

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ НОВЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКЕ ОРУ И ЗРУ 110-500 кВ

Долин А.П., канд. техн. наук, ОАО «ФСК ЕЭС»,
Козина М.А., ООО НТЦ «ЭДС»

В последние годы значительное количество ОРУ 110-500 кВ выполняется с жесткой ошиновкой, которая позволяет создать компактные и экономичные распределительные устройства, занимающие меньшую площадь, имеющие более низкое расположение шин, высоту порталов, чем в ОРУ с гибкой ошиновкой. Благодаря этому сокращается длина контрольных и силовых кабелей, дорог, облегчается очистка изоляторов, ремонт шинных конструкций, улучшается обзор шин и аппаратов.

При использовании жесткой ошиновки снижается трудоемкость монтажных работ. На основе конструкций с жесткими шинами созданы конструкции высокой заводской готовности, в том числе, компактные модули и комплектные ПС. Все это позволяет сократить сроки сооружения РУ.

Жесткая ошиновка в нашей стране успешно применялась еще в 30-е годы прошлого века. Сборные шины изготавливались из медных труб, внутричечковые связи — из стальных (водопроводных) труб. В середине 50-х годов институт «Теплоэлектропроект» разработал проекты ЗРУ, а также ОРУ 110 и 220 кВ с жесткими сборными шинами из алюминиевых сплавов и однорядной установкой выключателей. В 1957 г. введено в эксплуатацию ЗРУ 150 кВ Каховской ГЭС, выполненное по схеме: одна рабочая секционированная и обходная системы шин, сборные шины которого изготовлены из медных труб.

Широкое применение жесткая трубчатая ошиновка из алюминиевых сплавов получила в 60-е годы в ОРУ напряжением 110 кВ транзитных и тупиковых подстанций. В 70-х годах институт «Энергосетьпроект» выполнил проекты ОРУ напряжением 220 кВ по упрощенным схемам (типа КТП 220 кВ), а также типовые проекты ОРУ 110 кВ и выше со сборными шинами. В эти же годы институтом «Укроргэнергострой» (в те годы Одесским филиалом «Оргэнергострой») разработаны проекты КТПБ 110 кВ, производство которых освоено Самарским (Куйбышевским) заводом «Электроцит». Эти же организации позднее разработали и освоили выпуск блочных комплектных распределительных устройств (КРУБ) 110 кВ для схем одна или две системы сборных шин с обходной шиной, а в конце 80-х годов изготовили экспериментальные пролеты ошиновки КРУБ 220 кВ.

До 80-х годов жесткая ошиновка ОРУ 110 кВ, разработанная институтом «Энергосетьпроект» и его филиалами, изготавливалась в мастерских электромонтажных организаций; позднее, как правило, на заводах ВПО «Союзэлектросетьизоляция» (рис.1, а). Эти решения использовались при сооружении ОРУ 220 и 500 кВ с жесткими шинами (рис. 1, б). Кроме того, элементы жесткой ошиновки нашли применение в ОРУ 330 и 500 кВ с подвесными разъединителями (проекты института «Атомтеплоэлектропроект»).

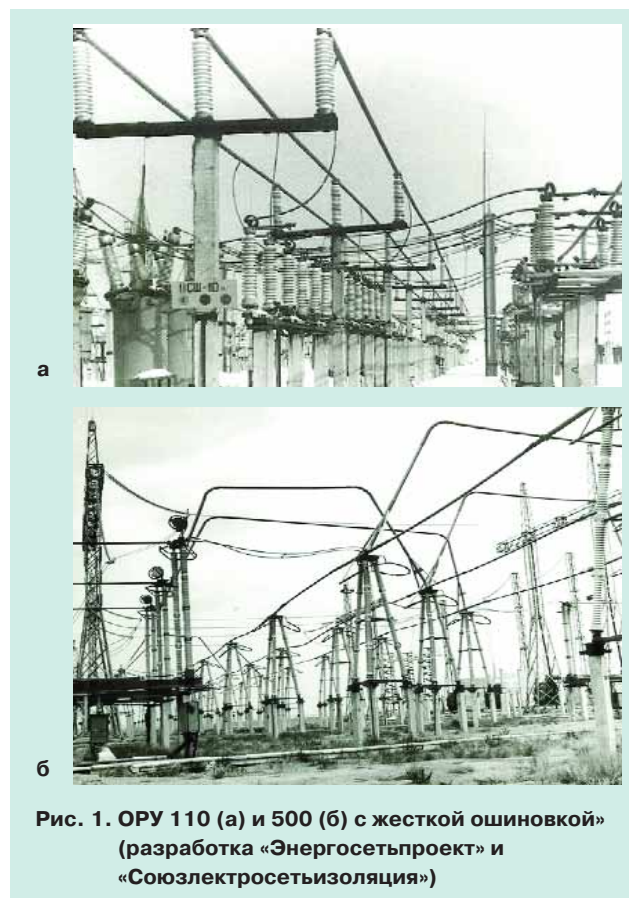
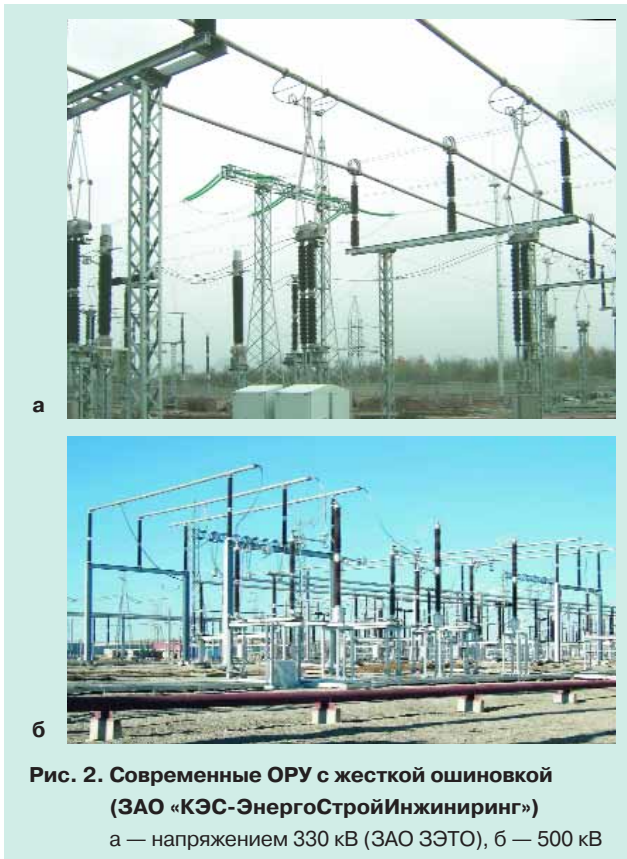


Рис. 1. ОРУ 110 (а) и 500 (б) с жесткой ошиновкой»
(разработка «Энергосетьпроект» и
«Союзэлектросетьизоляция»)

В последние годы ЗАО «Завод электротехнического оборудования» (ЗЭТО), ЗАО «КЭС-ЭнергоСтройИнжиниринг», ЗАО «КТП-Урал» и другие организации выполнили

разработку, и внедрение ошиновки ОРУ 110 – 500 кВ (рис. 2). Следует отметить, что ряд шинных конструкций во многом копируют разработки 60-80 гг. прошлого столетия. Другие с актуализировали наилучшие отечественные и зарубежные решения, а также используют новые оригинальные подходы.



В этих условиях своевременным оказалось подготовка и утверждение четырех новых нормативных документов [1-4], которые определяют требования к проектированию, выбору, расчетам и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ. В документах [1-4] нашли отражение результаты расчетов и испытаний шинных конструкций в рабочих и аварийных режимах, многолетней научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы российских ученых и специалистов [5-8], а также отечественный и зарубежный опыт эксплуатации жесткой ошиновки.

В частности, в качестве шин рекомендуется использовать трубы из алюминиевых сплавов прежде всего

1915, 1915Т, а также АВТ1. Ответвления от шин выполняются жесткими шинами (трубами) или гибкими (сталеалюминиевыми проводами). При монтаже шинных конструкций сварочные работы, как правило, не используются. Жесткие ответвления от шин, повороты и другие элементы, требующие сварочных работ, обычно поставляются специализированными предприятиями.

Шинодержатели и другие крепежные элементы являются важнейшим звеном современных шинных конструкций. В соответствии с [2, 3] рекомендуется (и впервые в отечественной практике допускается для сборных шин) использование шинодержателей и крепежных узлов — обжимного типа (рис. 3), которые не требуют выполнения сварочных работ или опрессовки для соединения жестких шин, а также жестких шин и гибких связей при монтаже ошиновки. Крепежные элементы позволяют проводить присоединение трубчатых шин к плоским аппаратным зажимам, выполнение различных типов ответвлений и соединений проводников.

Шинодержатели и другие крепежные элементы обжимного типа обеспечивают: быстрый и качественный монтаж ошиновки, необходимую компенсацию температурных деформаций шин, компенсацию погрешностей при установке шинных опор, а также возможные просадки и наклоны опор. Кроме того, они выполняют роль экранов, устраняя возможность развития коронных разрядов и радиопомех. Вместе с тем, они должны обеспечивать высокое качество электрического соединения, а также необходимый уровень рассеяния энергии при колебаниях шин, в том числе, при ветровых возбуждениях (ветровых резонансах).

Крепление жесткой ошиновкой, как правило, выполняется на одноколонковые фарфоровые изоляторы (изоляционные опоры) типа С6, С8, С10 или С12. Допускается использование полимерных опорных изоляторов. В РУ с жесткой ошиновкой применяются разъединители всех современных конструктивных решений, в том числе, горизонтально-поворотные, полупантографические и пантографические. Следует отметить, что использование пантографических разъединителей в РУ с жесткими шинами позволяет создать наиболее компактные конструктивные решения, а в некоторых случаях упростить компоновку оборудования.

Жесткая ошиновка ОРУ и ЗРУ 110 кВ и выше отвечает нормативным требованиям и удовлетворяет требованиям эксплуатационной надежности, если выполнены проверки (испытания или расчеты), в том числе:



- шин по допустимым прогибам от собственного веса (включая ответвления), а в ОРУ, кроме того, веса гололеда;

- изоляционных расстояний с учетом отклонений шин и опорных изоляторов при ветровых нагрузках (в ОРУ) и после воздействия токов КЗ;

- ошиновки по условиям короны и радиопомех;

- шин, шинодержателей и компенсаторов по допустимым температурным удлинениям;

- жесткой ошиновки по нагреву в рабочих режимах, при этом в ОРУ с учетом солнечной радиации, а также вынужденной (при ветре) и свободно-вынужденной (при штиле) конвективного теплообмена;

- термической стойкости шин;

- электродинамической стойкости изоляторов и шин, включая оценки при неуспешных АПВ;

- ветровой стойкости ошиновки ОРУ с учетом пульсирующей (переменной) составляющей ветровой нагрузки;

- эффективности отстройки шин ОРУ от ветровых резонансов;

- стойкости (прочности) изоляторов и шин при различных сочетаниях внешних нагрузок (ветровых, гололедных и электродинамических) с учетом собственного веса и веса ответвлений.

Рассмотрим некоторые условия выбора и расчетов жесткой ошиновки.

1. Наибольший прогиб шин от собственного веса и силы тяжести ответвлений $y_{ст.маx}$ по эстетико-психологическим требованиям не должен превышать допустимого статического прогиба $y_{ст.доп} = l_0/100$, а с учетом гололеда $y_{ст.доп} = l_0/80$, где l_0 — длина шины между опорами (шинодержателями) [2-4]. В качестве примера на рис. 4 приводятся кривые зависимости внешних (D) и внутренних (d) диаметров шин кольцевого сечения, отвечающие условию

$$y_{ст.маx} \leq y_{ст.доп} \quad (1)$$

построенные на основе решения статической задачи для шин длиной 17,5 м (без ответвлений) из алюминиевого сплава 1915Т без учета гололеда. Допустимые размеры шин лежат в области, отмеченной серым цветом.

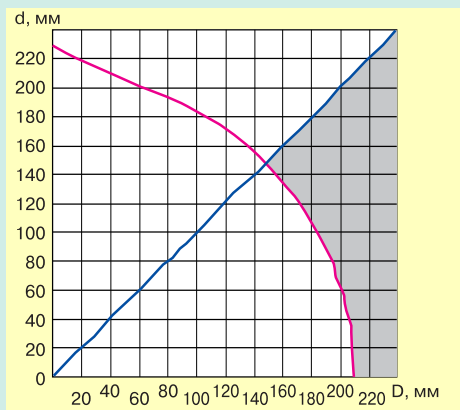


Рис. 4. Область допустимых диаметров шин из сплава 1915Т длиной 17,5 м по условиям статического прогиба от собственного веса

Как показывает опыт внедрения новых шинных конструкций 110 кВ и выше, при нарушении условия (1) по требованиям эксплуатационного персонала приходится устанавливать дополнительные промежуточные изоляционные опоры или заменять шины.

2. Монтажные расстояния от токоведущих частей до различных элементов РУ в свету должны быть больше наименьших значений, указанных в ПУЭ [9]. Кроме того, наименьшие изоляционные расстояния между токоведущими элементами $a_{ф-ф}$, а также проводниками и заземленными частями $a_{ф-з}$ при колебаниях ошиновки под действием ветровых нагрузок (в ОРУ) и после отключения КЗ (в ОРУ и ЗРУ) должны оставаться больше наименьших допустимых расстояний $A_{ф-ф}$ и $A_{ф-з}$, установленных в [9].

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

$$E_{маx} \leq 0,9 E_0 \quad (2)$$

где $E_{маx}$ — максимальная напряженность электрического поля на поверхности шин при среднем эксплуатационном напряжении; E_0 — начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда.

Условие (5) выполняется, если внешний диаметр шин D больше или равен минимальному допустимому диаметру по условию короны $D_{доп}$. В табл. 1 приводятся расчетные допустимые диаметры трубчатых одиночных шин по условию короны при нормальных атмосферных условиях (давлении воздуха $p_в = 1,013 \cdot 10^5$ Па = 760 мм рт. ст. и температуре воздуха $t_в = 20$ °С) и минимально допустимых расстояниях между фазами и землей.

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

Следует отметить, что диаметры шин, выбранные по другим условиям, как правило, значительно превосходят указанные в табл. 1 значения.

4. Температурные деформации шин не должны приводить к дополнительным усилиям, что обеспечивается свободным перемещением шин и установкой температурных компенсаторов. При этом длина неразрезного (цельного или сварного) участка шины должна отвечать неравенствам

$$L(v_{мин}) \geq L_{доп. мин} ; \quad L(v_{маx}) \leq L_{доп. маx} \quad (3)$$

где $L_{доп. мин}$ и $L_{доп. маx}$ — минимальные и максимальные допустимые длины неразрезного отрезка шины, определяемые конструкцией ошиновки, м; L — длина этого отрезка при минимальной температуре $v_{мин}$ (которую оправданно принять равной абсолютной минимальной температуре воздуха региона) и максимальной температуре $v_{маx}$ (равной температуре нагрева шины при КЗ, то есть не более 200 °С) [4].

Невыполнение условий (3) может приводить к технологическим нарушениям и авариям. На рис. 5 приведена фотография поврежденного пролета сборных шин ОРУ 220 кВ при температурных деформациях.



Рис. 5. Поврежденный пролет сборных шин ОРУ 220 кВ при температурных деформациях

5. В рабочих режимах наибольшие температуры нагрева шин v и болтовых контактов v_k не должна превышать допустимых значений

$$v \leq v_{\text{доп}}; \quad v_k \leq v_{\text{доп}k} \quad (4)$$

Вместо условия (4) при практических расчетах удобно использовать неравенство

$$I_{\text{раб. нб}} \leq I_{\text{доп}} \quad (5)$$

где $I_{\text{раб. нб}}$ — наибольший рабочий ток (называемый также током утяжеленного режима), А; $I_{\text{доп}}$ — длительно допустимый (номинальный) ток шины или контакта ошиновки $I_{\text{ном}}$, равный рабочему току при температуре нагрева соответственно v или v_k .

В качестве примера на рис. 6 приведены расчетные зависимости длительно допустимых токов трубчатых шин из сплава 1915Т в ОРУ при температуре воздуха v_v , равной 40 °С, и длительно допустимой температуре шины $v_{\text{доп}}$, равной допустимой температуре контактных соединений $v_{\text{доп}k}$ (например, шинодержателя обжимного

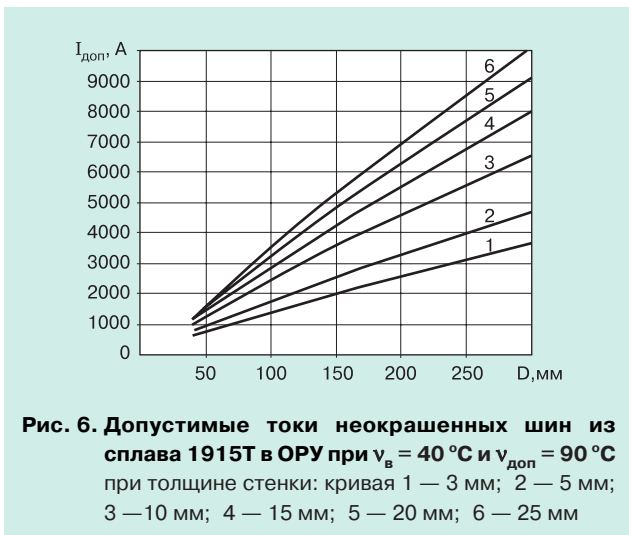


Рис. 6. Допустимые токи неокрашенных шин из сплава 1915Т в ОРУ при $v_v = 40$ °С и $v_{\text{доп}} = 90$ °С при толщине стенки: кривая 1 — 3 мм; 2 — 5 мм; 3 — 10 мм; 4 — 15 мм; 5 — 20 мм; 6 — 25 мм

типа) 90 °С. При расчете $I_{\text{доп}}$ шин ОРУ тепловой поток определялся при свободно-вынужденной конвекции, исходя из скорости ветра при штиле, равной 0,6 м/с. Кроме того, учитывался тепловой поток от солнечной радиации для средней полосы России.

6. Шины считаются термически стойкими, если их температура при КЗ $v_{\text{КЗ}}$ остается ниже допустимой температуры $v_{\text{КЗ, доп}}$

$$v_{\text{КЗ}} \leq v_{\text{КЗ, доп}} \quad (6)$$

Для алюминия и его сплавов допустимая температура $v_{\text{КЗ, доп}}$ установлена равной 200 °С [1, 4]. Кривые для определения температуры шины при КЗ приводятся на рис. 7.

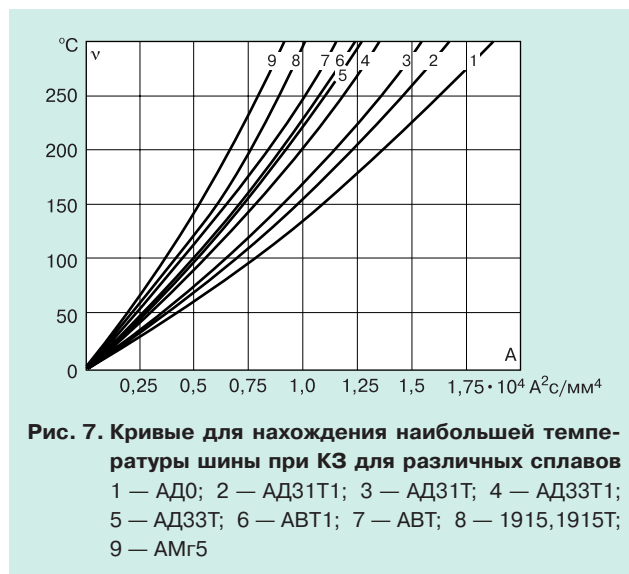


Рис. 7. Кривые для нахождения наибольшей температуры шины при КЗ для различных сплавов 1 — АД0; 2 — АД31Т1; 3 — АД31Т; 4 — АД33Т1; 5 — АД33Т; 6 — АВТ1; 7 — АВТ; 8 — 1915,1915Т; 9 — АМг5

Необходимый для определения $v_{\text{КЗ}}$ параметр A ($\text{A}^2 \text{c}/\text{мм}^4$) при конечной температуре определяется по известной формуле

$$A(v_{\text{КЗ}}) = A(v_n) + B_k/S^2 \quad (7)$$

где S — поперечное сечение шины, мм^2 ; B_k — интеграл Джоуля, $\text{A}^2 \cdot \text{с}$.

Оценку термической стойкости (с некоторым запасом) удобно проводить, исходя из площади сечения проводника. Шина удовлетворяет условию термической стойкости (6), если площадь ее поперечного сечения отвечает неравенству

$$S \geq S_T = \sqrt{B_k/C_T} \quad (8)$$

где S_T — минимальное сечение шины по условию термической стойкости, мм^2 ; B_k — интеграл Джоуля, $\text{A}^2 \cdot \text{с}$; C_T — параметр термической стойкости, $\text{A} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$, значения которого для некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл. 2.

7. Шинные конструкции отвечают условиям стойкости (прочности), если выполняются следующие неравенства

$$R_{\text{max}} \leq R_{\text{доп}}; \quad \sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп}} \quad (9)$$

где R_{max} и $R_{\text{доп}}$ — максимальная расчетная и допустимая силы (нагрузки) на изоляторы; σ_{max} и $\sigma_{\text{доп}}$ — максимальное расчетное и допустимое напряжение в материале шин.

Таблица 2

Марка сплава	Значение $C_T, A \cdot c^{1/2}/\text{мм}^2$ при длительно допустимой рабочей температуре $v_{\text{доп}}$, равной	
	90 °С	120 °С
АД0	81	68
АД31Т1	77	64
АД31Т	74	62
АД33Т1	71	59
АВТ1	66	55
1915, 1915Т	60	51

Допустимые нагрузки на изоляторы (одноствоечных изоляционных опор) принимаются равными 60 % разрушающей нагрузки, допустимые напряжения в шине — 70 % временного сопротивления разрыву (предела прочности) материала σ_B .

Для шин, имеющих сварные соединения, помимо условия (9), должно выполняться неравенство

$$\sigma_{\text{max, св}} \leq \sigma_{\text{доп, св}} \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{max, св}}$ — максимальное расчетное напряжение в области сварного шва шины; $\sigma_{\text{доп, св}}$ — допустимое напряжение с учетом снижения прочности после сварки, которое можно принять равным 0,7 временного сопротивления материала шины в зоне сварного шва $\sigma_{B, св}$.

Временное сопротивление $\sigma_{B, св}$ рекомендуется определять экспериментально для каждой партии труб (заготовок шин). Временное сопротивление разрыву в области сварного шва шин из сплава АВТ1 составляет не более 0,5 σ_B , а 1915Т — 0,9 σ_B .

Неверная оценка, прежде всего, R_{max} и $R_{\text{доп}}$ может привести к повреждениям шинной конструкции. На рис. 8 приводится пример такого повреждения при испытаниях жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ на электродинамическую стойкость.

Значения максимальных нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин при КЗ могут быть приведены к виду

$$R_{\text{max}} = \beta \frac{\alpha \cdot I}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta; \quad \sigma_{\text{max}} = \frac{\alpha \cdot I^2}{\lambda \cdot a \cdot W} i_{\text{уд}}^2 \eta, \quad (11)$$

где $\alpha = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ для параллельных шин, расположенных в одной плоскости при трехфазном КЗ; a — расстояние между фазами, м; $i_{\text{уд}}$ — ударный ток КЗ, А; η — динамический коэффициент; W — момент сопротивления поперечного сечения шины, м³; λ и β — коэффициенты, зависящие от условий опирания шин на опоры пролета (расчетной схемы пролета шины).

Динамический коэффициент зависит от взаимного расположения шин, вида КЗ, частоты собственных колебаний шинной конструкции, которая равна

$$f_1 = \frac{r^2}{2\pi \cdot I^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (12)$$

где r — параметр частоты собственных колебаний; E — модуль упругости, Па; J — момент инерции поперечного сечения шины, м⁴; m — масса шины на единицу длины, кг/м; l — длина пролета шины, м.



а



б

Рис. 8. Повреждения опытных пролетов жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ при испытаниях токами КЗ

В качестве примера, на рис. 9 приводится одна из возможных расчетных схем (характерная для внутриячейковых связей) шины ОРУ 110-500 кВ и зависимость параметра частоты r от $C_{\text{оп}} I^3/EJ$ (здесь $C_{\text{оп}}$ — жесткость средней опоры) при различных значениях отношения $M_{\text{оп}}/(ml)$ (где $M_{\text{оп}}$ — приведенная масса опоры) для данной расчетной схемы. Динамический коэффициент η для параллельных шин, расположенных в одной плоскости, в зависимости от частоты собственных колебаний приводятся, например, в [4].

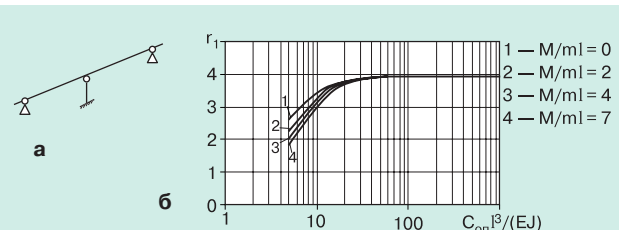


Рис. 9. Расчетная схема (а) и зависимость параметра первой частоты собственных колебаний r_1 системы шины — опоры (изоляторы) от $C_{\text{оп}} I^3/EJ$ при различных значениях $M_{\text{оп}}/m l$

Следует отметить, что обычно частота собственных колебаний шин менее 10 Гц, поэтому динамический коэффициент меньше 1. Например, для сборных шин типовых ОРУ 330 и 500 кВ частота собственных колебаний ошиновки составляет примерно 1-2 Гц, а динамический коэффициент — 0,25-0,4 (при постоянной времени затухания аperiодической составляющей тока КЗ, равной 0,05-0,2 с).

8. В системах с быстродействующими АПВ следует проводить расчет электродинамической стойкости при повторных включениях на КЗ. При этом необходимо

учитывать рассеяние энергии при колебаниях шинных конструкций, частоту собственных колебаний, время бестокой паузы и другие факторы. Инженерные оценки R_{\max} и σ_{\max} при неуспешных АПВ проводятся при наиболее неблагоприятных по условиям электродинамической стойкости углах включения и отключения тока КЗ.

Вместе с тем, 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, с, составляет

$$t_{\text{БП}} \geq 2,3 / (f_1 \cdot \delta_x), \quad (13)$$

где δ_x — декремент затухания при горизонтальных колебаниях шин.

9. Расчет шин на ветровую скорость (прочность) учитывает как статическую (неизменяющую во времени) \bar{V} , так и динамическую (пульсирующую) $v(t)$ составляющую скорости ветра

$$V = \bar{V} + v(t). \quad (14)$$

Динамические составляющие скорости $v(t)$ и, следовательно, ветровой нагрузки рассматриваются как стационарные случайные процессы [8]. В результате расчета наибольшие нагрузки на опоры и напряжения в шине приводятся к виду

$$R_{\max} = q_{\text{ст.в}} \cdot l \cdot \eta_B; \quad \sigma_{\max} = \frac{q_{\text{ст.в}} \cdot l^2}{\lambda \cdot W} \eta_B, \quad (15)$$

где $q_{\text{ст.в}} = 0,5 \cdot \rho_B \cdot c_x \cdot D V_0^2$ — статическая составляющая ветровой нагрузки, Н/м; ρ_B — плотность воздуха, кг/м³; c_x — коэффициент лобового сопротивления шины; V_0 — нормативная скорость ветра на высоте шины, м/с; η_B — динамический коэффициент ветровой нагрузки, зависящий от частоты собственных колебаний и декремента затухания ошиновки, скорости ветра, а также стандартов случайных функций R и σ и определяемый по формуле

$$\eta_B = 1 + \xi_B V_0^{-1/3}, \quad (16)$$

где ξ_B — параметр динамичности, (м/с)^{-1/3}.

Параметр ξ_B определяется по кривым (рис. 10). При первой (основной) частоте собственных колебаний шинной конструкции в горизонтальной плоскости больше 5 Гц параметр динамичности принимается, равным

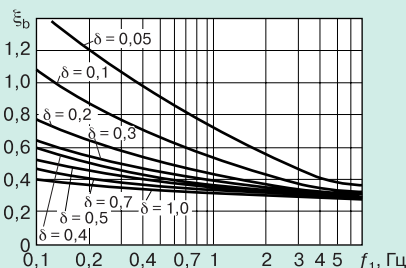


Рис. 10. Зависимость параметра динамичности при ветровых нагрузках от значений первой собственной частоты при различных логарифмических декрементах затухания

$0,3(\text{м/с})^{-1/3}$. Изоляторы и шины отвечают ветровой стойкости, если выполняются неравенства (9) и (10).

10. Ошиновка ОРУ не должна быть подвержена устойчивым ветровым резонансным колебаниям, которые возбуждаются периодическими срывами вихрей при скорости ветра, лежащей в пределах

$$K_1 V_s \leq V \leq K_2 V_s, \quad (17)$$

где $V_s = df_{1y}/Sh$ — струхалевская скорость ветра, м/с; $Sh \approx 0,2$ — число Струхалея; f_{1y} — первая частота собственных колебаний шины (12) в вертикальной плоскости, Гц; K_1 и K_2 — коэффициенты, определяющие область скоростей ветра при устойчивых резонансных колебаниях, примерно равные, соответственно, 0,7-1,0 и 1,0-1,3.

Устойчивые резонансные колебания не возбуждаются, если наибольший (расчетный) прогиб шины $U_{p,\max}$ при вихревых возбуждениях не достигает критических (допустимых) значений $U_{p,\text{доп}}$, то есть

$$U_{p,\max} \leq U_{p,\text{доп}}. \quad (18)$$

Допустимый прогиб при вихревых возбуждениях лежит в пределах 0,02-0,1 диаметра шины D , а наибольший прогиб зависит от коэффициента подъемной силы, жесткости и декремента затухания шины при колебаниях в вертикальной плоскости.

Как показывают исследования и опыт эксплуатации, резонансная скорость ветра невелика и составляет не более 2-3 м/с. Напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы в этом режиме обычно существенно меньше допустимых значений. Однако продолжительность ветровых резонансных колебаний может быть длительной (несколько часов), что оказывает отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, а также может приводить к ослаблению болтовых соединений и усталостным повреждениям элементов конструкций.

Наиболее эффективный метод борьбы с ветровыми резонансами — это установка шинодержателей специальной конструкции и прокладка внутри трубчатых шин проводов (тросов) или металлических стержней, которые обеспечивают необходимый уровень рассеяния энергии при колебаниях шин.

11. Расчет на стойкость изоляторов и шин при сочетании ветровых q_B , гололедных q_r , электродинамических q_9 нагрузок, а также нагрузок от собственного веса и веса ответвлений $q_{\text{ш}}$ проводится при условии, что результирующее воздействие (в векторной форме) равно

$$\bar{q}_\Sigma = \gamma_1 \cdot \bar{q}_B + \gamma_2 \cdot \bar{q}_r + \gamma_3 \cdot \bar{q}_9 + \bar{q}_{\text{ш}}, \quad (19)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — коэффициенты, принимаемые в соответствии с рекомендациями ПУЭ [9] и другими документами.

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;
- 2) вес ошиновки, ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра и ЭДН, без учета АПВ, равная 65 % максимального расчетного значения (то есть 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).

Жесткая ошиновка и ее элементы должны подвергаться приемо-сдаточным испытаниям и проверкам, указанным в табл. 3.

Таблица 3

Виды испытаний или проверок	Используемый ГОСТ
Внешний осмотр	-
Испытания на нагрев номинальным током	8024-90
Испытание относительного сопротивления электрического контакта болтовых и опрессованных зажимов	Р 51155-98 17441-84
Проверка прочности заделки проводов	Р 51155-98
Проверка узла свободного крепления ошиновки	-
Проверка максимального прогиба шины	-
Проверка качества сварных соединений	14782-86
Проверка прочности сварных соединений	18482-79 6996-66
Испытание на термическую и электродинамическую стойкость	10434-82
Испытание на стойкость к воздействию климатических факторов внешней среды	15150-69 16962.2-90
Испытание на сейсмоустойчивость	17516.1-90
Испытание на радиопомехи	1516.2-97
Испытание на прочность при гололеде	-
Проверка ошиновки на ветровую стойкость и отстройку от ветровых резонансов	-
Испытание на прочность при транспортировании	23216

Следует отметить, что испытания на электродинамическую стойкость требуется проводить на трехпролетных шинных конструкциях. Допускается испытывать двухпролетные конструкции. При этом контрольными являются изоляторы, установленные в середине опытной конструкции. Проводить испытания на электродинамическую стойкость однопролетных конструкций не допускается.

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

$$i_{\text{дин}}^{(3)} = i_{\text{дин}}^{(2)} \sqrt{\frac{2 \eta^{(2)}}{\sqrt{3} \eta^{(3)}}}, \quad (20)$$

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.

Длительность КЗ устанавливается не менее половины периода собственных колебаний, то есть $T/2 = 1/(2f)$. В этом случае будут достигнуты наибольшие значения нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин. Наибольшая продолжительность КЗ определяется

требованиями термической стойкости и устанавливается не менее времени термической стойкости выключателя.

Проверку ошиновки на ветровую стойкость и отстройку от ветровых резонансов при приемо-сдаточных испытаниях допускается проводить на основе экспериментально-аналитических результатов. Но этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

ВЫВОДЫ

1. В РУ с жесткой ошиновкой целесообразно использовать прогрессивные крепежные элементы, исключающие выполнение сварочных работ при монтаже и обеспечивающие необходимый уровень надежности, а также компенсацию температурных деформаций, эффективное подавление ветровых резонансных колебаний и др.

2. Экономическая эффективность жесткой ошиновки в значительной мере определяется использованием современных компоновок ОРУ, применением быстромонтируемых компактных и комплектных модулей, использованием современных коммутационных аппаратов, в том числе, пантографических разъединителей.

3. Надежность жесткой ошиновки обеспечивается качеством ее изготовления, монтажа, а также строгим выполнением требований нормативных документов [1-4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 50736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока КЗ (вводится с 01.07.2008 взамен ГОСТ Р 50254 – 92).
- СО 153-34.20.122-2006. «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ».
- Руководящий документ по проектированию жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ (принят в качестве СтО 25.06.2007, приказ ОАО «ФСК ЕЭС» № 176).
- Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ (принят в качестве СтО 25.06.2007, приказ ОАО «ФСК ЕЭС» № 176).
- Долин А.П., Шонгин Г.Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Кудрявцев Е.П., Долин А.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. — М.: Энергия, 1981.
- Долин А.П., Кудрявцев Е.П., Козина М.А. Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений. — Электрические станции, 2005, № 4.
- Долин А.П. Исследование стойкости жесткой ошиновки при ветровых нагрузках. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1990, № 4.
- Правила устройства электроустановок. — 7-е изд.