $a_{\phi-3,0}$  – расстояние в свету между ошиновкой и заземленными элементами без учета внешних воздействий (монтажные расстояния);

$y_{1\max}$  – максимальный прогиб ошиновки (шины или изолятора) при воздействии ветровой нагрузки в плоскости изменения габарита (рис.1.1). С запасом  $y_{1\max}$  может быть принят равным наибольшему прогибу шины (как правило, в среднем сечении)  $y_{\max}$ .

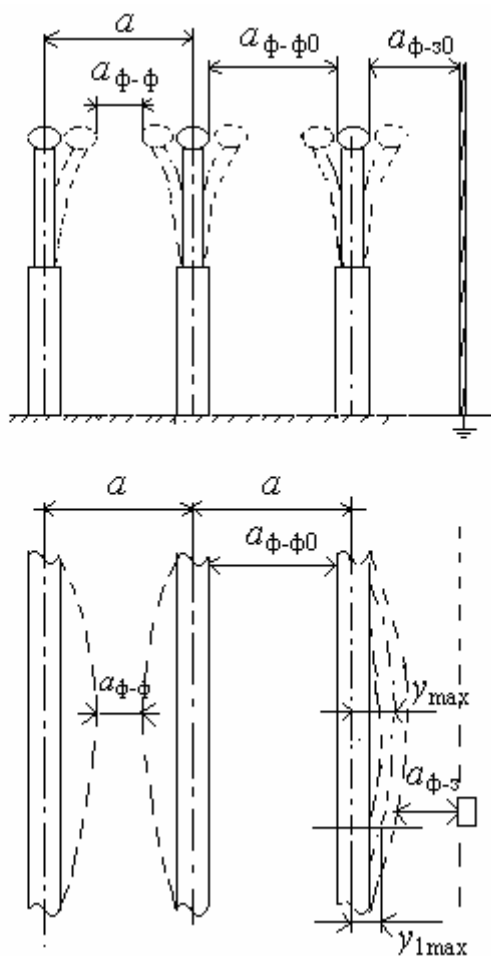


Рис.1.1 К определению наименьших расстояний в свету  $a_{\phi-3}$  и  $a_{\phi-\phi}$ .

В ОРУ наибольшие расстояния в свету между фазами зависят от взаимного расположения шин, а также изоляторов соседних фаз. Если шины расположены в одной горизонтальной плоскости, а изоляторы соседних фаз на одной оси, перпендикулярной шинам (рис.1.1) наименьшие расстояния в свету между фазами определяются по формуле

$$a_{\phi-\phi1} = (a - D) - 2y_{\max}, \quad (1.5)$$

где  $a$  – расстояние между фазами (осями шин), м;

$D$  – диаметр шины, м;

$y_{\max}$  – наибольший прогиб шины при ветровой нагрузке, равной 60% максимально расчетной и определяемый согласно указаниям параграфа 2.5.

1.2.2 Кроме того, после отключения КЗ расстояние в свету между токоведущими частями и заземленным оборудованием  $a_{\phi-32}$  и между фазами  $a_{\phi-\phi2}$  должны оставаться больше наименьших допустимых расстояний при наибольших рабочих напряжениях  $A_{\phi-32}$  и  $A_{\phi-\phi2}$ , принимаемых по табл.2.5.17 и 2.5.18 ПУЭ-7.

Если фазы расположены в одной плоскости наибольшие прогибы ошиновки и, следовательно, наименьшие расстояния от токоведущих до заземленных частей следует определять для крайних фаз (А и С) после отключения трехфазного КЗ.

Наибольшее сближение фаз и, следовательно, наименьшие расстояния в свету между фазами наступают после отключения двухфазного КЗ. Наибольшие прогибы (отключения) после отключения КЗ допускается принимать равными наибольшим прогибам при КЗ.

Если источники питания удалены от точки КЗ без существенной погрешности наибольшие прогибы ошиновки (фазы которой расположены в одной плоскости) при двух- и трехфазных КЗ можно принять одинаковыми. В этом случае наименьшие расстояния в свету между фазой и землей  $a_{\phi-32}$ , а также между фазами  $a_{\phi-\phi2}$  следует определять по формулам (1.4) и (1.5), в которых прогибы шин, определяются в соответствии с указаниями п.3.2.2.

### 1.3 Проверка шин по условиям короны

Шины должны проверяться по условиям короны. Общая корона на шинах не возникает, если выполняется неравенство

$$E_{\max} \leq 0,9 E_0, \quad (1.6)$$

где  $E_{\max}$  – максимальная напряженность электрического поля на поверхности шин при среднем эксплуатационном напряжении;

$E_0$  – начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда, которая определяется с учетом среднегодовых значений плотности воздуха и температуры на высоте расположения шин.

Условие (1.6) выполняется, если внешний диаметр шин  $D$  больше или равен минимальному допустимому диаметру по условию короны, т. е.

$$D \geq D_{\text{доп}}. \quad (1.7)$$

Минимальные допустимые диаметры трубчатых одиночных шин при нормальных атмосферных условиях (давление воздуха  $p_{\text{в}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ , температура воздуха  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ ) для номинальных напряжений 110-1150 кВ даны в табл.1.1

Таблица 1.1.

Минимальные допустимые диаметры шин по условиям короны

$U_{\text{доп}}$ , кВ	110	220	330	500	750	1150
$D_{\text{доп}}$ , мм	9	24	36	55	84	140

Значения  $D_{\text{доп}}$  получены для горизонтально расположенных гладких трубчатых шин при минимально допустимых (согласно ПУЭ-7) расстояниях между фазами, а также фазами и землей.

Трубчатые шины РУ напряжением до 220 кВ допускается не проверять по условиям короны, так как диаметр шин, выбранный по условиям нагрева, а также электродинамической и ветровой стойкости превосходит его минимальное допустимое значение.

Кроме проверки по условию (1.7), необходимо проведение испытаний (см. п. 4.13) и расчетов по условиям короны и радиопомех элементов ошиновки, в частности, узлов крепления шины к опорным изоляторам, аппаратам и измерительным трансформаторам, а также узлов поворотов и ответвлений шин.

## 1.4 Проверка элементов ошиновки по допустимым температурным деформациям шин

Температурные деформации (удлинения или сжатия) шин не должны приводить к дополнительным усилиям на изоляционные опоры и механическим напряжениям в шинах, что обеспечивается соответствующей конструкцией шинодержателей, установкой компенсаторов тепловых расширений (деформаций) и другими конструктивными решениями. Поэтому длина неразрезного (целого или сварного) участка шины должна отвечать условиям

$$L(v_{min}) \geq L_{\text{доп. min}} ; \quad (1.8a)$$

$$L(v_{max}) \leq L_{\text{доп. max}} , \quad (1.8б)$$

где  $L_{\text{доп. min}}$  и  $L_{\text{доп. max}}$  - минимальные и максимальные допустимые длины неразрезного отрезка шины, м, определяемые конструкцией шины, шинодержателей и температурных компенсаторов;

$L$  - длина этого отрезка при минимальной  $v_{min}$  и максимальной  $v_{max}$  температурах шины.

Минимальная температура шины  $v_{min}$  наступает при отключении цепи в зимний период и равна абсолютной минимальной температуре воздуха  $v_{vmin}$  в районе расположения ОРУ, которая определяется согласно указаниям СНиП 23-01-99. Оправдано принять эту температуру равной минимальной температуре окружающей среды, установленной для коммутационных аппаратов (например,  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Максимальная температура шины  $v_{max}$  наступает при КЗ. С запасом эту температуру  $v_{max}$  можно принять равной допустимой температуре нагрева шин при КЗ, т.е.  $200^{\circ}\text{C}$  [5].

Длина неразрезного отрезка шины при различных температурах составляет

$$L(v) = L_0 \cdot \prod_{i=1}^k (1 + \alpha_{li} \cdot \Delta v_i) \approx L_0 \cdot (1 + \alpha_{lcp} \cdot \Delta v), \quad (1.9)$$

где  $L_0$  - начальная (монтажная) длина шины при температуре  $v_0$ ;

$\Delta v_i = v_i - v_{i-1}$  - температурный интервал,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$i = 1, 2, \dots, k$  - номер температурного интервала;

$\alpha_{li}$  - коэффициент температурного удлинения на  $i$ -ом интервале,  $\text{град}^{-1}$ ;

$\alpha_{lcp}$  - среднее значение коэффициента температурного удлинения в интервале температур ( $v_{min}, v_{max}$ ),  $\text{град}^{-1}$ .

Коэффициенты температурного удлинения некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл.1.2

Таблица 1.2

Коэффициенты температурного удлинения алюминиевых сплавов

Марка сплава	$\alpha_{li}, 10^{-6} \text{ град}^{-1}, \text{ в интервале температур, } ^{\circ}\text{C}$			
	$-60 \div +20$	$20 \div 100$	$100 \div 200$	$200 \div 300$
АД, АД1	22,0	23,5	25,4	27,4
АМг3	-	23,5	25,1	27
АМг5	22,5	24,1	26,3	28,2
АМг6	22,1	23,7	25,7	27,1
АД31	-	23,4	25,3	28,2
АД33	-	23,2	25,1	26,7

Марка сплава	$\alpha_{li}, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ , в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$			
	-60 ÷ +20	20 ÷ 100	100 ÷ 200	200 ÷ 300
АД35	-	23,6	25,5	27,1
АВ	21,8	23,5	25,1	27,6
01915Т	-	25,6	27,2	27,0
01915Т2	-	25,0	25,0	28,6

### 1.5 Выбор шин по нагреву в рабочих режимах

**1.5.1** В рабочих режимах температура нагрева шин  $v$  не должна превышать допустимого значения  $v_{\text{доп}}$

$$v \leq v_{\text{доп}} . \quad (1.10)$$

Допустимые температуры нагрева алюминиевых и медных шин, а также контактных соединений, установленные ГОСТ 8024-90, приведены в табл.1.3. В соответствии с ГОСТ 8024 для шин, не имеющих разъемных контактов (например, сборные шины), допустимая температура составляет  $120^{\circ}\text{C}$ . Вблизи контактных соединений (например, с выводами аппаратов) допустимая температура шин не должна превышать допустимой температуры контакта, которая для контактов без покрытия составляет  $90^{\circ}\text{C}$ . Нормативное значение температуры окружающей среды (воздуха) принято равным  $40^{\circ}\text{C}$  [ГОСТ 8024-90].

Таблица 1.3

Допустимые температуры шин и разъемных контактных соединений

Наименование частей токопроводов и материалов, из которых они изготовлены	Наибольшая допустимая температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$
Токоведущие неизолированные проводники (шины)	120
Контактные соединения на воздухе:	
а) из меди, алюминия и их сплавов без покрытий;	90
б) из меди и медных сплавов с покрытием серебром;	120
с) из алюминия и его сплавов с покрытием серебром.	110

Наибольший рабочий ток, при котором выполняется неравенство (1.10), называется допустимым током  $I_{\text{доп}}$  (или номинальным током ошиновки  $I_{\text{ном}}$ ). Поэтому, работоспособность шин по условию нагрева в рабочем режиме рекомендуется проверять по условию

$$I_{\text{раб.нб}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (1.11)$$

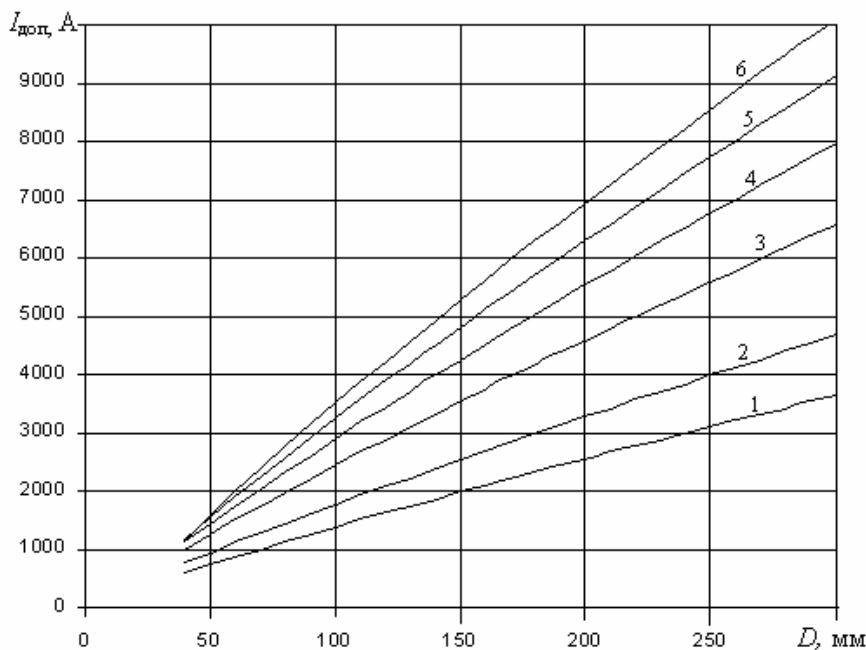
где  $I_{\text{раб.нб}}$  - наибольший рабочий ток, А.

Наибольший рабочий ток определяется: для сборных шин станций и подстанций, а также в цепи секционных и шиносоединительных выключателей – при наиболее неблагоприятных эксплуатационных условиях (при наибольших перетоках мощности); для цепи трансформаторов – при использовании их перегрузочной способности; для параллельных или взаиморезервирующих цепей – при отключении одной из них; для цепи генератора – при работе с номинальной мощностью и снижении напряжения на 5% от номинального.

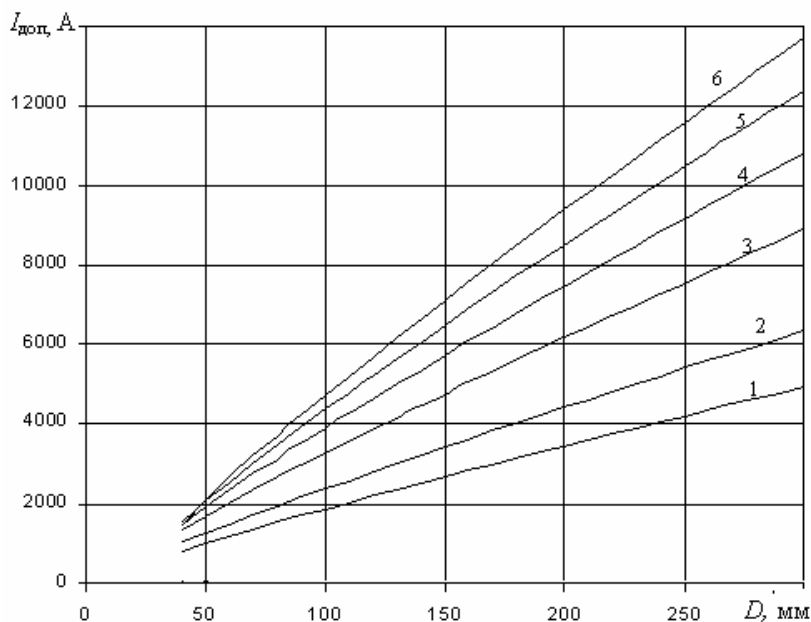
Допустимый ток шин следует определять экспериментально или на основании расчетов. Однако допустимый ток шин экспериментально обычно определяется в закрытых помещениях и не может быть напрямую использован для оценки этого параметра в наружных установках.

Оправдано устанавливать допустимый ток шины равным номинальному току электрических аппаратов (например, выключателей или разъединителей) ОРУ.

Для практических оценок рекомендуется использовать расчетные кривые допустимых токов неокрашенных и окрашенных шин из алюминиевого сплава 1915 (1915Т), приведенные на рис. 1.2- 1.4.

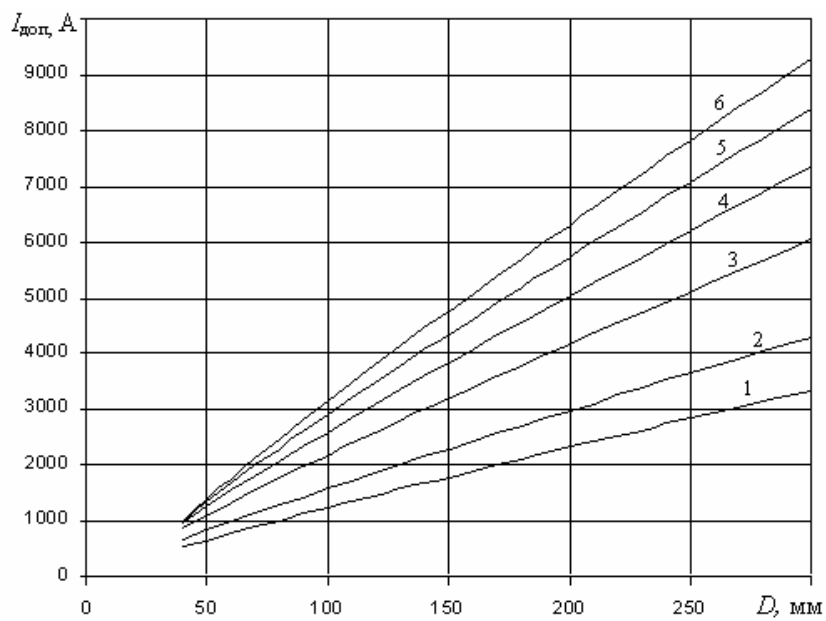


а)

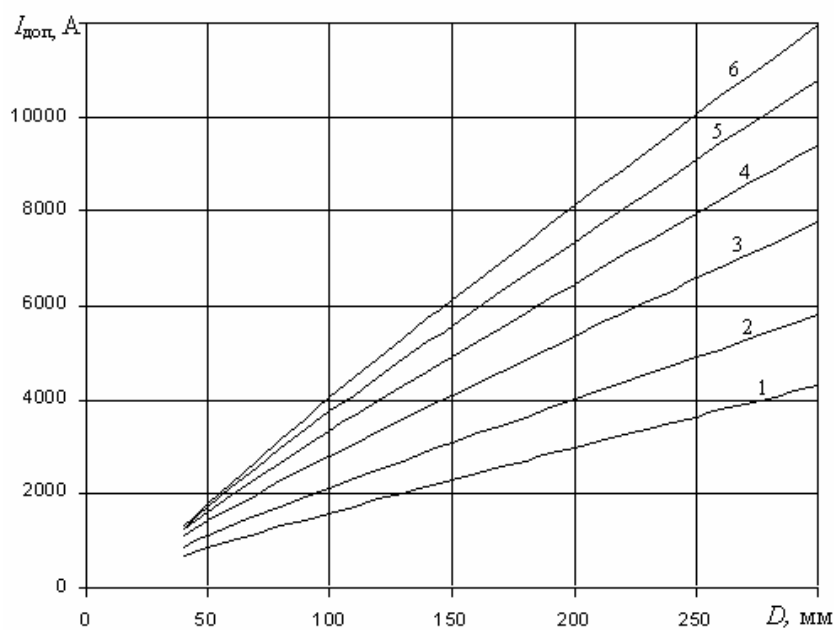


б)

Рис.1.2 Допустимые токи неокрашенных шин из сплава 1915Т в ОРУ при температуре воздуха 40 °С и длительно допустимой температуре  $t_{доп}$  равной 90 °С (а) и 120 °С (б) : кривая 1 для шин с толщиной стенки 3 мм; 2 - 5 мм; 3 -10 мм; 4 – 15 мм; 5 - 20 мм; 6 - 25 мм.



а)



б)

Рис.1.3 Допустимые токи неокрашенных шин из сплава 1915Т в ЗРУ при температуре воздуха 40 °С и длительно допустимой температуре  $t_{доп}$  равной 90 °С (а) и 120 °С (б) : кривая 1 для шин с толщиной стенки 3 мм; 2 - 5 мм; 3 -10 мм; 4 – 15 мм; 5- 20 мм; 6- 25 мм.

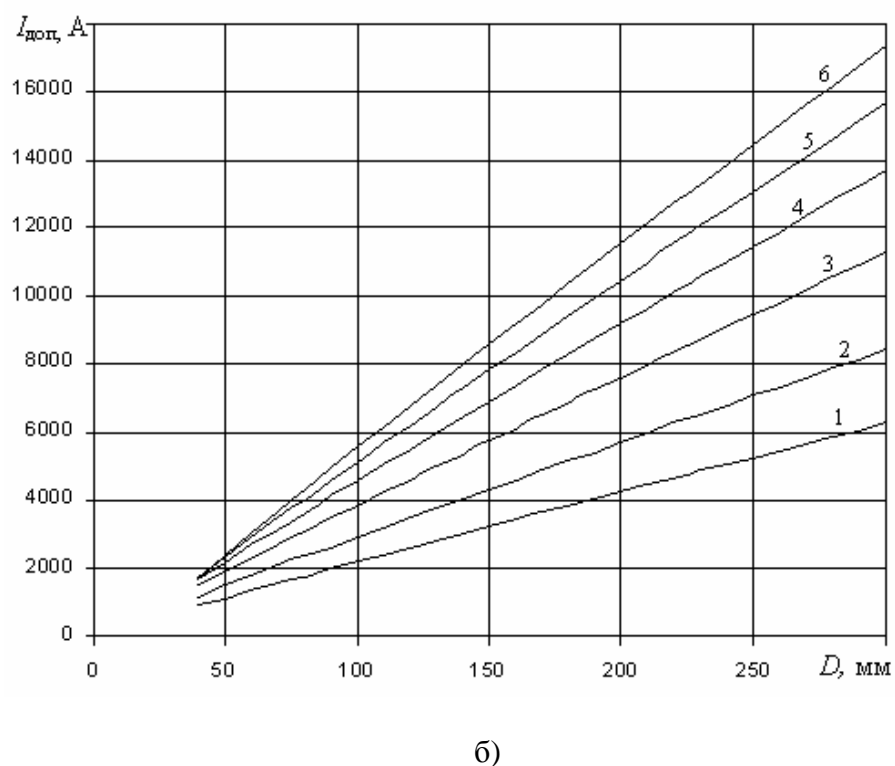
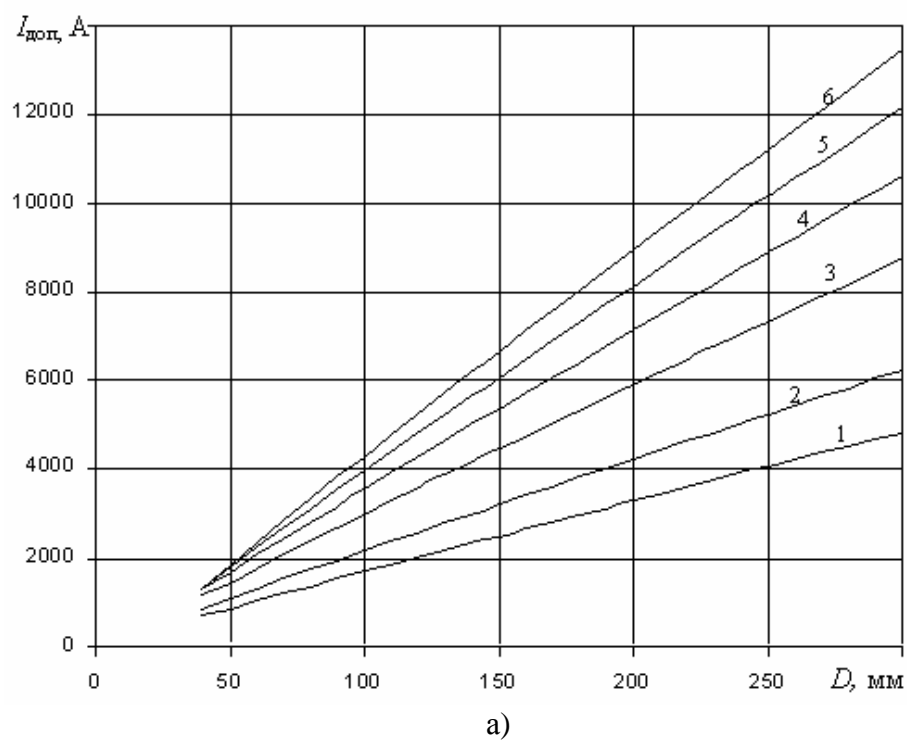


Рис.1.4 Допустимые токи окрашенных белой краской шин из сплава 1915Т в ЗРУ при температуре воздуха  $40^{\circ}\text{C}$  и длительно допустимой температуре  $\vartheta_{доп}$  равной  $90^{\circ}\text{C}$  (а) и  $120^{\circ}\text{C}$  (б) : кривая 1 для шин с толщиной стенки 3 мм; 2- 5 мм; 3-10 мм; 4 – 15 мм; 5- 20 мм; 6- 25 мм.

Если шины изготовлены из других сплавов, то допустимые токи приблизительно рекомендуется вычислять по формуле:



$$I_{\text{доп}} \approx I_{\text{доп1915}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{1915}}}, \quad (1.12)$$

где  $I_{\text{доп1915}}$  – допустимый ток шины из сплава 1915;  
 $\rho$  и  $\rho_{1915}$  - удельные электрические сопротивления материала шины и сплава 1915, приведенные в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Удельные электрические сопротивления алюминиевых сплавов

Марка сплава	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ при температуре 20°C, $10^{-6}$ , Ом·м	Удельная теплопроводность $\lambda$ при 25°C, Вт/(м·К)
АДО	0,029	218
АДОМ, АД1М	0,029	218
АД31Т	0,035	192
АД31Т1	0,0325	192
АД33Т	0,043	142
АД33Т1	0,040	142
АВТ	0,041	176
АВТ1	0,038	176
1911Т1	0,045	155
1915, 1915Т	0,0517	154
1925Т	0,066	-
1925Т1	0,059	-
АМг4М	0,061	134
АМг5М	0,059	121

Если температура окружающего воздуха  $v_{в2}$  или допустимая температура  $v_{\text{доп}2}$  отличается от принятых при построении кривых значений  $v_{в}$  и  $v_{\text{доп}}$ , то допустимый ток приближенно определяется по формуле

$$I_{\text{доп}2} \approx I_{\text{доп}} \sqrt{\frac{v_{\text{доп}2} - v_{в2}}{v_{\text{доп}} - v_{в}}}, \quad (1.13)$$

где  $I_{\text{доп}}$  - допустимый ток, определяемый по кривым (рис.1.2-1.4).

**1.5.2** Формулу (1.13) следует использовать для приближенных оценок допустимых токов на предварительном этапе выбора сечения шины. Если условие (1.11) является определяющим для выбора шины, то на заключительном этапе расчета необходимо уточнить допустимое значение рабочего тока при исходных  $v_{\text{доп}}$  и  $v_{в}$  на основании испытаний или исходя из уравнения теплового баланса по формуле

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{Q_k + Q_l - Q_c}{R_a}}, \quad (1.14)$$

где  $Q_k$  и  $Q_l$  – тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением (лучеиспусканием) при температуре шины равной  $v_{\text{доп}}$ .

$Q_c$  – тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации.

$R_a$  – активное сопротивление шины при температуре  $v$ .

Активное сопротивление шины на один метр длины, Ом/м, равно

$$R_a = k_n \cdot R = k_n \cdot \frac{\rho}{S} \cdot [1 + \alpha_p \cdot (v_{\text{доп}} - v_0)], \quad (1.15)$$

где  $k_n$  – коэффициент поверхностного эффекта;

$R$  – сопротивление шины постоянному току на 1 м длины, Ом/м, при температуре  $v_{доп}$ ;  
 $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре  $v_0$  обычно равной  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_{\rho} \approx 0,004$  – температурный коэффициент электрического сопротивления в интервале температур от  $v_0$  до  $v_{доп}$ ,  $1/^{\circ}\text{C}$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения шины,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент поверхностного эффекта трубчатых шин приближенно равен

$$k_n = 1 + 3,3 \cdot 10^{-10} \left( \frac{b}{DR} \right)^2, \quad (1.16)$$

где  $b$  и  $D$  – толщина стенки и внешний диаметр шины.

Коэффициент  $3,3 \cdot 10^{-10}$  имеет размерность  $\text{м}^2/\text{Ом}^2$ .

Для шин РУ 110-500 кВ, как правило, коэффициент поверхностного эффекта может быть принят равным 1.

Тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением на метр длины, Вт/м, составляют

$$Q_k = F_k \cdot q_k; \quad (1.17, \text{а})$$

$$Q_l = F_l \cdot q_l \quad (1.17, \text{б})$$

где  $q_k$  и  $q_l$  – плотности теплового потока (удельные теплоотдачи) конвекцией и излучением,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$F_k = F_l = \pi \cdot D$  – конвектирующие и излучающие поверхности трубчатых шин (на 1 м длины), м.

Удельная теплоотдача конвекцией определяется по формуле

$$q_k = \alpha_k \theta = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}}{D} \theta \quad (1.18)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи при конвекции,  $\text{Вт} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{м}^2$ ;

$\theta = v - v_{\text{в}}$  – перепад температур между шиной и воздухом,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , указанный в табл.1.5;

$Nu$  – число Нуссельта, которое для газов является критериальной зависимостью вида  $Nu = f(Gr, Re)$ ;

$Gr$  – число Грасгофа, равное

$$Gr = g \beta_{\text{в}} \theta \cdot D^3 / v_{\text{в}}^2, \quad (1.19)$$

$Re$  – число Рейнольдса равное

$$Re = VD / v_{\text{в}}, \quad (1.20)$$

здесь  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\beta_{\text{в}}$  – температурный коэффициент объемного расширения воздуха, примерно равный  $1/T_{\text{в}}$ ;

$T_{\text{в}} = v_{\text{в}} + 273$  – термодинамическая температура воздуха, К;

$v_{\text{в}}$  – кинетический коэффициент вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ , указанный в табл.1.5;

$V$  – скорость ветра, м/с.

Физические свойства сухого воздуха

Температура $t, \text{C}^0$	Плотность $\delta$ , $\text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^{-2}, \text{Вт/(м}\cdot\text{C}^0)$	Кинетический коэффициент вязкости $\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$
-50	1,584	2,04	9,23
-40	1,515	2,12	10,04
-30	1,453	2,20	10,80
-20	1,395	2,28	11,61
-10	1,342	2,36	12,43
0	1,290	2,44	13,28
10	1,247	2,15	14,16
20	1,205	2,59	15,06
30	1,165	2,67	16,00
40	1,128	2,76	16,96
50	1,093	2,83	17,95

Примечание: параметры приведены при давлении воздуха  $p_b=760$  мм. рт. ст

Внутри помещения (в ЗРУ) теплоотдача  $q_k$  в основном определяется свободной (естественной) конвекцией ( $Re=0$ ); вне помещений (в ОРУ) преобладает вынужденная конвекция, однако при малых скоростях ветра (в том числе при штиле), теплообмен происходит в условиях смешанной (вынужденной и естественной) конвекции.

Число Нуссельта составляет:

- при свободной конвекции в области чисел Грасгофа  $1,4 \cdot 10^3 \leq Gr \leq 1,4 \cdot 10^8$  (характерных для жестких трубчатых шин)

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25}; \quad (1.21)$$

- при вынужденной конвекции (без учета естественной)

$$Nu = \begin{cases} 0,437 Re^{0,5}, & \text{при } 5 < Re \leq 10^3; \\ 0,218 Re^{0,6}, & \text{при } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,0201 Re^{0,8}, & \text{при } 3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6. \end{cases} \quad (1.22)$$

Наиболее тяжелые условия работы шин ОРУ возникают при штиле ( $V \approx 0,6$  м/с). Тем не менее, конвективная теплоотдача шин ОРУ оказывается выше, чем в ЗРУ (при естественной конвекции), за счет естественного движения воздуха.

Если свободный и вынужденный потоки имеют одинаковое направление, что характерно для штиля, в формулу (1.22) вместо  $Re$  следует подставлять эквивалентный критерий Рейнольдса  $Re^*$ , который равен

$$Re^* = Re + \sqrt{0,5Gr}. \quad (1.23)$$

Если вынужденный поток (ветер) направлен в горизонтальной плоскости, то эквивалентный критерий Рейнольдса  $Re^*$ , определяется по формуле

$$Re^* \approx \sqrt{Re^2 + 0,5Gr}. \quad (1.24)$$

Расчет удельного конвективного теплообмена шин ОРУ при штиле следует проводить при скорости ветра равной 0,6 м/с по формулам (1.18), (1.20) и (1.23). Допускается использовать экспериментальные оценки конвективной теплоотдачи шин ОРУ

при штиле, которые упрощают расчеты. В этом случае удельная теплоотдача конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>, приближенно определяется по формуле

$$q_k \approx 1,61\theta^{1,3} D^{-0,25}. \quad (1.25)$$

Конвективные тепловые потоки в ЗРУ и ОРУ (при штиле) на 1 м длины шины можно представить в форме удобной для расчетов

$$Q_k = C_k D^{0,75}. \quad (1.26)$$

Значения параметра  $C_k$ , Вт·м<sup>-1,75</sup>, при различных температурах воздуха  $\nu_b$  (и соответствующих значениях теплопроводности  $\lambda_b$  и кинетической вязкости  $\nu_b$ ), а также допустимых температурах нагрева шин  $\nu_{доп}$  указаны в табл.1.6.

Таблица 1.6

Значения параметров $C_k$ и $C_l$			
Параметр $C$	Условия эксплуатации	Значения параметров $C_k$ и $C_l$ при	
		$\nu_b=40^0C$ и $\nu_{доп}$ равных	
		$90^0C$	$120^0C$
$C_k, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-1,75}$	ЗРУ	542	975
	ОРУ (штиль)	818	1506
$C_l, \text{Вт}/\text{м}^2$	ЗРУ и ОРУ	1383	2539

Теплоотдача излучением в соответствии с уравнением Стефана – Больцмана и Кирхгофа, равна

$$q_l = \varepsilon c_o \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right], \quad (1.27)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности шины;

$c_o = 5,67$  – излучающая способность абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T = \nu + 273$  – термодинамическая температура шины, К;

$T_b = \nu_b + 273$  – термодинамическая температура воздуха, К.

В расчетах тепловой поток излучением согласно (1.17) удобно определять по формуле

$$Q_l = C_l \cdot \varepsilon D \quad (1.28)$$

где  $C_l$  – параметр, Вт/м<sup>2</sup>, значения которого приводятся в табл.1.6.

Поток, поглощаемый цилиндрической поверхностью длиной 1 м при солнечной радиации, составляет

$$Q_c = a_c q_c D, \quad (1.29)$$

где  $a_c$  – коэффициент поглощения солнечной радиации;

$q_c$  – интенсивность радиации, Вт/м<sup>2</sup>, принимаемая равной

$$q_c = \sqrt{q_{c,b}^2 + q_{c,g}^2}, \quad (1.30)$$

где  $q_{c,b}$  и  $q_{c,g}$  – интенсивность радиации на вертикальную и горизонтальные плоскости, указанные в СНиП 23-01-99.

Интенсивность солнечной радиации зависит от широты местности, времени года и суток, состояния атмосферы. Наибольшие значения  $q_c$  на территории РФ в летний период достигает 900-950 Вт/м<sup>2</sup>. В ЗРУ, а также в ОРУ зимой при прохождении максимума нагрузки интенсивность радиации следует принимать равной 0.

Значения коэффициентов  $\varepsilon$  и  $a_c$  указаны в табл.1.7. Рекомендуется для неокрашенных шин принимать  $\varepsilon = 0,15$ ,  $a_c = 0,5$ .

Таблица 1.7

## Степень черноты и коэффициент поглощения солнечной радиации

Материал	Степень черноты, $\varepsilon$	Коэффициент поглощения солнечной радиации, $a_c$
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	0,32-0,65
Эмаль белая	0,6-0,8	0,3
Масляная краска		
белая	0,81	0,3
желтая	0,9-0,92	0,44
зеленая	0,9-0,92	0,61-0,7
черная	0,9-0,92	0,9-0,98

## 1.6 Термическая стойкость шин

**1.6.1** В соответствии с ПУЭ шины считаются термически стойкими (т.е. выдерживают без повреждений тепловое воздействие токов КЗ), если их температура при КЗ остается ниже допустимой температуры

$$v_{\text{КЗ}} \leq v_{\text{КЗ.доп.}} \quad (1.31)$$

где  $v_{\text{КЗ}}$  и  $v_{\text{КЗ.доп.}}$  – конечная (наибольшая) и допустимая (кратковременная) температуры шин при КЗ.

Для алюминия и его сплавов ПУЭ-6 устанавливает допустимую температуру  $v_{\text{КЗ.доп}}$  равную 200°С.

Наибольшая температура шин при КЗ определяется по кривым (рис.1.5). Предварительно вычисляется интеграл Джоуля

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п0}}^2 \left[ t_{\text{откл}} + T_a \left( 1 - e^{-2t_{\text{откл}}/T_a} \right) \right], \quad (1.32)$$

где  $I_{\text{п0}}$  – действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ, кА;

$T_a$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с, (ориентировочные значения которой указаны в табл.1.8);

$t_{\text{откл}}$  – время отключения КЗ, которое складывается из времени действия резервной токовой защиты  $t_3$  и полного времени отключения цепи выключателем  $t_{\text{п.в.}}$  (включая время гашения дуги), с.

Таблица 1.8

Ориентированные значения постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ

Номинальное напряжение РУ ПС, кВ	$T_a$ , с
35	0,02-0,03
110-150	0,03-0,04
220-330	0,04-0,05
500-750	0,06-0,08

Если неизвестно время действия защиты, то время отключения  $t_{\text{откл}}$  следует принимать равным времени термической стойкости выключателя.

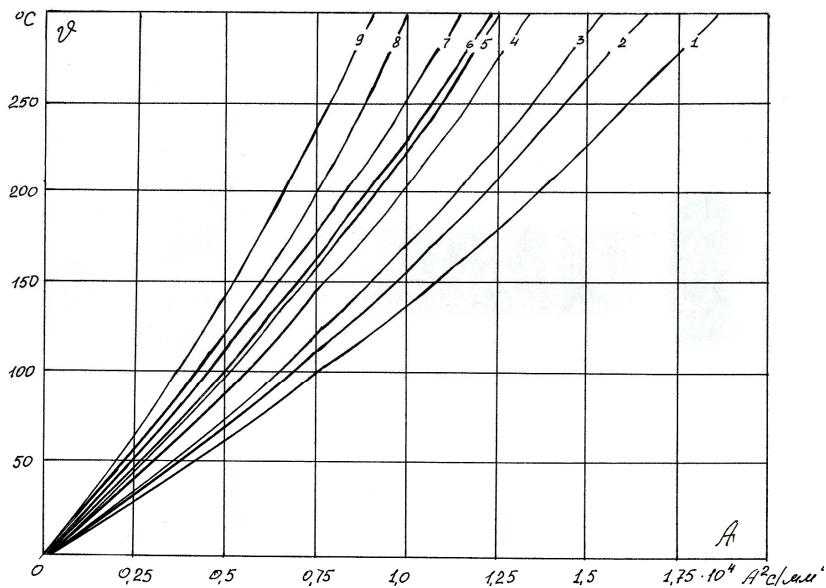


Рис.1.5 Кривые для нахождения наибольшей температуры шины при КЗ для различных сплавов: 1- АД0; 2- АД31Т1; 3- АД31Т; 4- АД33Т1; 5- АД33Т; 6- АВТ1; 7- АВТ; 8- 1915, 1915Т; 9-АМг5.

Если  $t_{откл}/T_a \geq 1,5$ , интеграл Джоуля приближенно определяется по формуле

$$B_k \approx I_{п0}^2 (t_{откл} + T_a). \quad (1.33)$$

Далее по кривым (рис.1.5) для начальной температуры шины  $v_n$  определяется параметр  $A(v_n)$ . Начальная температура сборных шин вычисляется в результате решения трансцендентного уравнения теплового состояния шины в рабочем режиме на ЭВМ или приближенно по формуле

$$v_n \approx v_v + (v_{доп} - v_{в,ном}) \left( \frac{I_{раб,нб}}{I_{доп}} \right)^2, \quad (1.34)$$

где  $v_{в,ном}$  – номинальная температура воздуха, равная 40 °С;

$v_v$  – фактическая температура воздуха (которая с запасом может быть принята равной  $v_{в,ном}$ ), °С;

$v_{доп}$  – длительно допустимая температура шины в рабочем режиме °С;

$I_{раб,нб}$  – наибольший рабочий ток шины, А;

$I_{доп}$  – длительно допустимый рабочий ток, А.

С запасом начальную температуру шин можно принять равной длительно допустимой рабочей температуре (п.1.5.1).

Далее вычисляется параметр

$$A(v_{кз}) = A(v_n) + B_k/S^2, \quad (1.35)$$

где  $S$  – поперечное сечение шины, мм<sup>2</sup>, равное (для труб)

$$S = \pi (D^2 - d^2) / 4;$$

здесь  $D$  и  $d$  – внешний и внутренний диаметр шины, мм.

Если не выполняется условие (1.31), то целесообразно уточнить время отключения, начальную температуру шины (до КЗ) и, наконец, увеличить сечение проводника.

**1.6.2** На первом этапе расчета жесткой ошиновки определение термической стойкости допускается проводить исходя из площади сечения проводника или тока КЗ по приведенным ниже формулам.

Шина удовлетворяет условию термической стойкости (1.34), если площадь ее поперечного сечения отвечает неравенству

$$S \geq S_T = \frac{\sqrt{B_k}}{\sqrt{A(v_{KЗ\text{доп}}) - A(v_n)}} \quad (1.36)$$

или если ток КЗ  $I_{п0}$  не превышает допустимого тока термической стойкости  $I_{т,доп}$

$$I_{п0} \leq I_{т,доп}, \quad (1.37)$$

где  $S_T$  – минимальное сечение шины по условию термической стойкости, мм<sup>2</sup>.

С запасом сечение  $S_T$  принимается равным

$$S_T = \sqrt{B_k} / C_T, \quad (1.38)$$

где  $C_T = \sqrt{A(v_{KЗ\text{доп}}) - A(v_{доп})}$  – параметр, А·с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>, значение которого при длительно допустимых (рабочих) температурах шин, равных 90 и 120 °С, приведены в табл.1.9.

Допустимый ток термической стойкости составляет не менее

$$I_{т,доп} = \frac{C_T \cdot S}{\sqrt{t_{откл} + T_a}}. \quad (1.39)$$

Таблица 1.9

Марка сплава	Значение параметра $C_T$	
	Значение $C_T$ , А·с <sup>1/2</sup> /мм <sup>2</sup> при длительно допустимой рабочей температуре $v_{доп}$ , равной	
	90 °С	120 °С
АД0	81	68
АД14	82	69
АДОМ, АД1М	83	70
АД31Т1	77	64
АД31Т	74	62
АД33Т1	71	59
АД33Т	67	57
АВТ1	66	55
АВТ	63	53
1915, 1915Т	60	51
АМг5	57	48

## 2 Расчет шинных конструкций на прочность

### 2.1 Проверка шин по допустимым прогибам от собственного веса

**2.1.1** По эстетико-психологическим требованиям наибольший прогиб шин от собственного веса, силы тяжести ответвлений, а также веса гололеда  $U_{ст,мах}$  не должен превышать допустимого статического прогиба  $U_{ст,доп}$

$$U_{ст,мах} \leq U_{ст,доп}. \quad (2.1)$$

Величина допустимого прогиба должна удовлетворять требованиям прочности, экономичности и соображениям эстетики.

Допустимый статический прогиб согласно ПУЭ-6 с учетом гололеда, собственного веса и веса ответвлений принимается равным

$$y_{\text{ст.доп 1}} = I_0/80, \quad (2.2a)$$

где  $I_0$  – длина шины между опорами (шинодержателями).

Приближенно (с запасом)  $I_0$  можно принять равной расстоянию между осями изоляторов, то есть длине пролета шины  $l$ .

Прогиб шин без учета гололеда должен быть не больше

$$y_{\text{ст.доп 2}} = I_0/100. \quad (2.2б)$$

Требованию (2.2б) должна удовлетворять ошиновка как открытых, так и закрытых РУ.

**2.1.2** Максимальный статический прогиб зависит от длины пролета, жесткости и погонной массы шины, массы гололеда, массы и точки крепления ответвления. Жесткость шин зависит от условия опирания на изоляторы пролета. Выделяют три основных расчетных схем пролета шины:

- балка с шарнирным опиранием на обеих опорах (рис.2.1а), характерная для шин с длиной неразрезного (целого или сварного) участка шины равного длине пролета и закрепленная на опорах (изоляторах) шинодержателями обжимного типа;

- балка с шарнирным опиранием на одной и жестким опиранием на другой опоре (рис.2.1б), характерная для шин, длина целого участка которых равна двум пролетам, а также для однопролетных неразрезных шин, если на одной из опор пролета шина закреплена с помощью сварки;

- балка с жестким опиранием (закреплением) на обоих изоляторах пролета (рис.2.1в), характерная для средних пролетов многопролетных (с пятью и более пролетами), неразрезных (цельных или сварных) шин.

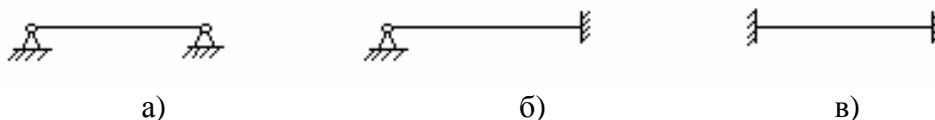


Рис. 2.1 Расчетные схемы пролетов шины

Для сборных шин ОРУ 110 кВ и выше характерно шарнирное опирание шин на опорах; шины внутрирядковых связей, а также сборные шины ЗРУ иногда выполняются неразрезными отрезками равными двум и более пролетам.

При проверке шин по допустимому прогибу от собственного веса, если неизвестны условия закрепления шин на опорах, в качестве расчетной схемы можно принять балку с шарнирным опиранием на обеих опорах (рис. 2.1.а).

**2.1.3** Полный статический прогиб шины (без учета гололеда) складывается из прогиба от собственного веса  $y_{\text{ст.ш}}$ , прогиба от веса ответвлений  $y_{\text{ст.отв}}$ .

$$y_{\text{ст, max}} = \max (y_{\text{ст.ш}} + y_{\text{ст.отв}}). \quad (2.3)$$

Расчетные формулы прогиба  $y_{\text{ст.ш}}$  и  $y_{\text{ст.отв}}$  в произвольной точке пролета  $z$  для расчетных схем ошиновки (рис.2.1) приведены в табл.2.1, в которых приняты следующие обозначения:

$m$  - масса шины на единицу длины, кг/м;



$g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$P$  – сила тяжести ответвления, Н, (определяемая в соответствии с указаниями п. 2.3.3.);

$l$  – длина пролета шины, м;

$E$  – модуль упругости материала шины, Па, (см. табл.2.2.);

$J$  – момент инерции шины, м<sup>4</sup>, равный для трубчатых шин

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}, \quad (2.4)$$

где  $D$  и  $d = D - 2b$  – внешний и внутренний диаметр шины, м;

$b$  – толщина стенки, м.

При расчете без учета гололеда погонная масса  $m$  принимается равной массе шины на единицу длины  $m = m_{ш}$ , а при расчете с учетом гололеда

$$m = m_{ш} + m_{г}, \quad (2.5)$$

где  $m_{г}$  – масса гололедных отложений на единицу длины шины, кг/м, которая определяется в соответствии с рекомендациями п.2.3.2.

Масса трубчатых шин на единицу длины принимается в соответствии со стандартами (ТУ) заводов-изготовителей или вычисляется по формуле

$$m_{ш} = \delta \cdot S = \frac{\delta \cdot \pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\delta \cdot \pi}{4} (4D \cdot b - 2b^2), \quad (2.6)$$

где  $\delta$  – плотность материала шины, кг/м<sup>3</sup> (указанная в табл.2.2.);

$S$  – площадь поперечного сечения шины, м<sup>2</sup>.

В пролетах без ответвлений, а также в пролетах с ответвлениями, выполненными у осей опор (изоляторов), прогибы шин обусловлены только собственным весом. В этом случае максимальный статический прогиб шины равен

$$y_{ст. max} = m \cdot g \cdot l / c_{ш}, \quad (2.7)$$

где  $c_{ш}$  – жесткость шины, Н/м, которая зависит от способа закрепления шины и определяется по формулам, указанным в табл. 2.1.

## 2.2 Внешние нагрузки и условия прочности изоляторов и шин

**2.2.1** Изоляторы и шины конструкций испытывают воздействие силы тяжести шины и ответвлений, гололедных, ветровых и электродинамических нагрузок (ЭДН).

Расчет изоляторов и шин ОРУ на прочность должен проводиться при следующих сочетаниях внешних нагрузок:

1) вес ошиновки, нормативная гололедная нагрузка и ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра (согласно указаниям ПУЭ-7 [п.2.5.48]);

2) вес ошиновки, ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра и ЭДН, без учета АПВ, равная 65% максимального расчетного значения (т.е. при токе КЗ равном 80% от максимума);

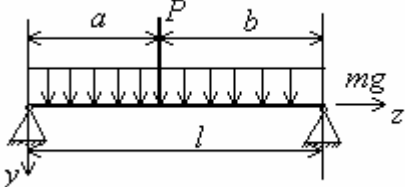
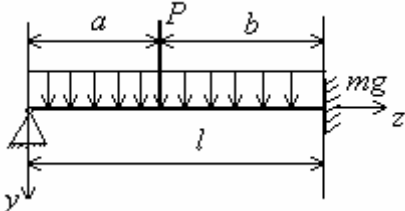
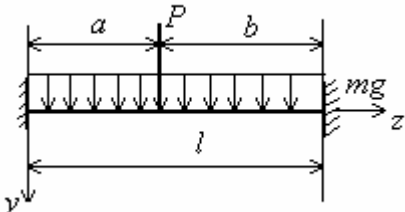
3) вес ошиновки, максимальная электродинамическая нагрузка (без учета АПВ) и ветровая нагрузка, равная 60% нормативного значения;

4) вес ошиновки и электродинамическая нагрузка при максимальном расчетном токе КЗ, в том числе при неуспешных АПВ (при повторных включениях на КЗ).

Кроме того, шины должны проверяться по условиям возникновения ветрового резонанса. Ошиновка ЗРУ проверяется только по нагрузке, указанной в п. 4.

Таблица 2.1

Прогибы шин от собственного веса и веса ответвлений

Расчетная схема	Прогиб шины от собственного веса $y_{ст, ш}$	Прогиб шины от веса ответвления $y_{ст, отв}$	Жесткость шины $C_{ш}$
	$0 \leq Z \leq l$ $y_{ст, ш} = \frac{mgl^4}{24EJ} \left[ \frac{z}{l} - 2 \left( \frac{z}{l} \right)^3 + \left( \frac{z}{l} \right)^4 \right]$	$0 \leq Z \leq a$ $y_{ст, отв} = \frac{Pa^2b^2}{6EJ} \left( 2 \cdot \frac{z}{a} + \frac{z}{b} - \frac{z^3}{a^2b} \right)$ $a \leq Z \leq l$ $y_{ст, отв} = \frac{Pa^2b^2}{6EJ} \left( 2 \cdot \frac{l-z}{b} + \frac{l-z}{a} - \frac{(l-z)^2}{ab^2} \right)$	$\frac{384EJ}{5 \cdot l^3}$
	$0 \leq Z \leq l$ $y_{ст, ш} = \frac{mgl^4}{48EJ} \left[ 2 \cdot \frac{z^4}{l^4} - 3 \cdot \frac{z^3}{l^3} + \frac{z}{l} \right]$	$0 \leq Z \leq a$ $y_{ст, отв} = \frac{Pl^3}{6EJ} \left[ \frac{b^2}{2 \cdot l^2} \left( 3 - \frac{b}{l} \right) \cdot \left( 3 \frac{z}{l} - \frac{z^3}{l^3} \right) - 3 \frac{b^2 z}{l^3} \right]$ $a \leq Z \leq l$ $y_{ст, отв} = \frac{Pl^3}{6EJ} \left[ \frac{b^2}{2 \cdot l^2} \left( 3 - \frac{b}{l} \right) \cdot \left( 3 \frac{z}{l} - \frac{z^3}{l^3} \right) - 3 \frac{b^2 z}{l^3} + \left( \frac{z}{l} - \frac{a}{l} \right)^3 \right]$	$\frac{185EJ}{l^3}$
	$0 \leq Z \leq l$ $y_{ст, ш} = \frac{mg \cdot z \cdot l^4}{24EJ} \left( 1 - \frac{z}{l} \right)$	$0 \leq Z \leq a$ $y_{ст, отв} = \frac{Pa^2b^2}{6EJ} \frac{z^2}{l^2} \left( 3 - 3 \frac{z}{b} - \frac{b}{a} \frac{z}{l} \right)$ $a \leq Z \leq l$ $y_{ст, отв} = \frac{Pa^2b^2}{6EJ} \frac{(l-z)^2}{l^2} \left( 3 - 3 \frac{l-z}{l} - \frac{a}{b} \frac{l-z}{l} \right)$	$\frac{384EJ}{l^3}$

Механические свойства труб из алюминиевых сплавов

Марка сплава и состояние поставки	Вид полуфабриката трубы	$E$ , ГПа ( $10^9$ Па)	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в.св.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{доп.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{св.доп.}}$ , МПа	$\delta$ , кг/м <sup>3</sup>
АДОМ, АД1М, АДО	Прессованные и катанные	70	59	59	41	41	2710
АДОН	Катанные	70	78	-	55	-	2710
АМг5М	Прессованные	69	255	-	178,5	-	2650
	Катанные	69	265	-	185,5	-	2650
АМг5Н	То же	69	314	-	220	-	2650
АД31Т	Прессованные	70	127	120	89	84	2710
АД31Т1	То же	70	196	120	137	84	2710
АД33Т	То же	70	177	-	124	-	2700
АД33Т1	То же	70	265	-	178,5	-	2700
АД35Т1	То же	70	314	-	185,5	-	2720
АВТ	То же	70	206	-	144	-	2700
АВТ1	То же	70	314	152	213	106	2700
АВМ	Катанные	70	147	-	103	-	2700
АВТ1	То же	70	206	-	144	-	2700
АВТ	То же	70	304	152	213	106	2700
1915Т	Прессованные	70	314	-	185,5	-	2770
1915	То же	70	353	318	247	223	2770
1915Т1	То же	70	372	-	260	-	2770
1925Т	То же	70	333	-	233	-	2770
1935Т	То же	70	250	-	175	-	2770

**2.2.2** Внешние силы (нагрузки) действуют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис.2.2): вертикальной  $yo_z$  (вдоль оси  $y$ ) и горизонтальной  $xoz$  (вдоль оси  $x$ ). В вертикальной плоскости приложены вес шины, ответвлений, гололеда, а также составляющая электродинамической нагрузки, действующая в конструкциях сложной пространственной конфигурации (например, на ответвлениях от сборных шин), см. главу 3. В горизонтальной плоскости действуют ветровая и электродинамическая нагрузки.

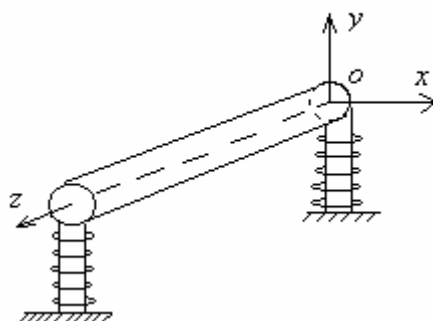


Рис. 2.2 К расчету ошиновки при сложных видах нагружения.

Внешние силы вызывают механические напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы. Максимальные результирующие значения напряжения в материале круглых трубчатых шин и нагрузки на опорные изоляторы следует определять по формулам

$$\sigma_{\max} = \max \sqrt{\sigma_x^2(z, t) + \sigma_y^2(z, t)}, \quad (2.8a)$$

$$F_{\max} = \max \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t)}, \quad (2.8б)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – напряжения в шине, являющиеся функциями координаты шины  $z$  и времени  $t$ , обусловленные действиями сил в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

$F_x$  и  $F_y$  – нагрузки на изоляторы по оси  $x$  и  $y$ , которые являются функциями времени  $t$ .

Если ЭДН действует только в горизонтальной плоскости, то максимальные результирующие напряжения в шине и нагрузки на изоляторы допускается принять равным

$$\sigma_{\max} = \max \sqrt{\sigma_x^2(z) + \sigma_y^2(z)}, \quad (2.9a)$$

$$F_{\max} = \sqrt{F_{x,\max}^2 + F_{y,\max}^2}, \quad (2.9б)$$

где  $\sigma_x(z)$  – максимальные (по времени) напряжения в шине от горизонтальных сил;

$\sigma_y(z)$  – напряжения от статических сил, направленных по оси  $y$ ;

$F_{x,\max}$  и  $F_{y,\max}$  – максимальные (по модулю) нагрузки на изоляторы по осям  $x$  и  $y$ .

Если наибольшие значения  $\sigma_{y,\max}$  или  $F_{y,\max}$  составляют менее 25% соответственно от  $\sigma_{x,\max}$  и  $F_{x,\max}$ , то напряжения или нагрузки от вертикальных сил допускается не учитывать, а результирующие напряжения и нагрузки принять равными

$$\sigma_{\max} \approx \sigma_{x,\max} = \max \sigma_x(z, t), \quad (2.10a)$$

$$F_{\max} \approx F_{x,\max} = \max F_x(t). \quad (2.10б)$$

**2.2.3** Шинные конструкции отвечают условиям стойкости (прочности), если выполняются следующие неравенства

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (2.11)$$

$$F_{\max} \leq F_{\text{доп}}, \quad (2.12)$$

где  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\text{доп}}$  – максимальное расчетное и допустимое напряжение в материале шин;

$F_{\max}$  и  $F_{\text{доп}}$  – максимальная расчетная и допустимая силы (нагрузки) на изоляторы.

Допустимое напряжение принимается равным 70% временного сопротивления разрыву (предела прочности) материала  $\sigma_{\text{в}}$ . Для шин, имеющих сварные соединения условие (2.11) является необходимым, но недостаточным. В области сварного шва, за счет отжига наблюдается снижение прочности термически обработанных сплавов. Зона отжига достигает 70 мм. Предел прочности после сварки  $\sigma_{\text{в.св}}$  составляет 50-94 %  $\sigma_{\text{в}}$ . Таким образом, для шин, имеющих сварные соединения, помимо условия (2.11) должно выполняться неравенство

$$\sigma_{\max,\text{св}} \leq \sigma_{\text{доп,св}}, \quad (2.13)$$

где  $\sigma_{\max,\text{св}}$  – максимальное расчетное напряжение в области сварного шва шины;

$\sigma_{\text{доп,св}}$  – допустимое напряжение с учетом снижения прочности после сварки, которое принимается равным  $0,7 \sigma_{\text{в.св}}$ .

Значения  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{\text{в.св}}$  следует принимать согласно указаниям заводов-изготовителей, а при отсутствии этих данных в соответствии с данными Указаниями.

Допустимые нагрузки на одиночные изоляторы (изоляционные опоры) составляют 60% минимальной разрушающей силы

$$F_{\text{доп}} = N_1 \cdot F_{\text{разр}}, \quad (2.14)$$

а спаренных изоляторов (опор) - 50% суммарного разрушающего усилия параллельных опор

$$F_{\text{доп}} = N_2 \cdot F_{\text{разр}, \Sigma}, \quad (2.15)$$

где  $N_1 = 0,6$ ,  $N_2 = 0,5$  – коэффициенты запаса;

$F_{\text{разр}}$  - минимальная разрушающая нагрузка одного изолятора (опоры);

$F_{\text{разр}, \Sigma}$  – суммарное разрушающее усилие спаренных изоляторов (опор).

При этом предполагается, что нагрузка приложена к вершине изолятора. Если точка приложения нагрузки удалена от вершины изолятора, то допустимая нагрузка уменьшится. Из условия равенства моментов сил, приложенных к вершине изолятора и к центру масс поперечного сечения шины, допустимая изгибающая нагрузка в этом случае составляет:

$$F_{\text{доп}} = N \cdot F_{\text{разр}} \cdot h / H, \quad (2.16)$$

где  $N$  – коэффициент запаса, равный  $N_1$  или  $N_2$ ;

$h$  и  $H$  – расстояния от опасного сечения изолятора соответственно до его вершины и центра масс поперечного сечения шины (рис.2.3).

Опасное сечение опорно-стержневых изоляторов следует принимать у кромки нижнего фланца (рис.2.3, а), а опорно-штыревых изоляторов – на границе контакта штыря с фарфоровым телом изолятора (рис.2.3,б).

Допустимые изгибающие нагрузки многоярусных изоляционных опор (рис.2.3,в) равны допустимым нагрузкам наименее прочного яруса. Допустимые нагрузки изоляторов каждого яруса определяются согласно уравнению (2.16).

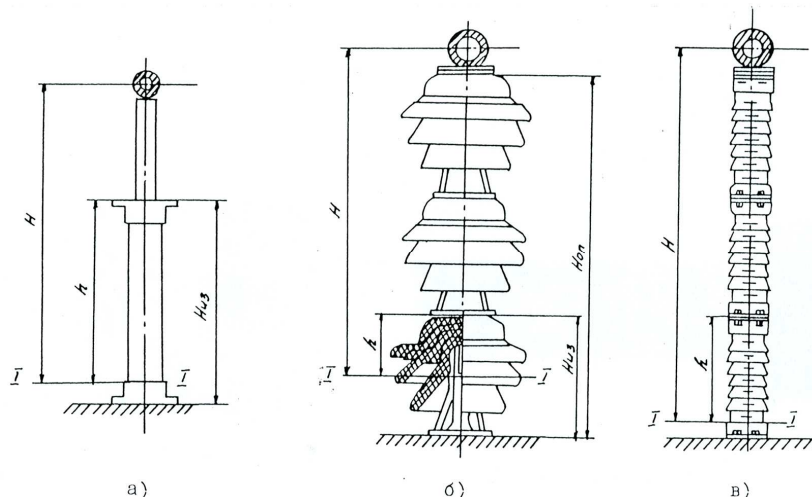


Рис. 2.3 К определению допустимой нагрузки на опоры.

### 2.3 Расчет на прочность от статических нагрузок (собственного веса шины, веса гололеда и ответвлений)

#### 2.3.1 Равномерно распределенные нагрузки, Н/м, от собственного веса шины, равны

$$q_{\text{ш}} = m_{\text{ш}} \cdot g, \quad (2.17)$$

где  $m_{\text{ш}}$  – масса шины на единицу длины (без гололедных отложений), кг/м, определяемая в соответствии с указаниями п. 2.1.3.

Напряжения в произвольном сечении шины,  $\sigma$ , и нагрузки на изоляторы,  $H$ , от собственного веса определяются по формулам

$$\sigma(z) = \frac{q \cdot l^2}{\lambda(z)W}; \quad (2.18)$$

$$F_{\max} = \beta \cdot q \cdot l, \quad (2.19)$$

где  $q = q_{\text{ш}}$ ;  $\lambda$  и  $\beta$  – параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы (опоры) пролета, а также числа опор;

$l$  – длина пролета, м;

$W$  – момент сопротивления поперечного сечения шины,  $\text{м}^3$ , равный для круглых трубчатых проводников

$$W = \frac{2J}{D} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}; \quad (2.20)$$

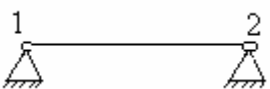
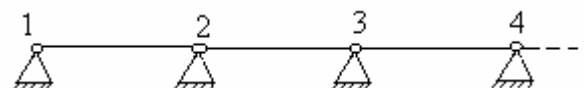
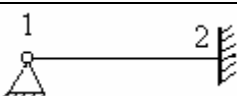
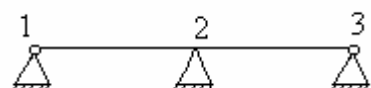
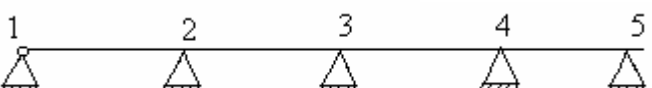
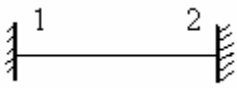
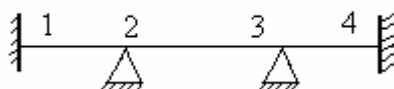
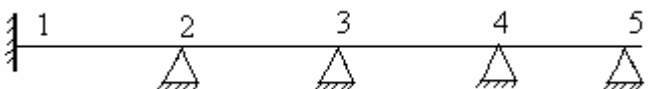
здесь  $J$  – момент инерции шины, определяемый по (2.4).

Параметры  $\lambda$  и  $\beta$  определяются методами строительной механики. Для простейших расчетных схем значения  $\beta$  и  $1/\lambda$  приведены в табл.2.3 и 2.4.

В табл.2.4, кроме параметра  $1/\lambda(z)$ , являющегося функцией координаты шины  $z$ , указаны наибольшие значения  $1/\lambda$  (минимальные значения  $\lambda$ ), при которых напряжения  $\sigma$  достигают максимума, а также координаты сечений наибольших и наименьших (равных нулю) по модулю напряжений.

Таблица 2.3.

Значения коэффициентов  $\beta$  при равномерно распределенной нагрузке

Расчетные схемы	Число пролетов $n$	Значение коэффициентов для опоры №						Расчетные значения
		1	2	3	4	5	6	
	1	0,5	0,5	-	-	-	-	0,5
	2	0,5	1	0,5	-	-	-	1,0
	$n \geq 3$	0,5	1	1	1	1	1	1,0
  	1	0,375	0,625	0	-	-	-	0,625
	2	0,375	1,25	0,375	-	-	-	1,25
	$n \geq 4$	0,375	1,25	0,75	1,25	0,75	1,25	1,25
  	1	0,5	0,5	-	-	-	-	0,5
	3	0,4	1,1	1,1	0,4	-	-	1,1
	4	0,39	1,14	0,93	1,14	0,393	-	1,14
	$n \geq 5$	0,39	1,13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0 (1,13)*

Примечание: для средних пролетов многопролетных конструкций  $\beta=1,0$

\* В скобках указано значение  $\beta$  для предпоследней опоры шинной конструкции.

Таблица 2.4.



### Параметры шинных конструкций

Шинная конструкция	Расчетная схема	Параметр основной частоты собственных колебаний* $r_1$	Параметр $1/\lambda(z)$	Наибольшее значение $1/\lambda$	Координаты сечения шины $z$		Жесткость шины $c_{ш}$	Параметр В
					наибольших напряжений	наименьших напряжений		
С разрезными шинами равными длине одного пролета	Балка с шарнирным опиранием на обеих опорах пролетах (рис.2.1, а)	3,14	$\frac{1}{2} \left  \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} \right $	1/8	$l/2$	0; $l$	$\frac{384EJ}{5 \cdot l^3}$	76,8
<b>С разрезными</b> шинами, равными длине двух пролетов	Балка с жестким опиранием на одной и шарнирным на другой опоре пролета (рис.2.1, б)*	3,92	$\left  \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \frac{z}{l} \right $	1/8	$l$	0; $3/4 l$	$\frac{185EJ}{l^3}$	185
Многопролетная конструкция с неразрезными шинами	Крайний пролет многопролетной балки (с шарнирным опиранием на первой опоре)*	4,73	$\left  0,394 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} \right $	1/9,5	$l$	0; $7/9 l$	-	-
	Второй пролет многопролетной балки*	4,73	$\left  0,529 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} - 0,106 \right $	1/9,5	0	0; $2/7 l$ 0; $7/9 l$	-	-
	Средние пролеты многопролетной балки (балка с жестким опиранием на обеих опорах пролета, рис. 2.1, в)	4,73	$\frac{1}{2} \left  \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} - \frac{1}{6} \right $	1/12	0; $l$	0,21l 0,79l	$\frac{384EJ}{l^3}$	384

\* Для конструкции с жесткими опорами

**2.3.2** Для шин, расположенных горизонтально, нагрузки от массы гололеда направлены перпендикулярно шинам (то есть в плоскости опор), являются статическими и считаются равномерно распределенными по длине шины и вычисляются по формуле

$$q_{\Gamma} = m_{\Gamma} g \gamma, \quad (2.21)$$

где  $m_{\Gamma}$  – расчетная масса гололедных отложений на единицу длины шины, кг/м;  
 $\gamma$  – коэффициент надежности нагрузки, рекомендуемый принимать равным 1,3.

Масса гололедных отложений на единицу длины шины согласно СНиП 2.01.07-85 и ПУЭ-7 определяется по формуле

$$m_{\Gamma} = \pi \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (D b_{\Gamma} + b_{\Gamma}^2) \cdot 10^{-6}, \quad (2.22)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – нормативная плотность гололеда 900 кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – диаметр шины, мм;

$b_{\Gamma} = b_{\Gamma} \cdot k_{\Gamma} \cdot k_d$  – расчетная толщина стенки гололеда, мм;

$b_{\Gamma}$  – нормированная толщина стенки гололеда на высоте 10 м над поверхностью земли, мм, (табл.2.5);

$k_{\Gamma}$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте, (табл. 2.6);

$k_d$  – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра шины (табл.2.7).

Нормированная толщина стенки гололеда определяют в соответствии с ПУЭ-7 [ п.2.5.46]

Таблица 2.5

Нормированная толщина стенки гололеда  $b_{\Gamma}$  на высоте 10 м над поверхностью земли

Гололедные районы России	I	II	III	IV	V	VI	VII	Особый
Толщина стенки гололеда в мм (согласно ПУЭ [1])	10	15	20	25	30	35	40	свыше 40

Таблица 2.6

Коэффициент, учитывающий изменения толщины стенки гололеда по высоте  $k_{\Gamma}$

Высота над поверхностью земли, м	5	10	20	30	50
Коэффициент	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6

Таблица 2.7

Коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда от диаметра шины  $k_d$

Диаметр шины, мм	30	50	70 и более
Коэффициент	0,8	0,7	0,6

Напряжения в шине и нагрузка на изоляторы от веса гололеда вычисляются по формулам (2.18) и (2.19), в которых принимают  $q = q_{\Gamma}$ , а  $m = m_{\Gamma}$ .

**2.3.3** Вес ответвлений  $P$  в расчет вводится в виде силы сосредоточенной в одной точке. Вес гибкого спуска принимают равной полному весу ответвления, а при расчете с учетом гололеда – весу ответвления при нормированной толщине стенки гололеда, определенного в соответствии с ПУЭ-7 и СНиП 2.01.07-85 и указаниями п.2.3.2.

Силу  $P$  от веса  $\Gamma$ -, П-образных и других жестких ответвлений определяют как сумму реакции в опорном сечении горизонтальной части ответвления  $F_{\Gamma}$  и веса вертикальной (наклонной) надставки  $P_{\text{н}}$

$$P = F_{\Gamma} + P_{\text{н}} \quad (2.23)$$

При расчете с учетом веса гололеда  $F_{\Gamma}$  и  $P_{\text{н}}$  определяют при нормативной толщине стенки гололедных отложений в соответствии с указаниями п. 2.3.2. Реакции  $F_{\Gamma}$  в опорных сечениях жестких ответвлений вычисляют по формулам (2.19).

Напряжение в материале шины от веса ответвления определяется как

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2.24)$$

где  $M$  – изгибающий момент, вызванный действием сосредоточенной силы и определяемый в соответствии с указаниями табл.2.8

Нагрузки на опоры, обусловленные весом ответвления в одном пролете указаны в табл.2.8. Если ответвления установлены в смежных пролетах, нагрузка на опору определяется как сумма реакций от сил тяжести ответвлений, отходящих слева и справа от опоры.

## 2.4 Особенности расчетов жесткой ошиновки на стойкость при воздействии динамических нагрузок

**2.4.1** Расчет на стойкость при воздействии нагрузок (ветровых, электродинамических) следует производить с учетом колебания ошиновки. Предварительно необходимо определить частоту собственных колебаний шин.

Первая (основная) частота собственных колебаний шины в горизонтальной ( $xoz$ ) или вертикальной ( $yoz$ ) плоскостях (рис.2.2) вычисляется по формуле

$$f_{1x(y)} = \frac{r_{1x(y)}^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}, \quad (2.25)$$

где  $l$  – длина пролета шины, м;

$m$  – масса шины на единицу длины равная массе шины  $m_{\text{ш}}$  (при расчете без учета гололеда) или сумме  $m_{\text{ш}} + m_{\Gamma}$  (с учетом гололеда), кг/м;

$E$  – модуль упругости материала шины (табл.2.2), Па;

$J$  – модуль инерции шины (2.4), м<sup>4</sup>;

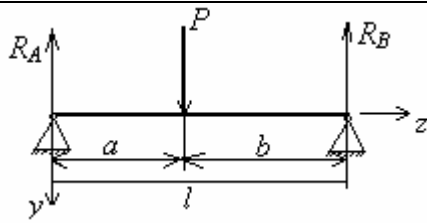
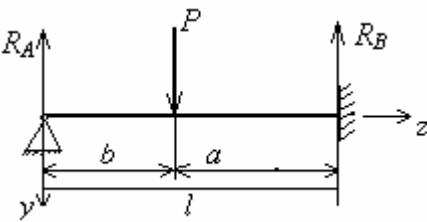
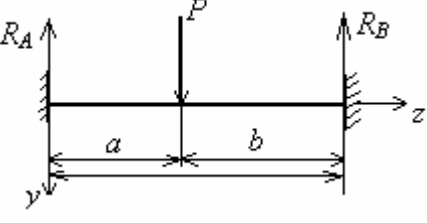
$r_{1x(y)}$  – параметр первой частоты собственных колебаний шины в соответствующей плоскости.

Для основных расчетных схем ошиновки с абсолютно жесткими (неподвижными) опорами (рис.2.1 в) значения  $r_1$  при колебании в любой плоскости инерции приведены в табл.2.4. Абсолютно жесткими можно принимать опоры, если их относительная жесткость  $c_{\text{оп}} l^3 / EJ$  (где  $c_{\text{оп}}$  – жесткость опоры в плоскости колебаний, Н/м) выше 3000-4000. Этому условию удовлетворяют

- все опоры при колебаниях шины в вертикальной плоскости (плоскости оси изоляторов  $yoz$ , рис.2.2);
- трехгранные (пирамидальные) шинные опоры (при колебаниях, как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях);
- как правило, опорно-штыревые изоляторы (без надставок) напряжением до 110 кВ с разрушающей нагрузкой более 20 кН и более.

Таблица 2.8

## Опорные реакции и изгибающие моменты от силы тяжести отклонения

Расчетная схема	Нагрузки на опоры (опорные реакции)	Изгибающий момент	Максимальный по модулю изгибающий момент	Координата опасного сечения
	$R_A = P \frac{b}{l}$ $R_B = P \frac{a}{l}$	$0 \leq z \leq a$ $M = P \frac{bz}{l}$ $a \leq z \leq l$ $M = P \frac{a}{l}(l-z)$	$ M_{\max}  = P \frac{ab}{l}$	$z_0 = \frac{ab}{l}$
	$R_A = \frac{P a^2}{2 l^2} \left( 3 - \frac{a}{l} \right)$ $R_B = \frac{P b}{2 l} \left( 3 - \frac{b^2}{l^2} \right)$	$0 \leq z \leq b$ $M = \frac{P a^2}{2 l^2} \left( 3 - \frac{a}{l} \right) z$ $b \leq z \leq l$ $M = Pa \left[ \frac{a z}{2 l^2} \left( 3 - \frac{a}{l} \right) - \frac{z-b}{a} \right]$	$ M'_{\max}  = \frac{Pa^2 b}{2 l^2} \left( 3 - \frac{a}{l} \right)$ $ M''_{\max}  = \frac{Pa b}{2 l^2} (l+b)$	$z'_0 = b$ $z''_0 = l$
	$R_A = P \frac{b^2(3a+b)}{l^3}$ $R_B = P \frac{a^2(3b+a)}{l^3}$	$0 \leq z \leq a$ $M = Pa \frac{b^2}{l^2} \left( \frac{3a+b}{al} z - 1 \right)$ $a \leq z \leq l$ $M = Pa \frac{b^2}{l^2} \left( \frac{3a+b}{al} z - \frac{l^2(z-a)}{b^2 a} - 1 \right)$	$ M'_{\max}  = P \frac{ab^2}{l^2}$ $ M''_{\max}  = 2P \frac{a^2 b^2}{l^3}$ $ M'''_{\max}  = P \frac{ba^2}{l^2}$	$z'_0 = 0$ $z''_0 = a$ $z'''_0 = l$

Для конструкций, не удовлетворяющих расчетным схемам (рис.2.1) частоту собственных колебаний можно определить методом Релея или другими методами. Наиболее характерные равнопролетные шинные конструкции приведены на рис.2.4 – 2.7.

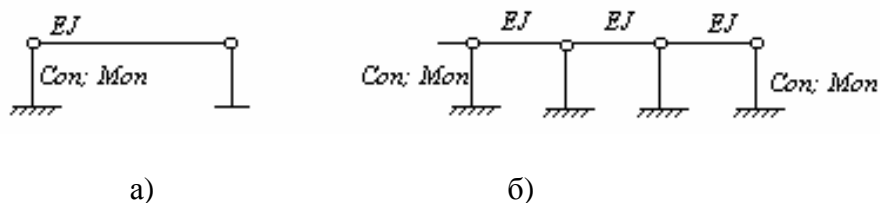


Рис.2.4 Расчетные схемы пролета шины на упругоподатливых опорах с шарнирным опиранием.

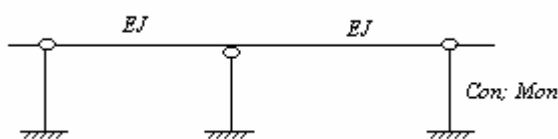


Рис. 2.5 Расчетная схема с неразрезными участками шины равными двум пролетам на упругоподатливых опорах.

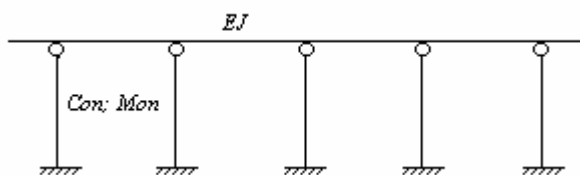


Рис. 2.6 Расчетная схема конструкции неразрезной многопролетной шиной с упругоподатливыми опорами

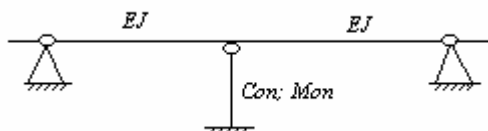
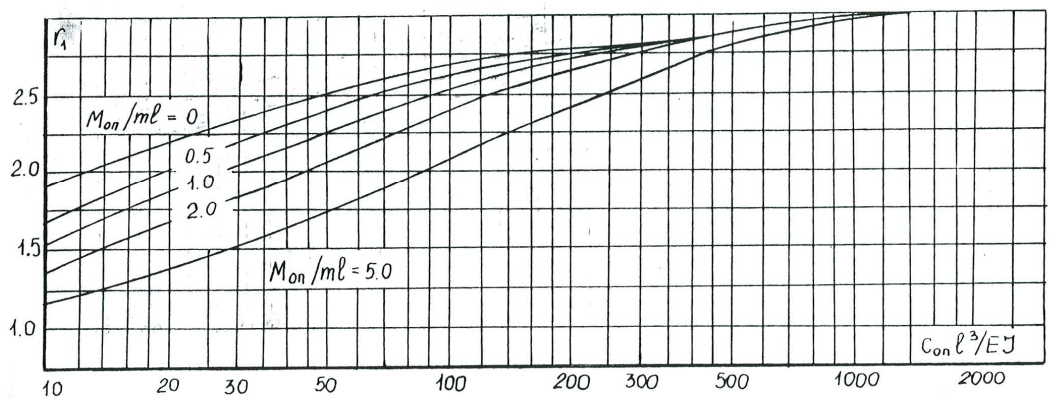


Рис. 2.7 Расчетная схема с неразрезными участками шины равными двум пролетам жестких крайних и с упругоподатливой средней опорой.

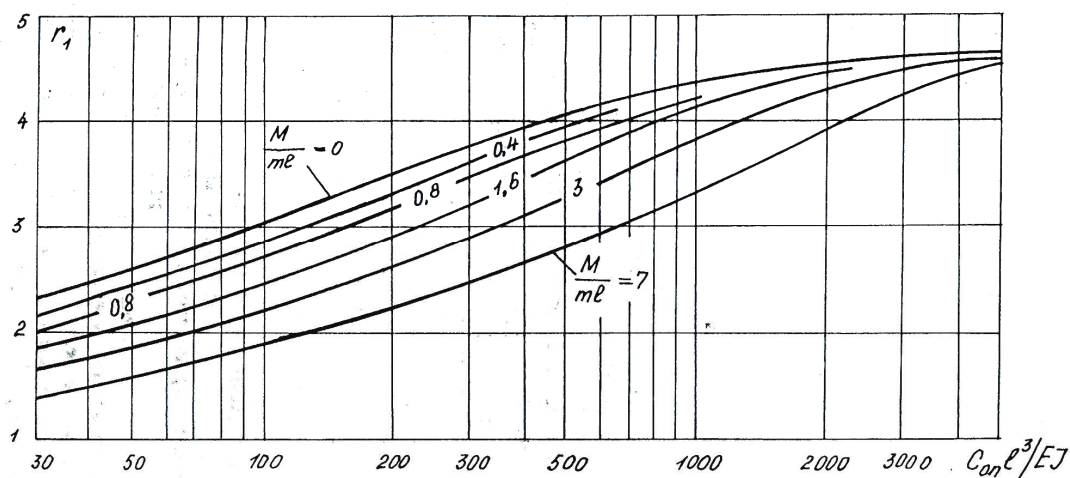
Расчетные схемы с упругоподатливыми опорами при высокой жесткости опор практически отвечают:

- схема рис. 2.4 – схеме рис.2.1, а;
- схема рис.2.5 и 2.7 – схеме рис.2.1, б;
- схема рис.2.6 – схеме рис.2.1, в.

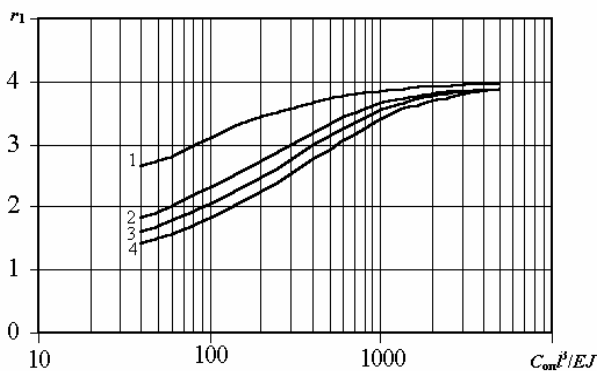
Зависимости параметра первой частоты собственных колебаний  $r_1$  для шинных конструкций, приведенных соответственно на рис.2.4 - 2.7, приведены на рис.2.8 (а - г). Кривые построены в зависимости от безразмерного параметра  $c_{оп} l^3 / E_{ш} J_{ш}$  при различных значениях отношения  $M_{оп} / m_{ш} l$  ( $M_{оп} / m_{ш} l = 0, 2, 4, 7$ ), где  $c_{оп}$  – жесткость опоры;  $M_{оп}$  – приведенная масса опоры, кг.



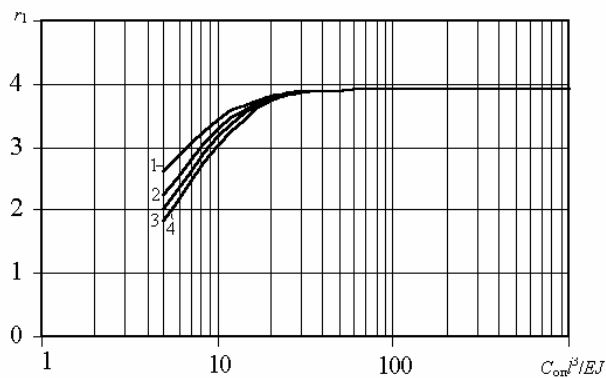
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.8 Зависимости параметров первой частоты собственных колебаний  $r_1$  системы шины – опоры (изоляторы) от  $c_{оп} l^3/EJ$  при различных значениях  $M_{оп}/m_l$ : а – конструкция с шарнирно опертой шиной (рис.2.4); б – конструкция с неразрезными многопролетными шиной (рис.2.6); в – конструкция с неразрезными участками шины равными двум пролетам на упругоподатливых опорах (рис.2.5); г) - конструкция с неразрезными участками шины равными двум пролетам с жесткими крайними и упругоподатливой средней опорой (рис.2.7), кривые (на рис. в) и г)): 1 -  $M_{оп}/m_{ш} l = 0$ ; 2 -  $M_{оп}/m_{ш} l = 2$ ; 3 -  $M_{оп}/m_{ш} l = 4$ ; 4 -  $M_{оп}/m_{ш} l = 7$ .

Экспериментально полученные значения жесткости при изгибе некоторых типов изоляторов (с учетом подвижности болтовых соединений, но без учета упругой податливости оснований) приведены в табл.2.9.

Таблица 2.9

Жесткость и частота собственных колебаний опорных изоляторов

Тип изолятора (опоры)	$c_{оп}$ , Н/м	$f_{оп}$ , Гц
ИО-35-3,75У3	110	-
ОНШ-35-20УХЛ1	7100	-
3хОНШ-35-20УХЛ1	290	15
ИОС-110-600УХЛ, Т1	1100	18
ИОС-110-1250УХЛ, Т1	1250	-
ИОС-110-2000УХЛ, Т1	2210	32

Жесткость составных опор при изгибе следует определять экспериментально по методике, приведенной в п.4.15 и [20,21], или приближенно вычислять аналитически. Жесткость опоры, состоящей из двух элементов (изоляторов) рекомендуется вычислять по формуле

$$c_{оп} = \frac{c_1 h_1^3}{(h_1 + h_2)^3 [\gamma_1 + (1 - \gamma_1) z^3]}, \quad (2.26)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – высота верхнего и нижнего элемента, м;

$c_1$  и  $c_2$  – жесткость верхнего и нижнего элемента, Н/м;

$\gamma_1 = c_1 / c_2$ ;  $z = h_1 / (h_1 + h_2)$ .

Если известна распределенная жесткость элемента  $EJ$  (например, вертикальной надставки), то жесткость  $c$  этого элемента в формуле (2.26) следует принять равной

$$c = 3EJ / h^3, \quad (2.27)$$

где  $E$ ,  $J$ ,  $h$  – модуль упругости, момент инерции и высота элемента.

Если опора состоит из  $n$  одинаковых изоляторов (элементов), то ее жесткость рекомендуется вычислять по формуле

$$c_{оп} = c_{из} / n^3, \quad (2.28)$$

где  $c_{из}$  – жесткость одного изолятора.

Приведенная сосредоточенная масса опоры равна

$$M_{оп} = \frac{c_{оп}}{(2\pi \cdot f_{оп})^2}, \quad (2.29)$$

где  $f_{оп}$  – первая (основная) частота собственных колебаний опоры (парциальная частота опоры), Гц.

Частота собственных колебаний опоры  $f_{оп}$  определяется экспериментально, для некоторых типов изоляторов она указана в табл.2.9.

Если неизвестна первая частота собственных колебаний опоры, то приведенную массу допускается определять по формуле

$$M_{оп} = M \left( \frac{H_{ц.т.оп}}{H_{ц.т.ш.}} \right)^2, \quad (2.30)$$

где  $M$  – масса опоры, кг;

$H_{ц.т.оп.}$  и  $H_{ц.т.ш.}$  – расстояния от основания опоры соответственно до центра тяжести опоры и центра тяжести шины, м.

Расстояние от основания до центра тяжести опоры равно

$$H_{\text{ц.т.оп}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i H_i}{M}, \quad (2.31)$$

где  $M_i$  – масса  $i$ -ого элемента (яруса) опоры, кг;

$M$  – масса всей опоры, кг;

$H_i$  – расстояние от основания опоры до центра тяжести  $i$ -ого элемента, м;

$n$  – количество ярусов опоры.

При расчете первой частоты собственных колебаний ошиновки с учетом гололедных отложений массу  $m$  в формуле (2.25), а также при определении параметра  $M_{\text{оп}}/ml$  следует принять равной сумме погонных масс шины  $m_{\text{ш}}$  и гололедных отложений  $m_{\text{г}}$ . Другие параметры в (2.25), кроме  $r_1$ , остаются без изменений.

**2.4.2** В ряде случаев расчет на стойкость при динамических нагрузках необходимо проверять с учетом рассеяния энергии при колебаниях, которое характеризуется декрементом затухания. Логарифмический декремент затухания  $\delta$  определяют экспериментально (см.п.4.15) при испытании шинных конструкций со штатными шинодержателями, надставками, изоляторами, поддерживающими опорами и гасителями вибрации.

Значения логарифмического декремента колебаний для некоторых конструкций заводского изготовления приведены в табл.2.10. Следует учитывать, что логарифмический декремент существенно зависит от конструкции шинодержателей и типа опоры. С увеличением длины пролета логарифмический декремент затухания снижается.

## 2.5 Расчет на ветровую стойкость

**2.5.1** Ветровую нагрузку следует рассматривать как сумму ее средней (статической) и пульсационной (переменной) составляющих.

Статическая ветровая нагрузка,  $H$ , определяется по формуле.

$$q_{\text{в}} = 0,5 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_x \cdot D_{\text{эк}} \cdot \bar{V}_h^2 = c_x \cdot D_{\text{эк}} \cdot \bar{w}_h, \quad (2.32)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, принимаемая равной  $1,23 \text{ кг/м}^3$ ;

$c_x$  – аэродинамический коэффициент (нормативный коэффициент лобового сопротивления);

$D_{\text{эк}}$  – эквивалентный диаметр шины, м;

$\bar{V}_h$  – средняя скорость ветра на высоте расположения шины над поверхностью земли  $h$ , м/с;

$\bar{w}_h$  – значение средней составляющей ветрового давления на высоте  $h$ , Па.



Таблица 2.10

## Логарифмические декременты затухания шинных конструкций 110-220 кВ

Плоскость колебания	Тип ошиновки	Вид опоры	Шинодержатель	Демпфирующие устройство	Диаметр шины, мм	Толщина стенки шины, мм	Длина пролета шины, м	Логарифмический декремент затухания
Горизонтальная	КРУБ-110	Вертикальная надставка ИОС-110-2000 на стальной раме	Скоба из круглого прутка	Стальной пруток 4 – 6 мм	100	4,5	9	0,4-0,6
	110 кВ (на базе КРУБ)	ИОС-110-1250 на жестком основании	То же	Без демпфера	100	4,5	9	0,08-0,18
	То же	То же	То же	То же	100	4,5	9	0,2-0,3
	Заводского изготовления (разр.ЭСП) 110кВ	ИОС-110-600 ИОС-110-2000 или ЗхОНШ-35-2000 на жестком основании	То же	Без демпфера	90	5	9	0,4-0,6
	КРУБ -220	ИОС-110-2000 или ЗхОНШ-35-2000 на жестком основании	Литой шинодержатель	То же	100	4,5	9	0,1-0,3
Вертикальная	КРУБ –110	А-образная надставка и две ШО-220 на стальной раме	Две скобы из круглого прутка	Стальной пруток 4-6 мм	100	4,5	9	0,1-0,3
	КРУБ –110	Вертикальная надставка на опорном изоляторе или без вертикальной надставки	Скоба из круглого прутка	Стальной пруток 4-6 мм	100	4,5-5,0	9	0,05-0,23
	КРУБ-110	То же	То же	Без демпфера	100	4,5	9	0,012-0,04
	КРУБ-220	А-образная надставка на изоляционной опоре	То же	То же	100	4,5	12,6	0,015-0,04
	КРУБ-220	То же	Скоба из круглого прутка	То же	110	5	12,5	0,07-0,11
			Две скобы из круглого прутка	Стальной пруток 4-8 мм	110	5	12,5	0,075-0,1
				Два стальных прутка 4 мм 5-8 мм	110	5	12,5	0,09-0,14

Аэродинамический коэффициент  $c_x$  определяется в соответствии с указаниями СНиП 2.01.07-85 по кривым (рис.2.9) в зависимости от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\bar{V}_h \cdot D}{\nu}, \quad (2.34)$$

где  $\nu$  – кинетическая вязкость воздуха, принимаемая в расчетах равной  $14,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

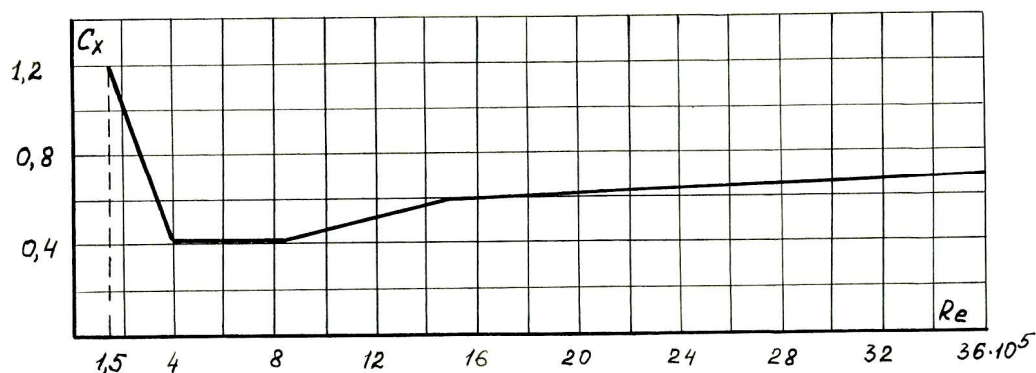


Рис. 2.9 Нормативный коэффициент лобового сопротивления круглого цилиндра.

Эквивалентный диаметр шины  $D_{эк}$  при расчете без учета гололеда принимается равным фактическому диаметру  $D$ , а с учетом гололеда вычисляется по формуле

$$D_{эк} = D + 2b_p, \quad (2.33)$$

где  $b_p$  – расчетная толщина стенки гололеда (п.2.3.2).

Средняя скорость ветра, а также ветровое давление на высоте  $h$  вычисляется по формулам:

$$\bar{V}_h = \sqrt{K_w} \bar{V}_0 \quad (2.35a)$$

$$\bar{w}_h = K_w \bar{w}_0, \quad (2.35б)$$

где  $\bar{V}_0$  и  $\bar{w}_0$  – нормативные скорость ветра и ветровое давление на уровне 10 м над поверхностью земли в зависимости от ветрового района;

$K_w$  – коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра (ветрового давления) по высоте.

Нормативные ветровое давление и скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли согласно ПУЭ-7 приведены в табл.2.11.

Таблица 2.11

Нормативные ветровое давление и скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли

Район по ветру	Нормативное ветровое давление $W_0$ , Па	Нормативная скорость ветра $V_0$ , м/с
I	400	25
II	500	29
III	650	32
IV	800	36
V	1000	40
VI	1250	45
VII	1500	49
Особый	Выше 1500	Выше 49

Коэффициент  $K_w$ , учитывающий изменения скорости ветра и ветрового давления по высоте  $h$ , определяется в зависимости от типа местности, расположения ОРУ (см. табл. 2.12). Различают три типа местности:

А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи и тундра;

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой от 10 до 25 м;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 10 м.

ОРУ считается расположенным в местности данного типа, если эта местность простирается с наветренной стороны на расстоянии  $30 h$  (над поверхностью земли) от ошиновки.

Таблица 2.12

Коэффициенты, учитывающие изменение скорости ветра и ветрового напора по высоте

Высота над поверхностью земли $h$ , м	Коэффициенты $K_w$ для типов местности		
	А	В	С
5	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0

Пульсационная (переменная) составляющая ветровой нагрузки, а также скорость и давление ветра в пролете жесткой шины принимаются неизменными по фронту и считаются стационарными случайными функциями времени.

**2.5.2** Ожидаемые напряжения в материале шины,  $P_a$ , и нагрузки на изоляторы,  $N$ , с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки определяются по формулам

$$\sigma_{\max}(z) = \bar{\sigma}(z) \eta_B; \quad (2.36a)$$

$$F_{\max} = \bar{F} \eta_B, \quad (2.36b)$$

где  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{F}$  – напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы, обусловленные средней ветровой нагрузкой и вычисляемые по формулам (2.18, 2.19), в которых  $q = \bar{q}$ ;

$\eta_B$  – динамический коэффициент при ветровых нагрузках равный

$$\eta_B = 1 + \xi_B V^{1/3}. \quad (2.37)$$

Параметр динамичности  $\xi_B$  следует принимать  $0,3(\text{м/с})^{-1/3}$ , если первая (основная) частота собственных колебаний в горизонтальной плоскости  $f_{1x} > 5$  Гц или определять по кривым (рис.2.10) если частота  $f_{1x} \leq 5$  Гц. Параметр динамичности  $\xi_B$  (рис.2.10) определяется в зависимости от значений первой собственной частоты колебания ошиновки  $f_{1x}$ , логарифмического декремента затухания  $\delta_x$ , при колебаниях в горизонтальной плоскости, которые находятся в соответствии с указаниями п. 2.4.2.

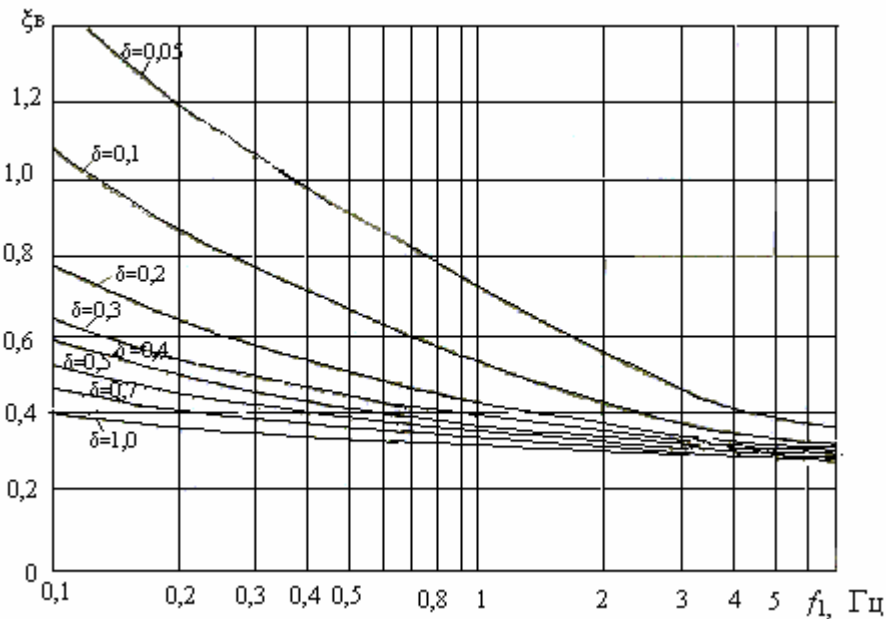


Рис 2.10 Зависимость параметра динамичности при ветровых нагрузках от значений первой собственной частоты при различных логарифмических декрементах затухания

В РУ 150 кВ и выше следует учитывать ветровые нагрузки, действующие на изоляторы. В этом случае результирующие силы, действующие на изоляторы, приближенно определяются по формуле

$$F_{\max} \approx \left( \bar{F} + \Delta \bar{F} \right) \eta_{\text{в}}. \quad (2.38)$$

Поправка  $\Delta \bar{F}$ , обусловленная воздействием ветрового потока на изоляционную опору, равная

$$\Delta \bar{F} \approx \bar{q}_{\text{в,из}} H / 2, \quad (2.39)$$

где  $H$  – высота изоляционной опоры, м;

$\bar{q}_{\text{в,из}}$  – средняя (статическая) ветровая нагрузка на опору, Н/м, которая составляет

$$\bar{q}_{\text{в,из}} \approx \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} c_{\text{х,из}} d_{\text{из}} \bar{V}_h^2; \quad (2.40)$$

здесь  $d_{\text{из}}$  – характерный размер, равный среднему арифметическому наибольшего и наименьшего диаметра фарфорового тела изоляторов (опоры), м;

$c_{\text{х,из}}$  – коэффициент лобового сопротивления изолятора, определяемый по кривым (рис.2.9) в зависимости от числа Рейнольдса.

### 2.5.3 Наибольший прогиб шинной конструкции при ветре равен

$$y_{\max} = \frac{\bar{q}_{\text{в}} l}{c_{\text{ш}}} \eta_{\text{в}} + \frac{F_{\max}}{c_{\text{оп}}}, \quad (2.41)$$

где  $c_{\text{ш}}$  – жесткость шины, Н/м, указанная в табл.2.1;

$c_{\text{оп}}$  – жесткость опоры, Н/м;

$F_{\max}$  – нагрузка, действующая на опоры (изоляторы) при ветре, Н, определяемая по формуле (2.36 б), (2.38).

Если опоры считаются абсолютно жесткими, второе слагаемое в уравнении (2.41) следует принять равным нулю.

## 2.6 Проверка жесткой ошиновки на ветровой резонанс

**2.6.1** Жесткие трубчатые шины подвержены вихревому возбуждению, т.е. ветровым резонансным колебаниям поперек воздушного потока (в вертикальной плоскости), обусловленными периодическими срывами вихрей. Скорость ветра при устойчивых резонансных колебаниях шин лежит в пределах

$$k_1 V_s \leq V \leq k_2 V_s, \quad (2.42)$$

где  $V_s = D \cdot f_{1y} / Sh$  - Струхалевская скорость ветра, м/с;

$Sh \approx 0,2$  – число Струхалия;

$D$  – внешний диаметр шины, м;

$f_{1y}$  - первая (основная) частота собственных колебаний шины в вертикальной плоскости, Гц;

$k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, определяющие область скоростей ветра при устойчивых резонансных колебаниях. Значения коэффициентов  $k_1$  составляют 0,7-1,0, а  $k_2$  – 1,0 – 1,3.

Частота собственных колебаний шин в вертикальной плоскости вычисляется по формуле (2.25). При этом опоры шин принимают абсолютно жесткими, а параметр первой частоты собственных колебаний  $r_1$  определяют согласно указаниям табл. 2.4.

Ветровые вибрации оказывают отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, приводит к ослаблению болтовых соединений (а, следовательно, повышает вероятность отказа ошиновки), а в ряде случаев вызывают усталостные повреждения в элементах конструкции. Поэтому ветровые резонансы должны быть конструктивно устранены.

Устойчивые (стабилизированные) ветровые резонансные колебания шин не наступают, если наибольший прогиб шин при периодическом срыве воздушных вихрей с резонансной частотой  $y_{p,max}$  не достигает допустимых значений  $y_{p,доп}$ , т.е.

$$y_{p,max} \leq y_{p,доп}. \quad (2.43 а)$$

Успешная отстройка от резонансных колебаний в критериальной форме отвечает неравенству

$$y_{*p,max} \leq y_{*p,доп}, \quad (2.43б)$$

где  $y_{*p,max} = y_{p,max} / D$  - относительный максимальный расчетный прогиб шины при резонансных ветровых колебаниях, м;

$D$  - внешний диаметр шины, м;

$y_{*p,доп} = y_{p,доп} / D$  - относительный допустимый прогиб шины при вихревых возбуждениях, равный 0,02 для шин диаметром 250 мм и больше; 0,04 - для шин диаметром 90-150 мм.

Ошиновку на ветровой резонанс следует проверять без учета гололедных отложений.

**2.6.2** Расчет наибольших прогибов шин при ветровых возбуждениях следует проводить на основе расчета колебаний балки на абсолютно жестких (неподвижных) опорах с жестким или шарнирным опиранием (рис.2.1) с учетом рассеяния энергии. Ветровые нагрузки принимают гармоническими функциями времени и функциями амплитуд колебаний балки шины.

Допускается:

- а) мгновенные значения нагрузки принимать в виде кусочно-постоянной функции координаты пролета шины;
- б) амплитуды кусочно–постоянной (по длине пролета) нагрузки на каждом интервале считать функциями амплитуды колебаний только одной точки, например, находящейся в середине интервала;
- в) не учитывать зависимость декремента затухания ошиновки от амплитуды колебания, а принимать равным значению, соответствующему амплитуде колебаний шины близкой к  $u_{p,доп}$ ;
- г) считать скорость ветра равной Струхалевской скорости, т.е. принять  $k_2 = 1,0$ ;
- д) не учитывать влияние высших частот колебания и проводить расчеты только для первой (основной) частоты.

**2.6.3** Приближенно наибольший расчетный прогиб шины при ветровых резонансах допускается определять по формуле

$$y_{p, \max} = \frac{c_{y0} \cdot \rho_v \cdot D^3 \cdot r_{1y}^4 \cdot k_2^2}{m \cdot B \cdot \delta_y}, \quad (2.44a)$$

или 
$$y_{p, \max} \approx 1,08 \frac{\rho_v D^3}{m \delta_y}, \quad (2.44б)$$

где  $c_{y0}$  - коэффициент аэродинамических нагрузок (коэффициент подъемной силы), который рекомендуется принять равным 0,8;

$\rho_v$  - плотность воздуха, указанная в табл.1.4, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  - внешний диаметр шины, м;

$r_{1y}$  – параметр первой частоты собственных колебаний шины (в вертикальной плоскости);

$k_2$  - коэффициент верхней границы резонансной скорости ветра (см.п. 2.5.1);

$m$  - масса шины на единицу длины, кг/м;

$B$  - коэффициент пропорциональный жесткости шины, приведенный в табл.2.4.

$\delta_y$  – логарифмический декремент затухания при колебании шины в вертикальной плоскости, определяемый в соответствии с указаниями п.2.4.2;

Плотность воздуха определяют при средней зимней температуре. Если температура неизвестна,  $\rho_v$  допускается принять равной 1,35 кг/м.

**2.6.4** Наибольшие напряжения в материале шин, Па, и нагрузки на изоляторы, Н, приближенно равны

$$\sigma_{p, \max} = \frac{c_{ш} \cdot l^2}{\lambda \cdot W} y_{p, \max}, \quad (2.45)$$

$$F_{p, \max} = \beta c_{ш} y_{p, \max}. \quad (2.46)$$

При наличии устройств подавления резонансных колебаний, напряжения шины и нагрузки на опоры при ветровых возбуждениях невелики и при расчете на прочность шинной конструкции могут не учитываться.

### 3 Электродинамическая стойкость шинных конструкций

#### 3.1 Расчет электродинамических нагрузок

**3.1.1** Электродинамические нагрузки (ЭДН), возникающие при КЗ, определяются при следующих допущениях:

- проводники (шины) считаются нитевидными;
- при пересечении токоведущих шин (т.е. в конструкциях с ответвлениями и поворотами) на расстояниях менее диаметра шины от точки пересечения осей этих проводников ЭДН принимаются равными 0;
- периодическая составляющая тока КЗ считается незатухающей;
- расчетным видом КЗ является трехфазное, а в конструкциях с ответвлениями и поворотами – двух или трехфазное, в зависимости от того, какое из них приводит к возникновению больших нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шины;
- расчетным является угол включения тока КЗ, при котором ЭДН достигают наибольшего значения.

**3.1.2** Электродинамические нагрузки, Н/м, действующие в многопролетных конструкциях с параллельными шинами, расположенными в одной плоскости (за исключением крайних пролетов, а также пролетов с поворотами), равны

$$q(\psi, t) = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} \cdot I_m^2 \cdot \sum_{n=1}^6 D_n(\psi) \cdot T_n(t), \quad (3.1)$$

где  $2 \cdot 10^{-7}$  – параметр, Н/А<sup>2</sup>;

$a$  – расстояние между фазами, м;

$I_m = \sqrt{2} I_{п0}$  – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А;

$I_{п0}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ, кА;

$D_n$  – функции, зависящие от угла включения тока КЗ;

$T_n$  – функции времени  $t$ , равные:

$$T_1=1; \quad T_2 = e^{-2t/T_a}; \quad T_3 = e^{-t/T_a} \sin \omega t; \quad T_4 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \quad T_5 = \sin 2\omega t; \quad T_6 = \cos 2\omega t, \quad (3.2)$$

здесь  $T_a$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с;

$\omega=2\pi \cdot 50$  - угловая частота тока в сети, рад/с.

Значения коэффициентов  $D_n$  при расчетных углах включения, при которых ЭДН достигает наибольшего значения, приведены в табл.3.1

Таблица 3.1

Значения коэффициентов  $D_n$  при расчетных углах включения тока КЗ

Вид КЗ	Фаза	Значения $D_n$ при $n$ , равных					
		1	2	3	4	5	6
Двухфазное	-	0,5	1	-2,0	0	0,5	0
Трехфазное	А, С	0,375	0,808	-1,616	0	0,433	0
	В	0	0,866	-1,732	0	0,866	0

Максимальные значения ЭДН при двух- и трехфазном КЗ определяются по формуле

$$q_{\max} = \frac{\alpha}{a} I_m^2 \max \sum_{n=1}^6 D_n T_n = \frac{\alpha}{a} i_{уд}^2, \quad (3.3)$$

где  $i_{уд} = k_{уд} I_m$  - ударный ток трехфазного КЗ, А;

$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a}$  - ударный коэффициент;

$\alpha$  – параметр, равный  $\sqrt{3} \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> при трехфазном КЗ и  $2 \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup> при двухфазном КЗ.

**3.1.3** При произвольном расположении трехфазной системы шин (в том числе при наличии поворотов и ответвлений) расчет ЭДН рекомендуется проводить на ЭВМ.

В произвольной точке с номером  $j$  ЭДН равна

$$\bar{q}_j = i_j \sum_{k=1}^K \left[ \bar{l}_{j0} \times \bar{B}_{kj} \right], \quad (3.4)$$

где  $K$  – количество прямолинейных участков шин;

$j, k$  - номера этих участков;

$i_j$  – мгновенное значение тока в проводнике с номером  $j$ ;

$\bar{l}_{j0}$  - единичный вектор, совпадающий с выбранным направлением тока  $i_j$ ;

$\bar{B}_{kj}$  - вектор магнитной индукции от тока в  $k$ -ом проводнике на оси  $j$ -ого проводника.

Токи КЗ равны

$$i_k = I_{mk} \left\{ \sin \left[ \omega t + \varphi - \frac{2}{3} \pi (p-1) \right] - e^{-t/T_a} \sin \left[ \varphi - \frac{2}{3} \pi (p-1) \right] \right\}, p=1,2,3, \quad (3.5)$$

где  $I_{mk}$  - амплитуда периодической составляющей тока КЗ в  $k$ -ом проводнике, А;

$\varphi$  – угол включения тока КЗ, рад;

$T_a$  - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с;

$p$  - параметр, равный 1 при двухфазном КЗ и для фазы А при трехфазном; 2 и 3 – при трехфазном КЗ для фаз В и С.

Магнитная индукция определяется как

$$\bar{B}_{kj} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_k \int_{l_k} \frac{\left[ \bar{l}_{k0} \times \bar{r}_{kj} \right]}{r_{kj}^3} dl_k, \quad (3.6)$$

где  $l_k$  – длина  $k$ -ого проводника;

$\bar{l}_{k0}$  - единичный вектор, совпадающий по направлению с током  $i_k$ ;

$\bar{r}_{kj}$  - радиус – вектор, направленный от точки на  $k$ -ом проводнике к расчетной точке на  $j$ -ом проводнике, модуль которого равен расстоянию между этими точками.

Если шины расположены в одной плоскости, ЭДН действуют в этой плоскости. Если шины (в том числе ответвления) расположены в разных плоскостях, ЭДН следует определять в виде проекций  $q_x$  и  $q_y$  на ортогональные плоскости  $xoz$  и  $yoz$  (рис.2.2)

Проекции ЭДН приводятся к виду

$$q_{jw}(z, t, \varphi) = \frac{\mu_0}{4\pi a} I_{mj}^2 \sum_{n=1}^6 Z_{nm}(z, \varphi) T_n(t), \quad (3.7)$$

где  $w = 1, 2$  – индекс, соответствующий координатам  $x$  или  $y$  (для проекции ЭДН на плоскости  $xoz$  и  $yoz$ );

$a$  – минимальное расстояние между фазами, м;

$I_{mj}$  - амплитуда периодической составляющей тока КЗ в  $j$ -ом проводнике;

$Z_{nm}$  - функция координаты шины  $z$  и угла включения тока КЗ  $\varphi$ ;

$T_n$  - функции времени (3.2).



При расчетах на прочность (стойкость) проекции ЭДН допускается считать кусочно-линейными функциями координаты шины  $z$ . В этом случае на каждом прямолинейном участке шины проекции ЭДН или функции  $Z_{nm}$  определяют по указанным формулам в ограниченном числе точек  $k$  с координатами  $z_0, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k$ . В других точках шины функции  $Z_{nm}$  определяются по формуле

$$Z_{nw} = A_{nwsz} + B_{nws}, \quad s=1,2,\dots,k, \quad (3.8)$$

где 
$$A_{nws} = \frac{Z_{nw}(z_s) - Z_{nw}(z_{s-1})}{z_s - z_{s-1}};$$

$$B_{nws} = Z_{nw}(z_s) - A_{nws}z_{s-1}.$$

Число точек разбиения  $k$  считается достаточным, если результаты расчетов на электродинамическую стойкость (прочность) при удвоении числа точек разбиения  $2k$  отличаются не более чем на 5%.

**3.1.4** Если частота собственных колебаний шины с учетом упругой податливости опор (п.2.4.1) менее 10 Гц при расчетах шинных конструкций на электродинамическую стойкость допускается не учитывать периодические составляющие ЭДН ( $T_3, T_4, T_5, T_6$ ) [24]. Кроме того, для упрощения расчетов аperiodическую составляющую допускается заменять постоянной составляющей с эквивалентным аperiodической составляющей импульсом за полупериод колебаний. В этом случае эквивалентная электродинамическая нагрузка определяется по формуле

$$q = \frac{\alpha}{a} I_m^2 (D_1 + \Delta D), \quad (3.9)$$

где  $D_1$  – коэффициент временной составляющей  $T_1$  электродинамической нагрузки (значения которого для параллельных шин расположенных в одной плоскости указаны в табл.3.1);

$\Delta D$  – коэффициент пропорциональный импульсу и аperiodической составляющей, равный

$$\Delta D = T_a D_2 f_1 (1 - e^{-1/(f_1 T_a)}), \quad (3.10)$$

где  $D_2$  – коэффициент временной составляющей  $T_2$  ЭДН;

$f_1$  – первая частота собственных колебаний шины (п.2.4.1.).

## **3.2 Расчет на электродинамическую стойкость конструкций с параллельными шинами, расположенными в одной плоскости**

### **3.2.1 Принимаемые допущения**

а) Шина рассматривается как балка с распределенной по длине массой. Опоры шин принимают упругоподатливыми, а в ряде случаев (указанных в п 2.4.1) абсолютно жесткими.

б) Если высота упругой опоры не превышает 20% длины пролета шины, считают, что опоры обладают сосредоточенной эквивалентной (приведенной) массой  $M_{оп}$  и жесткостью  $c_{оп}$ . Если опоры не отвечают указанным требованиям, расчет электродинамической стойкости шинной конструкции следует проводить в соответствии с рекомендациями п.3.3.

в) В расчетах не учитываются резонансы высших форм собственных колебаний с периодическими составляющими ЭДН. Наибольшие напряжения в материале шины, нагрузки на изоляторы и прогибы конструкции допускается определить на основе решения статической задачи (при воздействии максимума ЭДН) и корректировать решение с

помощью динамического коэффициента, определенного на основе расчета колебаний системы с одной степенью свободы, т.е.

$$\sigma_{\max}(z) = \sigma_{\text{ст}}(z)\eta; \quad (3.11a)$$

$$F_{\max} = F_{\text{ст}}\eta; \quad (3.11б)$$

$$y_{\max} = y_{\text{ст. max}}\eta, \quad (3.11в)$$

где  $\sigma_{\text{ст}}$ ,  $F_{\text{ст}}$ ,  $y_{\text{ст. max}}$  - статические напряжения, нагрузки и прогибы;  
 $\eta$  – динамический коэффициент.

г) При расчетах электродинамической стойкости вне резонансных областей шин, а также без учета повторного включения на КЗ, рассеяние энергии при колебаниях шинных конструкций можно не учитывать и декремент затухания принимать равным 0.

### 3.2.2 Порядок расчета электродинамической стойкости ошиновки.

Согласно (2.4) и (2.20) вычисляются момент инерции  $J$  и момент сопротивления  $W$ .

В соответствии с указаниями п.2.4.1 определяют жесткость  $c_{\text{оп}}$  и приведенную массу опоры  $M_{\text{оп}}$ , а также параметр частоты собственных колебаний  $r_1$ .

По формуле (2.25) находят основную частоту собственных колебаний шины  $f_1$ . По кривым (рис.3.1.) в зависимости от частоты  $f_1$  и постоянной времени  $T_a$  определяют динамический коэффициент  $\eta$ .

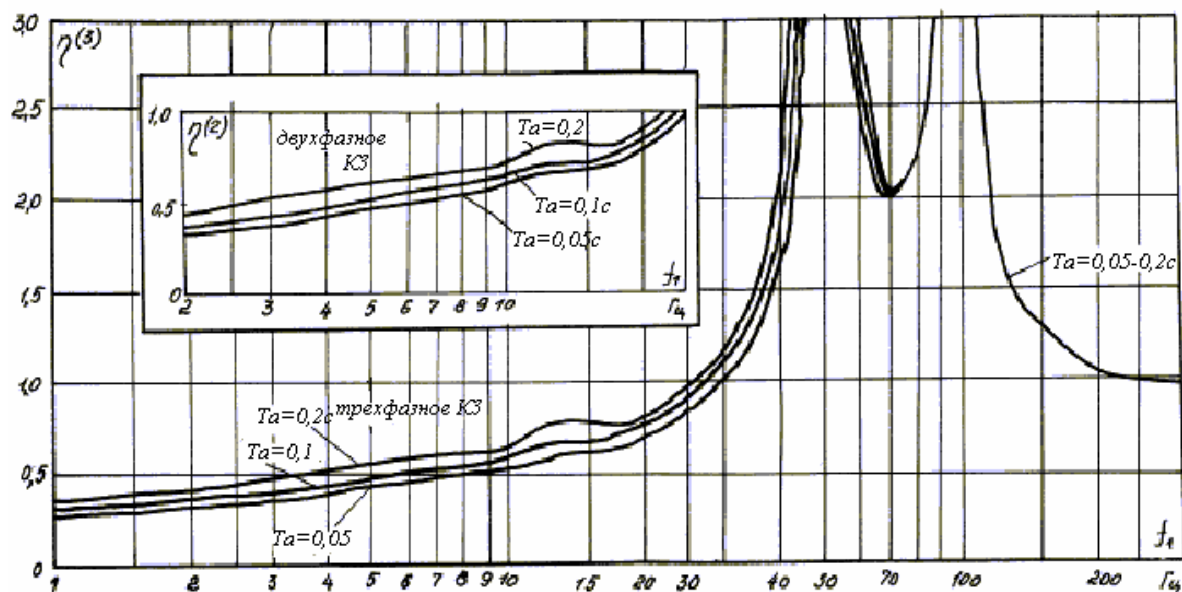


Рис. 3.1 Динамический коэффициент при двух- и трехфазном КЗ

Вычисляют наибольшие напряжения в материале шины, Па, максимальные нагрузки на изоляторы, Н, и прогибы шинной конструкции, м, по формулам

$$\sigma_{\max}(z) = \frac{q_{\max} l^2}{\lambda(z)W} \eta = \frac{al^2}{\lambda(z)aW} i_{\text{уд}}^2 \eta, \quad (3.12)$$

$$F_{\max} = \beta \cdot q_{\max} l \eta = \beta \frac{\alpha \cdot l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta, \quad (3.13)$$

$$y_{\max} = \frac{q_{\max} l}{c} \eta = \frac{\alpha \cdot l}{a \cdot c} i_{\text{уд}}^2 \eta, \quad (3.14)$$

где  $\alpha$  - параметр, определяемый согласно указаниям п.3.1.2,

$q_{\max}$  - наибольшее значение электродинамической нагрузки при трехфазном КЗ в системе параллельных шин, расположенных в одной плоскости (3.3);

$\beta$  и  $\lambda$  – параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы и пролета (табл.2.3, 2.4);

$$c = \frac{c_{\text{ш}} \cdot c_{\text{оп}}}{c_{\text{ш}} + c_{\text{оп}}} - \text{жесткость шинной конструкции, Н/м;}$$

$c_{\text{ш}}$  – жесткость шины (табл.2.1).

Если опоры абсолютно жесткие, жесткость конструкции  $c$  следует принять равной жесткости шины  $c_{\text{ш}}$ .

### 3.2.3 Расчет шинных конструкций при повторных включениях на КЗ.

В системах с быстродействующими АПВ следует проводить расчет электродинамической стойкости при повторных включениях на КЗ. В расчетах на электродинамическую стойкость при неуспешных АПВ необходимо учитывать рассеяние энергии при колебаниях шинных конструкций.

Наибольшие напряжения в шине, нагрузки на изоляторы, а также прогибы конструкций при повторных включениях на КЗ не превышают соответствующих значений при первом КЗ, если продолжительность бестоковой паузы,  $s$ , составляет

$$t_{\text{БП}} \geq \frac{2,3}{f_1 \cdot \delta_x}, \quad (3.15)$$

где  $f_1$  – первая (основная) частота собственных колебаний ошиновки, Гц;

$\delta_x$  – логарифмический декремент затухания при горизонтальных колебаниях шин.

Если условие (3.13) не выполняется, то наибольшие напряжения на шинах, максимальные нагрузки на изоляторы и наибольшие прогибы конструкции при неуспешных АПВ определяются по формулам:

$$\sigma_{\max}(z) = \sigma_1(z) \theta = \frac{\alpha \cdot l^2}{\lambda(z) a W} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta; \quad (3.16)$$

$$F_{\max} = F_{1\max} \theta = \beta \frac{\alpha \cdot l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta; \quad (3.17)$$

$$y_{\max} = y_{1\max} \theta = \frac{\alpha \cdot l}{a \cdot c} i_{\text{уд}}^2 \eta \theta, \quad (3.18)$$

где  $\sigma_1(z)$ ,  $F_{1\max}$ ,  $y_{1\max}$  - наибольшие напряжения, нагрузки и прогибы при первом КЗ, вычисленные по (3.12)-(3.14);

$\theta$  - коэффициент превышения напряжения, нагрузок и прогибов при повторных КЗ.

Коэффициент превышения  $\theta$  определяется по кривым (рис.3.2.a) в зависимости от декремента затухания  $\delta_x$ . Номер расчетной кривой на рис. 3.2.a определяется в зависимости

от продолжительности бестоковой паузы  $t_{БП}$  и частоты собственных колебаний шины в соответствии с монограммой (рис.3.2.б).

Если точка с координатами  $t_{БП}$  и  $f_1$  (рис.3.2.б) лежит в зоне I (ограниченной осями координат и кривой 1), то коэффициент  $\theta$  определяется по кривой I на рис 3.2,а. Если эта точка лежит в зоне II (ограниченной кривыми 1 и 2, рис.3.2.б), то  $\theta$  соответственно определяется по кривой II и т.д.

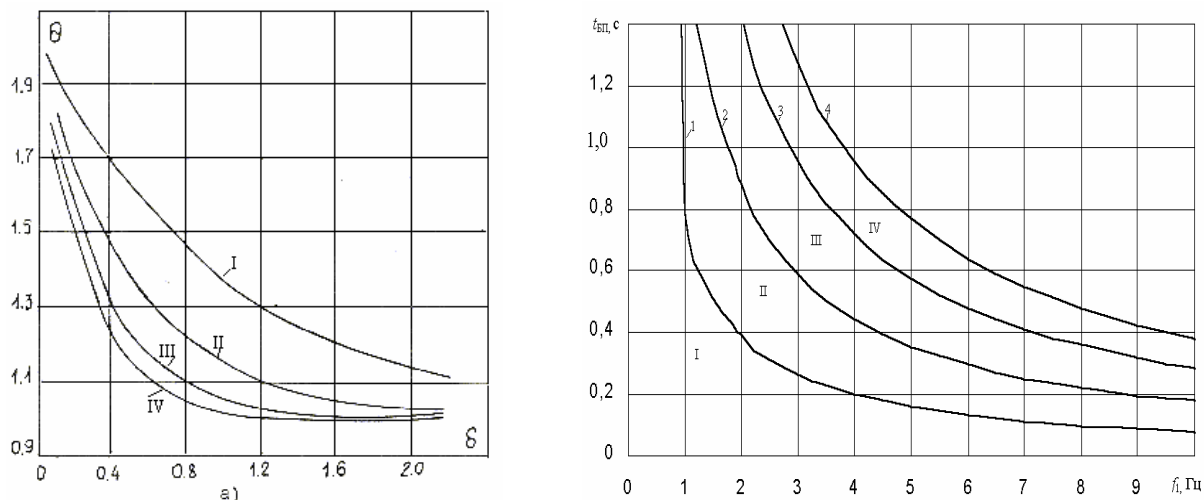


Рис. 3.2 К определению коэффициента превышения

Следует отметить, что расчетные коэффициенты  $\theta$  (рис.3.2.) получены при наиболее неблагоприятных условиях коммутации, которые приводят при первом КЗ, в бестоковую паузу и повторном включении на КЗ к наибольшим напряжениям в материале шин, нагрузкам на изоляторы и прогибам шинной конструкции и таким образом обеспечивают оценку сверху электродинамической стойкости ошиновки.

### 3.3 Расчет электродинамической стойкости конструкций с параллельными шинами, расположенными по вершинам треугольника, а также шинных конструкций с поворотами и ответвлениями.

Если параллельные шины конструкции расположены по вершинам равностороннего или прямоугольного равнобедренного треугольника приблизительно максимальные нагрузки на изоляторы и напряжения в материале шины следует определять в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 50254-92 (п.2.4.26). Следует учитывать, что результаты расчетов по Указанной методике дают оценку «сверху» электродинамической стойкости изоляторов и шин.

Если параллельные шины расположены по вершинам произвольного треугольника, то расчет следует проводить, руководствуясь рекомендациями п.2.2.2 и 3.1 на основе решения задачи о колебании балки на упругих опорах в двух взаимоперпендикулярных плоскостях.

Электродинамические нагрузки, действующие на токоведущие шины с поворотами и ответвлениями, распределены неравномерно по длине проводников и определяются согласно указаниям п.п. 3.1.1 и 3.1.3, а также 3.1.4. Если источников питания в электроустановке два и более, ЭДН следует определять для всех возможных расчетных точек КЗ при наиболее неблагоприятных перетоках. Расчетной следует принимать ЭДН, при которой прогибы конструкции, напряжения в шине и нагрузки на изоляторы достигают при КЗ максимума.

Расчет на прочность следует проводить путем решения системы уравнений колебаний стержней рамы под действием ЭДН (3.7).

Допускается инженерные расчеты проводить исходя из упрощенных моделей. В этом случае предварительно определяют частоту собственных колебаний системы (п.2.4.1),

например методом Релея. Если частота ниже 10 Гц ЭДН определяют согласно указаниям п.3.1.3 и 3.1.4. Далее проводят расчет для статической нагрузки (3.9). Динамическое воздействие ЭДН учитывают умножая полученный результат на 2.

#### **4 Методика испытаний элементов жесткой ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ на воздействие различных эксплуатационных факторов**

##### **4.1 Общие положения**

Жесткая ошиновка и ее элементы должны подвергаться приемо-сдаточным испытаниям и проверкам, которые приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

Виды испытаний, проверок и предъявляемые к ним требования

№ №	Виды испытаний или проверок	Номер пункта технических требований и методов испытаний (контроля)	Используемый ГОСТ
1	Внешний осмотр	4.2	-
2	Испытания на нагрев номинальным током	4.3	8024-90
3	Испытание относительного сопротивления электрического контакта болтовых и опрессованных зажимов	4.4	Р 51155-98 17441-84
4	Проверка прочности заделки проводов	4.5	Р 51155-98
5	Проверка узла свободного крепления ошиновки	4.6	-
6	Проверка максимального прогиба шины	4.7	-
7	Проверка качества сварных соединений	4.8	14782-86
8	Проверка прочности сварных соединений	4.9	18482-79 6996-66
9	Испытание на термическую и электродинамическую стойкость	4.10	10434-82
10	Испытание на стойкость к воздействию климатических факторов внешней среды	4.11	15150-69 16962.2-90
11	Испытание на сейсмоустойчивость	4.12	17516.1-90
12	Испытание на радиопомехи	4.13	1516.2-97
13	Испытание на прочность при гололеде	4.14	-
14	Проверка шин на ветровую стойкость и отстройку от ветровых резонансов.	4.15	-
15	Испытание на прочность при транспортировании	4.16	23216

При отсутствии технических возможностей для проведения испытаний полностью собранных изделий допускается проводить испытания на отдельных элементах ошиновки, если это не приводит к искажению картины испытаний.

При вводе жесткой ошиновки в эксплуатацию, а также в процессе эксплуатации должны проводиться измерения и испытания в объеме требований раздела 17 РД 34.45-51.300-97 «объем и нормы испытаний электрооборудования». Кроме того при вводе в эксплуатацию ошиновки следует проводить испытания на корону (п.4.13.2).

## 4.2 Внешний осмотр

Проверка комплектности согласно проекту или программе испытаний:

- шин;
  - шинодержателей с узлами крепления шин к опорным изоляторам с крепежными изделиями;
  - компенсаторов температурных деформаций;
  - зажимов для присоединения гибких спусков;
- изоляторов;
- металлоконструкций для установки ошиновки.
- Визуально определяется:
- наличие маркировки на ошиновке и ее элементах;
  - отсутствие на поверхности зажимов трещин, следов коррозии и механических повреждений;
  - отсутствие излома проводников гибких компенсаторов;
  - комплектность.
- наличие цветowych меток, соответствующих раскраске фаз: для фазы А – желтой, В – зеленой, С – красной.

## 4.3 Испытание на нагрев номинальным током

Испытание на нагрев шины, компенсаторов токовых, зажимов ошиновки проводят по ГОСТ 8024 [6]. Эффективная температура окружающего воздуха принимается равной 40<sup>0</sup>С, наибольшая допустимая температура нагрева для шин из алюминия и его сплавов без покрытия принимается при наличии разъемных контактных соединений - 90<sup>0</sup>С, а при отсутствии таких соединений - 120<sup>0</sup>С (см.п.1.3).

Ошиновка в части нагрева при длительной работе в номинальном режиме должна удовлетворять требованиям ГОСТ 8024 [6]. Испытания на нагрев проводят при нормальных климатических условиях испытаний по ГОСТ 15150 [7].

Испытания проводятся в закрытых помещениях, то есть при естественной конвекции и отсутствии солнечной радиации. Допускается для шин ОРУ проводить пересчет экспериментально определенных рабочих токов в закрытых помещениях для наружных установок по формуле

$$I_{\text{ном ОРУ}} = I_{\text{ном ЗРУ}} \cdot k, \quad (4.1)$$

где  $I_{\text{ном ОРУ}}$  – номинальный ток шин в ОРУ;

$I_{\text{ном ЗРУ}}$  - номинальные токи шин в ЗРУ, определенные в результате испытаний при нормированной температуре воздуха;

$k$  – расчетный поправочный коэффициент.

Коэффициент  $k$  можно принять равным отношению наибольшего расчетного тока шины в ОРУ и ЗРУ, которые определяются в соответствии с рекомендациями § 1.3. Для температуры воздуха +40<sup>0</sup>С, интенсивности солнечной радиации равной 900 Вт/м<sup>2</sup>, для сплавов 1915Т и АВТ поправочный коэффициент шин можно определить по кривым, приведенным на рис. 4.1.

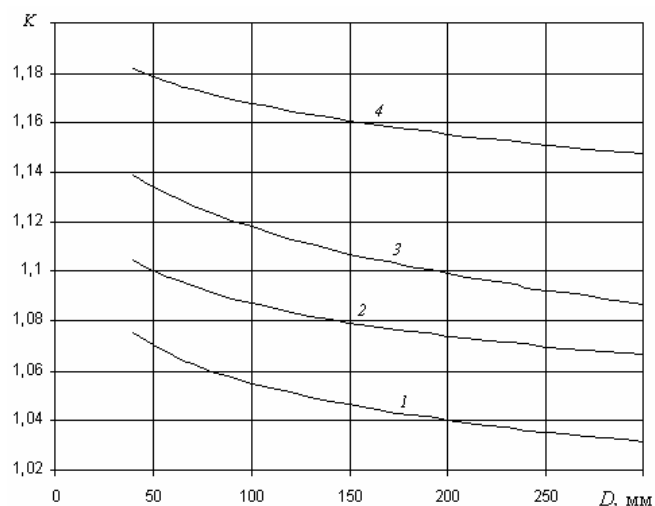


Рис. 4.1 Кривые зависимости расчетного поправочного коэффициента ( $k$ ) от внешнего диаметра шин ( $D$ , мм): 1 - окрашенные в белую краску шины сплавов 1915Т и АВТ при допустимой температуре шины равной  $T_{\text{доп}}=90^{\circ}\text{C}$ ; 2- окрашенные в белую краску шины сплавов 1915Т и АВТ при  $T_{\text{доп}}=120^{\circ}\text{C}$ ; 3 - неокрашенные шины сплавов 1915Т и АВТ при  $T_{\text{доп}}=90^{\circ}\text{C}$ ; 4- неокрашенные шины сплавов 1915Т и АВТ при  $T_{\text{доп}}=120^{\circ}\text{C}$ .

Результаты испытаний в закрытых помещениях на нагрев номинальным током зажимов шинодержателей и других элементов, имеющих разъемные и неразъемные контакты (кроме сварных соединений трубчатых шин) следует принимать как для закрытых, так и открытых распределительных устройств.

#### 4.4 Испытание относительного сопротивления электрического контакта болтовых и опрессованных зажимов

Требования к качеству электрического контакта зажимов устанавливаются ГОСТом Р 51155 и ГОСТом 17441.

Испытания с целью определения качества выполнения опрессованных контактных соединений ошиновки проводят согласно требованиям ГОСТ Р 51155 (п.4.20). Испытания следует проводить с проводами всех выбранных марок. Количество зажимов должно быть не менее 6 шт. для каждого сечения провода.

Для определения относительного сопротивления электрического контакта нового изделия  $\sigma_0$  измеряют сопротивление электрического контакта и целого участка провода той же длины  $l$  при помощи измерительного устройства двойного моста или методом «ток-напряжение». Сопротивление измеряют при температуре окружающей среды  $(293 \pm 10)\text{K}$   $[(20 \pm 10)^{\circ}\text{C}]$  по ГОСТ 17441.

Измерительный ток должен быть не более 0,3 номинального тока данного провода при измерении методом «ток-напряжение». Погрешность измерения – не более  $\pm 1,5\%$ . В каждой точке проводят не менее трех измерений.

Относительное сопротивление электрического контакта нового изделия  $\sigma_0$  вычисляют по формуле

$$\sigma_0 = \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{пр}}} = \frac{\Delta U_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{пр}}}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta U_{\text{к}}$  и  $R_{\text{к}}$  - средние арифметические значения результатов измерения соответственно падения напряжения, В, и сопротивления контакта, Ом;

$\Delta U_{\text{пр}}$  и  $R_{\text{пр}}$  - средние арифметические значения результатов измерения соответственно падения напряжения, В, и сопротивления провода, Ом.

Испытания с целью определения качества выполнения болтовых и обжимных контактных соединений ошиновки проводят по п.2.6.1. ГОСТ 17441. Для соединений, не указанных на черт. 1-6 п. 2.6.1. ГОСТ 17441, точки измерения устанавливаются на расстоянии 2-10 мм от контактного стыка по ходу тока.

Испытание на нагревание номинальным током проводится в соответствии с указаниями п.2.7 ГОСТ 17441-84. Изделие нагревают номинальным током до установившихся температур провода (или шины) и токоведущего соединения, а затем охлаждают до температуры  $(293 \pm 10) \text{K}$  [ $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ ]. Методы испытаний устанавливаются ГОСТ 2933-83. Соединения считают выдержавшими испытания, если их температура с учетом верхнего рабочего значения температуры окружающего воздуха по ГОСТ 15543.1-89 (измеренное превышение температуры над температурой воздуха при испытаниях плюс верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха) не выше значений, установленных в ГОСТ 10434-82 (табл.8).

Относительное сопротивление электрического контакта после нагрева током, в 1,5 раза превышающим номинальный определяется в следующей последовательности: изделие нагревают током, в 1,5 раза превышающим номинальный, до установившихся температур провода (шины) и токоведущего соединения и затем охлаждают до температуры  $(293 \pm 10) \text{K}$  [ $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ ].

Ускоренное испытание в режиме циклического нагревания проводится в соответствии указаниями п.2.8 ГОСТ 17441-84. Ускоренное испытание состоит в попеременном (циклическом) нагревании соединений током до  $(120 \pm 5)^\circ\text{C}$  с последующим их охлаждением до температуры  $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Значение тока испытания устанавливают опытным путем из расчета времени нагревания соединений 3-10 мин (для проводников на номинальный ток более 100 А время нагревания допускается увеличивать до 20 мин). Количество циклов «нагревание – охлаждение» должно быть не менее 500 – для соединений класса 1, 300 – для класса 2 и 50 – для класса 3, (нумерация класса контактного соединения берется из п 1.1 ГОСТ 10434-82). Соединения считают выдержавшими испытания, если среднее значение сопротивления выборки после каждого опыта из 100 циклов (для соединений класса 3 после 50 циклов) в сравнении со средним значением сопротивления выборки, полученным до начала испытаний, соответствует требованиям ГОСТ 10434-82.

Испытания соединений на стойкость при сквозных токах проводятся по ГОСТ 2933-83 и ГОСТ 687-78. Испытания проводят трехразовой нагрузкой током  $I_{\text{скв}}$ , значение которого определяют по формуле

$$I_{\text{скв}} = S \cdot q_t, \quad (4.3)$$

где  $S$  – номинальное сечение проводника,  $\text{мм}^2$ ,

$q_t$  - плотность односекундного тока,  $\text{А/мм}^2$ , (принимается по ГОСТ 10434-82 или стандартам и техническим условиям на конкретные виды электротехнических устройств).

Допускается испытание проводить током, значение которого меньше  $I_{\text{скв}}$ . При этом длительность протекания тока должна быть выше 1 с, но не более 4 с.

Испытания проводить с трубчатыми шинами всех выбранных (принятых) диаметров и материалов и соответствующими типоразмерами зажимов. Количество зажимов должно быть не менее 6 шт. для каждого типоразмера.

#### 4.5 Проверка прочности заделки проводов

Проверка прочности заделки проводов проводится по ГОСТ Р 51155-98 (п.4.19). Проверку прочности заделки проводов в зажимах проводить путем нагружения провода опрессованного в зажиме вытягивающим усилием. Болты затягивают динамометрическим ключом с установленным моментом затяжки.



Нагрузку плавно повышают до 50% от установленной в рабочих чертежах прочности заделки. В дальнейшем нагружение производят со скоростью не более 10% в минуту от прочности заделки до проскальзывания провода или обрыва одной проволоки.

Контактные соединения должны выдерживать воздействие статических осевых нагрузок на растяжение, вызывающее напряжения, не менее:

- 30% временного сопротивления разрыву целого проводника – для неразборных контактных соединений, не работающих на растяжение, а также для соединений проводников с гнездовыми выводами, соединений неоконцованных проводов и кабелей с плоскими выводами, укомплектованными фасонными шайбами (ГОСТ 10434 п. 2.3.).

Количество зажимов должно быть не менее 3 шт. для каждого типа провода.

Зажим считается выдержавшим испытания, если проскальзывание провода в зажиме или обрыв одной проволоки произошли при нагрузке превышающей нормированную, указанную выше.

#### **4.6 Проверка узла свободного крепления шины**

Токовые компенсаторы в узле свободного крепления ошиновки должны выдерживать не менее 1000 циклов от температурного расширения и сжатия шины.

Узел свободного крепления ошиновки должен допускать свободное перемещение ошиновки при температурных деформациях.

Проверку узла свободного крепления ошиновки проводить путем моделирования циклического поступательного перемещения шины при температурном расширении и сжатии.

Значения максимальных перемещений определяются в соответствии с требованиями п. 1.2

Узел свободного крепления ошиновки считается выдержавшим испытания, если электрическое сопротивление соединения не превысило начальное более чем в 1,5 раза (п.2.2.3 ГОСТ 10434-82), и если при визуальном осмотре не обнаружено излома проводников компенсаторов, их остаточной деформации, значительного износа осей узла свободного перемещения ошиновки, препятствующих его дальнейшей работе.

#### **4.7 Проверка максимального прогиба шины**

Максимальный прогиб ошиновки после установки на изоляторы не должен превышать: без учета гололеда (или при его отсутствии, например, для импортируемых за рубежом конструкций)  $1/100$ , а с учетом гололеда  $-1/80$  длины пролета ошиновки.

Максимальный прогиб шины определять после установки ошиновки на изоляторы при максимальном расстоянии между опорами, приложении нагрузки эквивалентной гололедной, и имитации веса неподвижного контакта пантографического разъединителя (при его наличии). Испытания следует проводить путем замера прогиба при помощи измерительной линейки, рулетки с ценой деления шкалы не более 1 мм, а также другими измерительными приборами, обеспечивающими точность не менее 0,5 мм.

Сравнить максимальный прогиб можно с данными, полученными по расчетам параграфа 2.1

#### **4.8 Проверка качества сварных соединений**

Проверку качества сварных швов проводить по ГОСТ 14782.

При контроле сварного шва должны быть использованы ультразвуковой импульсной дефектоскоп по ГОСТ 23049-84 не ниже второй группы с преобразователями пьезоэлектрическими, вспомогательные приспособления и устройства для соблюдения

параметров сканирования и измерения характеристик выявленных дефектов. Допускается использовать дефектоскоп с электромагнитоакустическими преобразователями.

Сварное соединение подготавливают к ультразвуковому контролю при отсутствии в соединении наружных дефектов: непровара, газовых пор, инородных включений, трещин в шве и зоне термического влияния. С поверхности должны быть удалены брызги металла, отслаивающаяся окалина и краска, загрязнения.

Основные параметры контроля:

длина волны или частота ультразвуковых колебаний (дефектоскопа);

чувствительность;

положение точки выхода луча (стрела преобразователя);

угол ввода ультразвукового луча в металл;

погрешность глубиномера (погрешность измерения координат);

мертвая зона;

разрешающая способность по дальности и (или) фронту;

минимальный размер дефекта.

Сварные соединения считаются не годными, если в них обнаружены:

дефекты, суммарная протяженность которых более 10 мм;

дефекты, суммарная условная протяженность которых более 20% внутреннего периметра соединений.

#### **4.9 Проверка прочности сварных соединений**

Наибольшие рабочие напряжения, возникающие в материале шины при действии электродинамических, ветровых и гололедных нагрузок, не должны превышать значений, соответствующих 0,7 временного сопротивления разрыву шины по ГОСТ 18482.

Проверку прочности сварных соединений проводить по ГОСТ 6996.

Стандарт устанавливает методы определения механических свойств при следующих видах испытаний:

испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение;

испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезных образцах);

испытании металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения;

измерении твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;

испытании сварного соединения на статический изгиб (загиб);

испытании сварного соединения на ударный разрыв.

#### **4.10 Испытания на термическую и электродинамическую стойкость**

Температура нагрева токоведущих частей ошиновки в процессе КЗ не должна превышать значений, установленных ГОСТ 10434 (п.2.2.6). Перед испытаниями ошиновка должна быть прогрета номинальным током до установившейся температуры (ГОСТ 10434 табл.8).

Температура нагрева токоведущих частей ошиновки из алюминия или его сплавов при прохождении тока КЗ не должна превышать 200 °С с учетом нагрева номинальным током.

Испытания на термическую стойкость допускается проводить при любом виде КЗ. Допустимо на термическую стойкость испытывать отдельные узлы шинной конструкции. Однако целесообразно проводить полномасштабные испытания совместно с испытаниями на электродинамическую стойкость.

Во время испытаний измеряются перемещения головок изоляторов; токи КЗ; падение напряжения; температуры нагрева шины и отдельных узлов, а также деформации изоляторов и шин.

Токи в шинах в переходных режимах можно измерять воздушными трансформаторами тока (ВТТ) через интегрирующие усилители постоянного тока. Интегрирующий усилитель подключается к вторичной обмотке ВТТ, на которой сигнал пропорционален производной тока в шине. Интегрирование производной тока производится цепочкой, образуемой внутренним сопротивлением обмотки ВТТ и емкостью, входящей в схему усилителя.

Температура нагрева шин токами КЗ можно измерять термодарами, например, «хромель-капель». Термодары устанавливаются в специально высверленные отверстия в шинах и зачеканиваются мягким алюминием на глубину до 1 мм. Для исключения влияния наведенной ЭДС и теплового потока на точность измерения термодары после выхода из отверстия скручиваются в бифиляр и приклеиваются к шинам на расстоянии 10-15 мм. Термодары устанавливаются на шине, в сварном шве и гибких проводах (в том числе температурных компенсаторов). Контроль за температурой окружающей среды проводится при помощи спиртового или предварительно тарированного электронного термометра.

Испытания на электродинамическую стойкость следует проводить на трехпролетных шинных конструкциях. Допускается испытывать двухпролетные конструкции. Проводить испытания на электродинамическую стойкость однопролетных конструкций не допускается.

Испытания следует проводить при трехфазном КЗ. Для конструкций с шинами, расположенными в одной плоскости, допускается проводить испытания при двухфазном КЗ между фазами А-В и В-С. В этом случае трехфазный ток электродинамической стойкости пересчитывается по формуле

$$i_{\text{дин}}^{(3)} = i_{\text{дин}}^{(2)} \sqrt{\frac{2 \eta^{(2)}}{\sqrt{3} \eta^{(3)}}}, \quad (4.4)$$

где  $i_{\text{дин}}^{(2)}$  - экспериментально установленное значение тока электродинамической стойкости при двухфазном КЗ;

$\eta^{(2)}$  и  $\eta^{(3)}$  - динамические коэффициенты при двух- и трехфазном КЗ (рис.3.1).

Длительность КЗ устанавливается не менее половины периода собственных колебаний (т. е.  $T/2 = 1/(2f)$ , где  $f$  – частота собственных колебаний). Наибольшая продолжительность КЗ определяется условиями термической стойкости и должна быть не менее времени термической стойкости выключателя. Число опытов в каждой точке при одном виде КЗ не менее 3.

Во время опытов на электродинамическую стойкость измеряются прогибы изоляторов и шин, а также их деформации. Прогибы головки изоляторов при действии электродинамических нагрузок (в период КЗ), а также при свободных колебаниях (после отключения КЗ) измеряются датчиками перемещений, установленными во всех трех фазах на втором (среднем) блоке, а перемещения шин в середине второго пролета – с помощью скоростной видео-, киносъемки или другими методами. Относительная деформация измеряется тензодатчиками активного сопротивления или другими предназначенными для этого датчиками.

Место установки датчиков для измерения деформаций следует выбирать в сечениях наибольших ожидаемых деформаций, например, в средней точке шины, имеющей шарнирное опирание, в нижней части фарфорового тела изолятора и т.д.

Допускается проводить испытания на электродинамическую стойкость при снижении междуфазных расстояний. Это позволяет увеличить электродинамические усилия на ошиновку при более низких токах КЗ.

В этом случае расстояния между фазами не должно быть менее 50% проектных расстояний. Фактический ток электродинамической стойкости определяется по формуле

$$i_{\text{дин}} = i_{\text{дин, исп}} \sqrt{\frac{a}{a_{\text{исп}}}}, \quad (4.5)$$

где  $i_{\text{дин, исп}}$  – ток электродинамической стойкости, определенный при испытаниях;  
 $a_{\text{исп}}$  и  $a$  – расстояние между фазами при испытании и принятое в проекте.

При подготовке и проведении испытаний на электродинамическую стойкость следует учитывать следующее:

При расположении фаз в одной плоскости наибольшие электродинамические воздействия испытывают изоляторы и шины крайних фаз при трехфазном КЗ, если частота собственных колебаний ошиновки ниже 50 Гц, что характерно для подавляющего большинства шинных конструкций 110 кВ и выше.

Наибольшие воздействия испытывают элементы конструкции среднего пролета трехпролетной конструкции.

При испытаниях двухпролетной конструкции наибольшие воздействия испытывает средняя опора (изолятор).

Если частота собственных колебаний ошиновки менее 10 Гц угол включения тока КЗ практически не влияет на электродинамическую стойкость. При более высокой частоте собственных колебаний шинной конструкции угол включения тока КЗ необходимо выбирать таким, чтобы электродинамическая нагрузка достигала максимума.

При испытаниях основные узлы и проблемные элементы ошиновки (изоляторы, сварные соединения, шинодержатели фиксированного и свободного крепления и т. д.) должны быть установлены в пролетах (пролете) испытывающих наибольшие электродинамические воздействия. В двухпролетной конструкции они должны располагаться у средней (контрольной) опоры.

Ошиновка считается выдержавшей испытания, если после трех последовательных воздействий сквозным током КЗ не произошло отрыва зажимов от трубчатой шины, разрушения узлов свободного и фиксированного крепления ошиновки, разрушения изолятора и не возникло остаточной деформации шин.

#### **4.11 Испытание на стойкость к воздействию климатических факторов**

Нормальные значения климатических факторов выбираются по ГОСТ 15150, испытания по ГОСТ 16962.1.

За нормальные значения климатических факторов внешней среды при испытаниях изделий принимают следующие:

- высота установки над уровнем моря не более 1000 м;
- климатическое исполнение УХЛ, категория размещения 1;
- температура окружающего воздуха от  $-60$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферного давления 84-106,7 кПа (630- 800 мм рт. ст.);

Содержание коррозионно-активных агентов должно соответствовать атмосфере типа II по ГОСТ 15150 (табл.8).

Испытания на стойкость к воздействию нижнего и верхнего значений температуры среды при эксплуатации, изменения среды должны проводиться в камере тепла и холода в соответствии с табл.4.2.

Таблица 4.2

Вид испытаний	Метод испытаний по ГОСТ 16962.1 (табл.3)	Температура выдержки, °С	Время выдержки в камере, ч, п.1.30[19]	Время выдержки в нормальных климатических условиях, ч
Испытание на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации	201-1	+ 60	5	5
Испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации	203-1	- 60	5	5
Испытание на воздействие изменения температуры среды	205-2	от -60 до + 60	5	5
Испытание на воздействие влажности воздуха	207-1	-	-	5

Ошиновка считается выдержавшей испытания, если не произошло ухудшения внешнего вида изделия, проверить визуально отсутствие трещин в армировочных швах изоляторов, отсутствии коррозии на изделии и в местах контактирования зажимов с шиной трубчатой.

Ошиновка должна подвергаться испытаниям на воздействие дождя. Время выдержки в нормальных климатических условиях – 3 ч, под воздействием дождя – 2 ч.

Ошиновка считается выдержавшей испытания, если конденсат, образовавшийся в шине трубчатой, стекает (удаляется) из трубы ошиновки через сливное отверстие, находящееся в средней части трубы.

#### 4.12 Испытание на сейсмоустойчивость

Ошиновка должна иметь группу механического исполнения М13 по ГОСТ 17516.1 (табл.1).

При предъявлении к изделиям требований по стойкости к воздействию землетрясений (сейсмостойкости) исходят из интенсивности землетрясения и уровня установки изделий над нулевой отметкой (уровня установки). Эти требования соответствуют требованиям по стойкости (устойчивости и (или) прочности) к синусоидальной вибрации в течение 1 мин.

Испытание пролета с максимальным расстоянием между опорами и необходимой высотой установки конструкции (высота изолятора) следует проводить совместно с разъединителями. Допускается проведение испытаний с имитацией верхнего контакта разъединителя пантографического типа, при этом неподвижный контакт разъединителя устанавливается на ошиновке посередине пролета.

Ошиновка считается выдержавшей испытания, если не произошло разрушения узла свободного и фиксированного крепления ошиновки, и разрыва электрической цепи разъединителя.

Допускается проводить испытания с имитацией контактов трансформатора тока, выключателя и разъединителя. Ошиновка считается выдержавшей испытания, если не произошло разрушения узла свободного и фиксированного крепления ошиновки.

## 4.13 Испытание ошиновки на радиопомехи и корону

### 4.13.1 Испытания на радиопомехи

Для проведения испытаний на радиопомехи предварительно, на основе анализа конструктивных особенностей, необходимо выделить типовые узлы ошиновки. Например, узлы крепления шин на изоляторы, узлы ответвлений и т.д.

Напряжения радиопомех определяется при испытательном напряжении, равном  $1,1U/\sqrt{3}$  ( $U$  – наибольшее рабочее напряжение электрооборудования на частоте  $(0,5\pm 0,05)$  МГц) по методике, приведенной в ГОСТ Р 51097-97 «совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от гирлянд изоляторов и линейной арматуры. Нормы и методы измерений».

Узлы ошиновки соответствуют требованиям по радиопомехам, если для каждого опыта напряжение радиопомех меньше допустимого значения.

Допустимое напряжение радиопомех согласно принимается равным:

-для изоляторов с шинодержателями 55 дБмкВ

-для других элементов ошиновки 38 дБмкВ.

### 4.13.2 Испытания на корону

Проводятся после завершения монтажа жесткой ошиновки в ночное время с целью выявления локальных источников электрических разрядов на её элементах, которые могут возникнуть в процессе монтажа. Условия и метод обследования жесткой ошиновки должны соответствовать п.7.7 ГОСТ 1516.2-97 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции».

## 4.14 Испытание на прочность при гололеде

Испытания проводят на трехпролетной конструкции. Допускается нагружать, моделировать грузами, эквивалентным гололедным отложениям согласно п.2.3.2. Измерять максимальный прогиб и сравнивать с допустимым (см. п. 4.7 данного указания). Целесообразно измерять механические напряжения в материале шин и изоляторов. Если результирующий вклад гололедных нагрузок согласно расчетам (п.2.3) невелик (менее 10-15%) и не оказывает существенного влияния на прочность конструкции, испытания на прочность при гололеде могут не проводиться.

### 4.14 Проверка шин на ветровую стойкость и отстройку от ветровых резонансов

Данную проверку проводить достаточно сложно, так как необходимо учитывать сочетание электродинамической нагрузки, ветровой нагрузки в разных направлениях (см. п. 2.4).

Допускается отказаться от этих испытаний и ограничиться расчетом в соответствии с настоящими указаниями п.2.4, для проведения которых необходимо экспериментально определить:

-жесткость изоляционных опор;

-частоту собственных колебаний опор и шин;

-декремент затухания ошиновки при колебаниях в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

При определении электродинамической стойкости конструкций при КЗ, а также прочности конструкции при воздействии ветровой нагрузки, необходимо знать частоту собственных колебаний элементов конструкции.

Частоту собственных колебаний токоведущих шин, изоляторов и опорной рамы можно измерять тензодатчиками активного сопротивления, предназначенными для измерения относительных деформаций.

Частоты собственных колебаний шин определяются при импульсном механическом нагружении шин и регистрируются до полного затухания. Частоту собственных колебаний необходимо измерять в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Частота собственных колебаний системы шина - изоляторы являются функцией жесткости опор шин. С уменьшением жесткости частота собственных колебаний снижается.

Для определения жесткости изоляторов (или опор в целом) необходимо получить их упругие характеристики, представляющие собой зависимости статической силы  $P$ , приложенной к вершине изолятора (опоры) от перемещения  $y$  головки изолятора (вершины опоры). На рис.4.2 приведена принципиальная схема установки для испытания изоляторов (опор). Изолятор 1 устанавливается на несущей балке 2. Нагрузка создается приводом 6. Прогибы вершины изолятора измеряются с помощью индикатора (или прогибомера) 4, а статическая нагрузка – динамометром 5. Целесообразно индикаторы 4 жестко связать с несущей балкой 2. Это позволяет в значительной степени компенсировать погрешности, обусловленные деформациями балки.

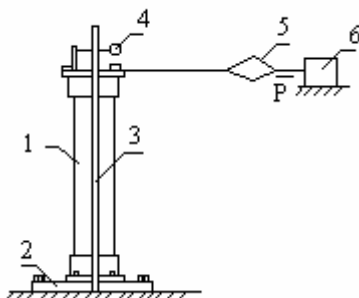


Рис.4.2 Принципиальная схема конструкции испытания изоляторов на статическую нагрузку

Жесткость изолятора – это коэффициент пропорциональности между статической нагрузкой  $P$  и прогибом  $y$ . При испытаниях может наблюдаться разброс показаний  $P$ ,  $y$  от линейной характеристики. Тем не менее функция  $P(y)$  весьма близка к зависимости  $P = cy$ , которую удобно использовать в инженерных расчетах шинных конструкций на электродинамическую стойкость. Ведение в расчет нелинейности оправдано, т.к. значение угла наклона упругих характеристик имеет достаточно большой разброс даже у изоляторов одного типа из одной партии.

Линеаризация функции  $P(y)$  может быть проведена по методу наименьших квадратов. Значение жесткости,  $c$ , находится по формуле

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2}. \quad (4.5)$$

Испытания должны проводиться на 3-4 опорах; снимать показания прогиба при нагрузке в интервале от 0 до  $0,6 F_{\text{разр.}}$ ; измерять необходимо не менее 5 точек; после этого определяется жесткость как среднее квадратичное от всех полученных результатов.

Для определения логарифмического декремента затухания необходимо экспериментально определить осциллограмму свободных колебаний шинной конструкции, а затем рассчитать декремент по формуле

$$\delta = \frac{1}{k - m} \ln \frac{A_m}{A_k} \quad (k > m), \quad (4.6)$$

где  $k$  и  $m$  – номера амплитуд свободных колебаний.

#### **4.16 Испытание на прочность при транспортировании**

Транспортирование ошиновки должно производиться железнодорожным и автомобильным транспортом.

Испытания на прочность при транспортировании должно проводиться по ГОСТ 23216 путем перевозки упакованной ошиновки на автомашине со скоростью 40 км/ч по булыжным и грунтовым дорогам на расстоянии 500 км или по дорогам с асфальтовым или бетонным покрытием на расстоянии 2000 км со скоростью, которую допускает транспортное средство и правила дорожного движения для выбранного участка пути.

Загрузка автомашины должна быть полной. В случае отсутствия таковой, должны быть приняты меры для предотвращения перемещения тары с упакованными изделиями.

Ошиновка считается выдержавшей испытания, если при внешнем осмотре и после вскрытия не будет обнаружено потерь элементов и механических повреждений изделий и их упаковки.