
**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»**



**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
ОАО «ФСК ЕЭС»**

**СТО
56947007-29.060.10.005-2008**

**Руководящий документ
по проектированию 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 Руководящем документе

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

2. ИСПОЛНИТЕЛИ: А. П. Долин; 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

Настоящий стандарт организации не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения ОАО «ФСК ЕЭС»

Содержание

1 Введение	4
Область применения	4
Нормативные ссылки	4
Термины и определения.....	5
2 Область применения жесткой ошиновки.....	5
3 Технические требования к элементам жесткой ошиновки	5
4 Выбор материала, формы сечения, длины пролета сборных шин, ответвлений и внутриячейковых связей	6
5 Проектирование демпфирующих устройств и способы подавления ветровых резонансных колебаний.....	10
6 Проектирование внутриячейковых связей и ответвлений.....	11
7 Проектирование компенсаторов температурных деформаций и шинодержателей.....	14
8 Требования к изоляционным опорам	16
9 Условия и порядок проверки элементов жесткой ошиновки в рабочих и аварийных режимах	17
10 Пример расчета жесткой ошиновки ОРУ	20
Список литературы	33

1 Введение

Область применения

Руководящий документ предназначен для проектирования жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ и определяет область ее применения, а также требования к основным элементам и узлам: сборным шинам, ответвлениям, изоляционным (шинным) опорам, шинодержателям, компенсаторам температурных деформаций.

Руководящий документ рекомендуется к применению проектными организациями, заводами-изготовителями, испытательными центрами, а также эксплуатационными и монтажными предприятиями.

Нормативные ссылки

В настоящем Руководящем документе 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.

Термины и определения

В настоящем Руководящем документе используются следующие термины с соответствующими определениями:

Жесткая ошиновка - ошиновка ОРУ и ЗРУ, выполненная жесткими шинами, как правило, из труб алюминиевых сплавов.

ОРУ (ЗРУ) с жесткой ошиновкой - распределительное устройство (РУ), у которого сборные шины и/или шины внутрирядковых связей выполнены жесткими шинами.

2 Область применения жесткой ошиновки

2.1 Жесткая ошиновка может использоваться в ОРУ всех напряжений. Выбор вида ошиновки ОРУ и ЗРУ (жесткой или гибкой) определяется технико-экономическими требованиями и зависит от параметров электроустановки: напряжения, рабочего тока, тока короткого замыкания (КЗ), схемы электрических соединений, требований, предъявляемых к конструкциям ОРУ, а также ожидаемых климатических воздействий.

2.2 В ОРУ и ЗРУ напряжением 110-500 кВ рекомендуется использовать экономичные конструктивные решения с жесткой трубчатой ошиновкой, прежде всего комплектных, блочных и других решений высокой заводской готовности.

2.3 Конструктивно может быть оправдано сочетание гибких и жестких проводников, например жестких сборных шин и гибких внутрирядковых связей.

3 Технические требования к элементам жесткой ошиновки

3.1 Жесткая ошиновка включает в себя жесткие шины, шинодержатели, компенсаторы температурных деформаций, спуски или ответвления, изоляторы или изоляционные опоры, строительные конструкции и другие узлы.

3.2 Все элементы жесткой ошиновки должны отвечать:

- уровню номинального напряжения электроустановки;
- установленному уровню перенапряжений;
- наибольшему рабочему току;
- максимальным токам одно-, двух- и трехфазных коротких замыканий (КЗ);
- условиям окружающей среды [1], [4];¹
- ожидаемому максимальному ветровому напору;
- ожидаемым наибольшим гололедным отложениям;

¹ Здесь и далее ссылка на список использованной литературы.

- максимальным и минимальным температурам воздуха;
- наибольшему (летнему) уровню солнечной радиации;
- степени загрязнения атмосферы;
- допустимому уровню радиопомех и отсутствию общей короны.

3.3 Жесткая ошиновка должна удовлетворять эстетическим и психологическим аспектам. В частности шины не должны иметь значительных прогибов от собственного веса (включая вес ответвлений), а также собственного веса и веса гололедных отложений, вызывающих негативную реакцию эксплуатационного персонала.

Должны эффективно подавляться устойчивые ветровые резонансные колебания шин (поперек воздушного потока), вызванные срывами вихрей при относительно малых скоростях ветра (даже в тех случаях, когда такие колебания не представляют опасности для шинной конструкции по условиям механической прочности).

3.4 Высокие технико-экономические показатели ОРУ с жесткой ошиновкой могут быть достигнуты в результате использования следующих решений:

- индустриальных шинных конструкций высокой заводской готовности, в том числе блочных комплектных подстанций (распределительных устройств), быстромонтируемых модулей и т.п.;

- компоновок ОРУ, позволяющих сократить занимаемую площадь, а также материалоемкость, благодаря использованию конструкций с жесткими шинами, в сочетании с другим прогрессивным оборудованием (элегазовыми выключателями, пантографическими и полупантографическими разъединителями, комбинированными измерительными трансформаторами и др.);

- металлоконструкций опор и порталов из коррозионностойких сталей или сталей с надежным антикоррозионным покрытием, а также облегченных предварительно-напряженных железобетонных стоек и лежней;

- сокращением сроков строительства ОРУ, снижению объемов или полным отказом от проведения сварочных работ на монтажной площадке, низким профилем ошиновки и др.;

- удобством проведения диагностического контроля, что обеспечивает надежность работы ошиновки.

4 Выбор материала, формы сечения, длины пролета сборных шин, ответвлений и внутрирядковых связей

4.1 В ОРУ или ЗРУ (далее - РУ) напряжением 110-500 кВ рекомендуется использовать жесткие трубчатые шины (шины кольцевого сечения) наиболее оптимальные по условиям короны, радиопомех, материалоемкости, охлаждения, ветровой и электродинамической стойкости.

Возможно применение плоских и пространственных шин-ферм (изготовленных из труб относительно небольшого диаметра), прежде всего при создании длинно-пролетных конструкций. Применение таких конструкций требует отдельного технико-экономического обоснования.

4.2 В качестве материала жестких шин РУ 110 кВ и выше следует использовать алюминиевые сплавы, обладающие высокой прочностью при хорошей электрической проводимости. Этим требованиям отвечает прежде всего сплав 1915Т, а также АВТ1 (и их зарубежные аналоги).

4.3 Жесткими могут выполняться сборные шины, а также внутриячейковые связи нижнего яруса. Внутриячейковые связи верхнего яруса, как правило, выполняются гибкими (сталеалюминевыми) проводами. Отдельные участки сборных шин и внутриячейковых связей нижнего яруса также могут быть гибкими. Вопрос о выборе типа шин определяется, прежде всего, конструктивными соображениями и технико-экономическими показателями.

Следует учитывать, что допустимые расстояния между фазами, а также между токоведущими частями и заземленным оборудованием в РУ с жесткими проводниками существенно ниже, чем с гибкими. Вместе с тем, расстояния между проводниками внутриячейковых связей, как правило, определяются расстоянием между фазами выключателей. Поэтому выбор типа проводников здесь определяется конструктивными соображениями, удобством монтажа и строительства с учетом технико-экономических показателей.

4.4 Жесткие трубчатые шины в ОРУ должны иметь в торцевых частях заглушки, которые препятствуют гнездованию птиц. Целесообразно предусматривать отверстия в заглушках шин для циркуляции воздуха или дренажные отверстия в нижней части шин в местах их наибольшего прогиба от собственного веса и веса ответвлений для слива конденсата.

4.5 Длина пролета сборных шин (расстояние между соседними изоляционными опорами), как правило, выбирается равной шагу ячейки. Допускается использовать пролеты кратные шагу ячейки или равные половине (или менее) шага ячейки.

4.6 Наибольшая длина пролета (расстояние между опорами) определяется конструктивными соображениями и технико-экономическими показателями с учетом прочности шин, изоляционных опор, значением механических нагрузок, наличием жестких и гибких ответвлений. Она ограничивается допустимым прогибом шины от собственного веса, а также от собственного веса с учетом веса гололеда (п. 9.11 настоящего Руководящего документа).

Длина целого (или сварного) участка шины обычно принимается равной длине пролета (рис. 1, а). Допускается использовать целые (или сварные) шины, длина которых равна двум и более пролетам (рис. 1, б, в). Такие шины оправдано использовать в качестве внутриячейковых связей.

4.7 Высота расположения шин определяется требованиями [1] и выбирается с учетом обеспечения проезда ремонтных механизмов, уровня напряженности электрического поля на высоте равной росту человека, параметров применяемого оборудования, особенности схемы электрических соединений и компоновки оборудования, а также задачей снижения общего профиля (высоты) ОРУ.

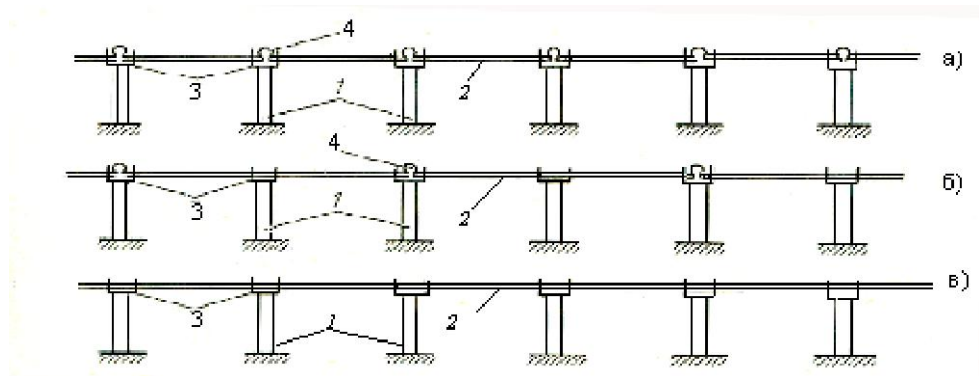


Рис. 1 Шинные конструкции с одно-, двух- и многопролетными неразрезными шинами: 1 - изоляторы; 2 - шины; 3 - шинодержатели; 4 - компенсаторы тепловых расширений.

4.8 Шины могут непосредственно монтироваться на опорных изоляторах, измерительных трансформаторах или электрических аппаратах (рис. 1, рис. 2, а), на надставках, закрепленных на изоляторах (рис. 2, б, в) или жестких шинах нижнего яруса.

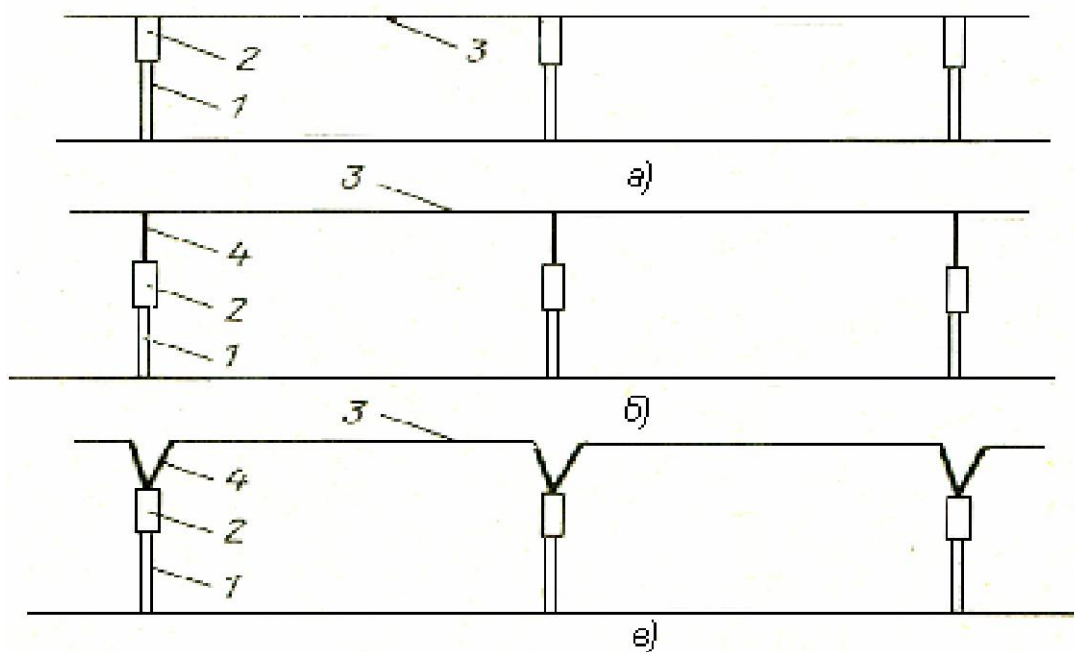


Рис. 2 Варианты установки шин на опорных изоляторах: а - непосредственная установка на изоляционные опоры; б - крепление на вертикальных стойках; в - крепление на V-образных надставках. 1 - опоры, 2 - изоляторы, 3 - шины, 4 - надставки.

4.9 Материал и профиль надставок, как правило, аналогичен шинам. Надставки могут выполняться в виде вертикальных стоек, V-образных и других конструкций, расположенных в плоскости осей изоляторов каждой фазы (рис. 2, б, в, рис. 3, а) или в виде наклонных стоек (рис. 3, б, в). Надставки могут выполняться в одной, двух или трех фазах в зависимости от конструктивных соображений.

Следует учитывать, что установка сборных шин на надставках приводит к увеличению изгибающих моментов на изоляционные опоры при

электродинамических и ветровых воздействиях, а также к дополнительному расходу материала шин.

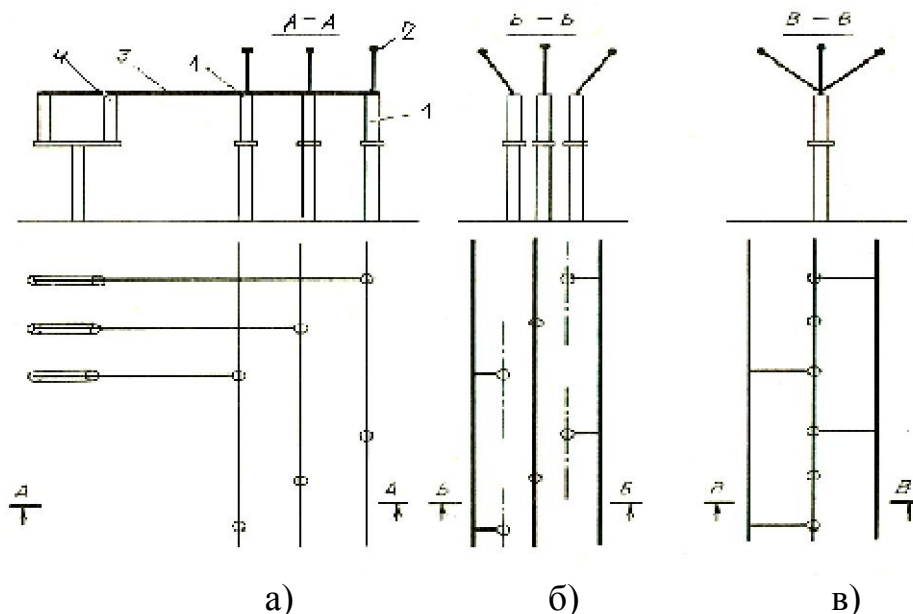


Рис. 3 Сборные шины на вертикальных а) и наклонных б), в) надставках: 1 - изолятор, 2 - шина; 3 - ответвление; 4 - разъединитель.

4.10 Ответвления от жестких трубчатых шин, а также соединения отдельных участков шин должны выполняться сваркой, опрессовкой (для гибких проводников спусков) или сертифицированными обжимными разъёмными соединениями заводского изготовления. Разъёмные соединения (в том числе шинодержатели - компенсаторы) должны быть доступны для диагностического тепловизионного контроля термографическими приборами с уровня земли. Сварные соединения должны выполняться в заводских условиях. В исключительных случаях эти работы могут проводиться на месте монтажа под контролем представителей завода-изготовителя.

4.11 При выполнении сварных соединений шин из алюминиевых сплавов следует учитывать, что в результате отжига происходит снижение прочности материала (п. 9.14). Не рекомендуется выполнять сварные соединения на участке шины с наибольшим изгибающим моментом (механическим напряжением) при статических и динамических нагрузках.

4.12 Расстояния между жесткими шинами РУ 110 кВ и выше, а также между токоведущими частями и заземленным оборудованием должно отвечать требованиям [1] с учетом возможных наибольших отклонений проводников и изоляционных опор при наибольшей расчетной скорости ветра и после отключения двух- и трехфазных КЗ.

4.13 Для крепления жесткой ошиновки используются фарфоровые и полимерные опорные изоляторы и изоляционные опоры.

В качестве исключения допускается использовать крепления шин на подвесных гирляндах изоляторов к порталам (рис. 4). Такое решение позволяет сократить расстояния между фазами по сравнению с гибкими шинами (проводами). Однако, как правило, решение с жесткими шинами на

подвесных гирляндах изоляторов по технико-экономическим показателям уступает традиционным решениям с гибкими проводниками.

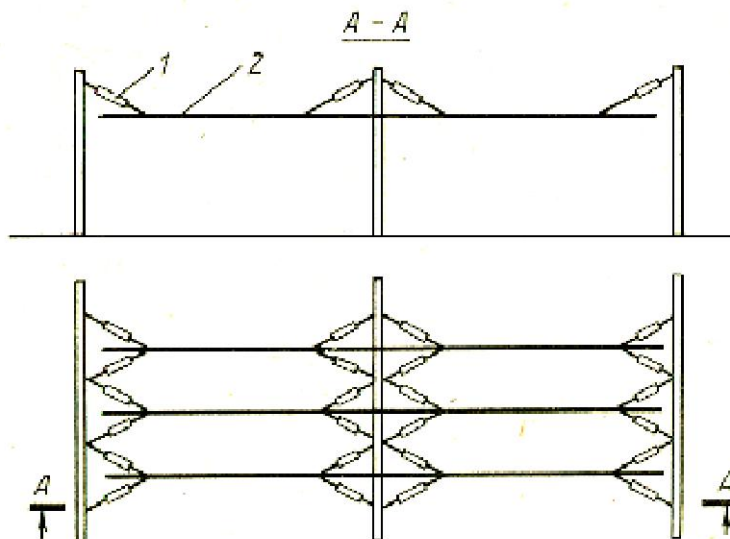


Рис. 4 Крепление жестких шин на подвесных изоляторах.

4.14 Шины должны отвечать условиям нагрева в рабочих режимах (нагрузочной способности), термической, электродинамической и ветровой стойкости, а также отвечать условиям проверки на корону, отстройки от устойчивых резонансных колебаний (п. 4.6, раздел 8 настоящего Руководящего документа).

5 Проектирование демпфирующих устройств и способы подавления ветровых резонансных колебаний

5.1 Трубчатые шины в ОРУ подвержены вихревым возбуждениям (ветровым резонансам, эоловым колебаниям), которые сопровождаются колебаниями поперек воздушного потока. Такие колебания вызывают усталостные повреждения, прежде всего контактных соединений, ослабление болтовых креплений конструкции, а также негативное психологическое воздействие на эксплуатационный персонал.

5.2 Для борьбы с ветровыми резонансными колебаниями следует использовать технические решения, обеспечивающие увеличение рассеяния энергии при колебаниях шины в вертикальной плоскости (поперек воздушного потока).

5.3 Снижению уровня амплитуды колебаний и повышению эффективности отстройки от устойчивых ветровых колебаний способствует уменьшение диаметра шины, снижение частоты собственных колебаний (например, путем установки на шину дополнительных грузов).

5.4 Для отстройки от резонансов возможна установка на шины специальных элементов (например, интерцепторов), препятствующих синхронному срыву вихрей по длине шины.

Использование интерцепторов допустимо только после натурных испытаний (опытной эксплуатации отдельных пролетов), так как их

неправильная расстановка может провоцировать вихревые возбуждения.

Шина (участок шины) с установленными интерцепторами должна испытываться на отсутствие короны и радиопомех согласно требованиям п. 4.13 [4].

5.5 Достаточное рассеяние энергии и эффективное подавление устойчивых резонансных колебаний обеспечивают:

- установленный внутри шины провод, трос или стержень;
- конструкционное демпфирование в узлах крепления шины (в шинодержателях).

Целесообразно использование шинодержателей специальной конструкции, увеличивающих рассеяние энергии при колебаниях шин.

5.6 Допускается проверять эффективность принятых конструктивных решений для подавления устойчивых резонансных колебаний (за счет достаточного рассеяния энергии) на основе экспериментального определения декрементов затухания при колебаниях шины в вертикальной плоскости (при амплитуде колебания равной от 1 до 5 диаметров шины) и результатов расчетов, согласно указаниям п. 2.6 ГОСТ Р 50254-92 [5]. Расчет следует проводить без учета гололедных отложений, так как наличие гололеда за счет увеличения массы способствует снижению уровня амплитуды резонансных колебаний.

5.7 При недостаточном уровне рассеяния энергии для подавления ветровых резонансных колебаний шин следует увеличить длину проложенного внутри шины троса до величины равной длине пролета, использовать шинодержатели другого конструктивного исполнения, обеспечивающие более высокое трение в опорном сечении шины, применить шины большей массы или рекомендации пп. 5.3 и 5.4 настоящего Руководящего документа.

6 Проектирование внутриячейковых связей и ответвлений

6.1 Нижние внутриячейковые связи и ответвления могут выполняться жесткими трубами или сталеалюминиевыми проводами. Выбор проводников определяется, прежде всего, конструктивными и технико-экономическими соображениями, с учетом удобства монтажа. Верхние ячейковые связи целесообразно выполнять гибкими. Допускается использование жестких проводников с учетом рекомендаций п.п. 4.11 и 4.14 настоящего Руководящего документа.

6.2 Требования к жестким проводникам внутриячейковых связей изложены в разделе 4 и 5 настоящего Руководящего документа, гибкие проводники выбираются согласно требованиям действующих нормативных документов.

6.3 Жесткие ответвления от сборных шин выполняются Г-образными (верхними, нижними), арочными и другими (рис. 5).

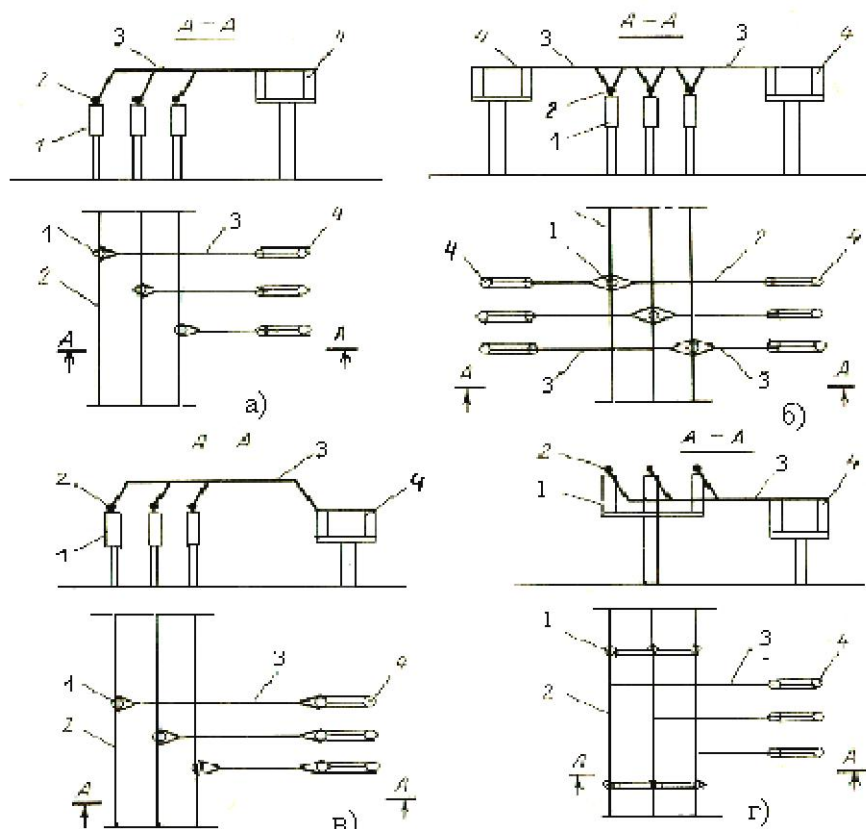


Рис. 5 Варианты жестких ответвлений: а – Г-образное верхнее; б – Г-образное верхнее в две стороны; в – арочное верхнее; г – Г-образное нижнее; 1 – изолятор; 2 – шины; 3 – ответвление; 4 – разъединитель.

6.4 Соединения сборных шин и жестких ответвлений следует выполнять сертифицированными креплениями обжимного типа заводского изготовления или с помощью сварки, которая производится на заводе-изготовителе. Элементы со сварными соединениями используются при монтаже в виде узлов комплектного типа.

В исключительных случаях допускается выполнять сварочные работы на месте монтажа под контролем представителей завода-изготовителя.

Сварные соединения целесообразно выполнять на заводе-изготовителе и использовать как узлы ответвления комплектного типа.

6.5 Ответвления от сборных шин гибкими проводниками можно осуществлять прессованными зажимами, приваренными к жестким шинам на заводе или с помощью специальных сертифицированных креплений обжимного типа заводского изготовления, приведенными на рис. 6.

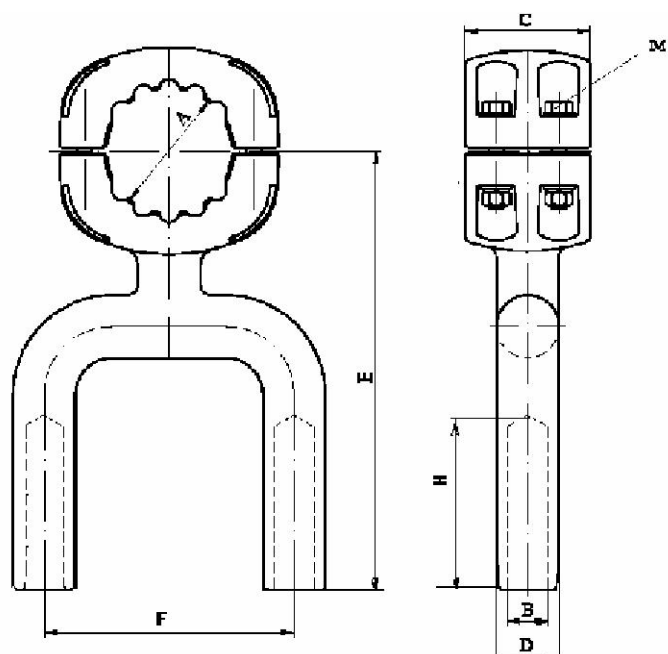


Рис. 6 Пример узла отвления гибкого проводника от сборной шины, выполненный с помощью присоединения обжимного типа заводского изготовления.

6.6 Присоединение жестких трубчатых шин к плоским зажимам аппаратов может выполняться переходниками, соединенными с шиной сваркой или шинодержателями-переходниками заводского изготовления, обеспечивающими необходимый электрический контакт (рис. 7), а при необходимости - компенсацию температурных деформаций жесткой шины. Электрические аппараты не должны испытывать дополнительные нагрузки от температурных деформаций шин.

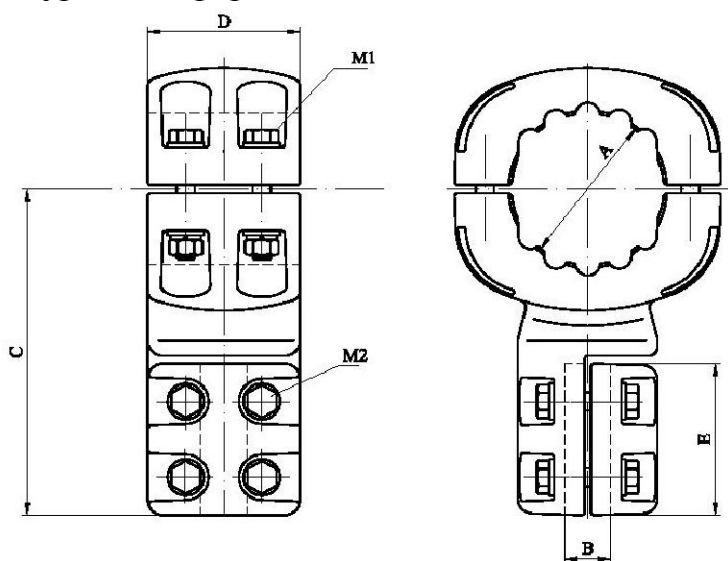


Рис. 7 Вариант исполнения узла присоединения трубчатой шины к аппарату.

6.7 Длина пролета внутричейковых связей нижнего яруса обычно меньше длины пролета сборной шины. В этом случае жесткие внутричейковые связи испытывают меньшие результирующие нагрузки (электродинамические, ветровые, гололедные, от собственного веса), чем

сборные шины. Поэтому допускается использовать в качестве материала внутриячейковых связей менее прочные алюминиевые сплавы, чем в сборных шинах, но обладающие большей электрической проводимостью (АВТ1, АДЗЗ и др. взамен 1915Т), если использование разных сплавов снижает материалоемкость ошиновки и отвечает всем другим требованиям.

6.8 Длина пролета шин нижнего яруса внутриячейковых связей определяется расстояниями между аппаратами, другим оборудованием ячейки и конструктивными соображениями.

7 Проектирование компенсаторов температурных деформаций и шинодержателей

7.1 Температурные деформации (удлинения и сжатия) шин не должны приводить к дополнительным усилиям на изоляционные опоры, аппараты, измерительные трансформаторы и другое оборудование, а также к дополнительным механическим напряжениям в материале шин.

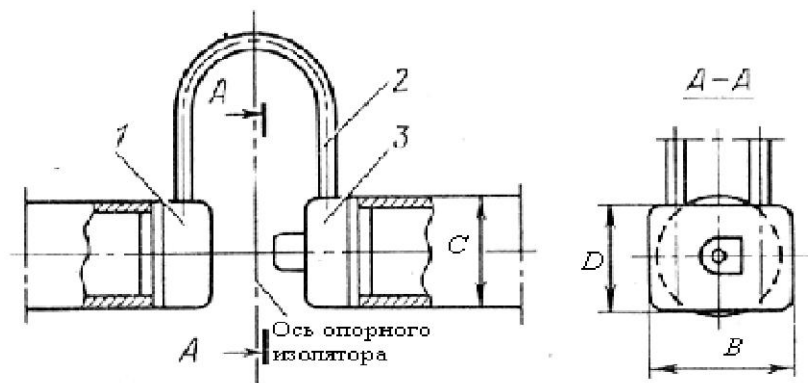
7.2 Свободное продольное перемещение шин во всем возможном интервале их температур обеспечивают компенсаторы температурных деформаций. Компенсация температурных удлинений за счет деформации в узлах поворотов не допускается.

7.3 Наименьшая температура шины равна минимальной температуре воздуха в районе расположения ОРУ. Наибольшая температура шины наступает при КЗ с наибольшими ожидаемыми током и длительностью. С запасом наибольшую температуру шин можно принять равной допустимой температуре шины при КЗ 200°С (п. 9.9 настоящего Руководящего документа).

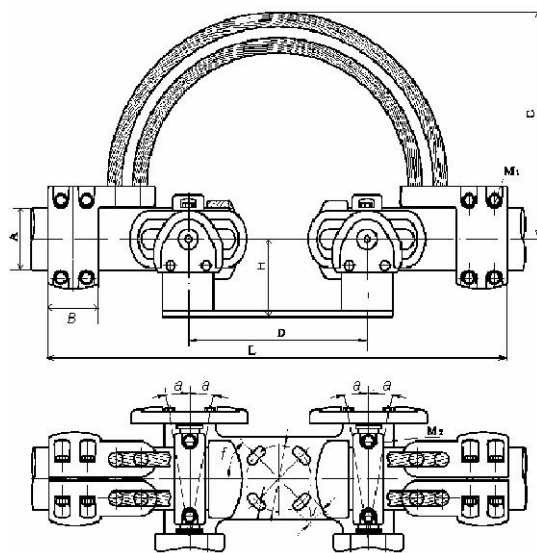
7.4 Компенсаторы температурных деформаций устанавливаются в опорных сечениях шины и могут выполняться в виде единого узла с шинодержателем.

7.5 Компенсацию температурных удлинений шин обеспечивают гибкие связи, которые рекомендуется выполнять из сталеалюминиевых или алюминиевых проводов. Количество проводов должно быть не менее двух. Суммарное сечение проводов определяется их суммарной нагрузочной способностью и термической стойкостью.

7.6 Гибкие связи (провода) компенсаторов температурных деформаций могут крепиться непосредственно к шинам или к обжимным шинодержателям заводского изготовления (рис. 8). В последнем случае продольные перемещения шин обеспечиваются за счет возможности перемещения отдельных элементов шинодержателей.



а)



б)

Рис. 8 Примеры температурных компенсаторов с различным способом крепления гибких связей: а) к шинам; б) к шинодержателям.

7.7 При монтаже шины используются шинодержатели двух исполнений:

1) обеспечивающие фиксированное крепление шины (препятствующие ее продольному перемещению);

2) имеющие свободное крепление (со свободным продольным перемещением) шины.

7.8 Неразрезной (цельный, сварной) участок шины должен иметь только один узел фиксированного крепления.

Если неразрезной отрезок шины равен длине пролета (рис. 1, а), то на одной опоре (изоляторе) пролета устанавливается узел фиксированного крепления, а на другой опоре - свободного.

7.9 В узлах фиксированного крепления разрезных шин (рис. 1, а) гибкие проводники выполняют функции электрической связи, а в узлах свободного крепления, кроме того, компенсаторов температурных деформаций.

7.10 Помимо основного назначения (п. 7.9) гибкие связи компенсаторов выполняют функции экранов в узле крепления шины. Эффективность экранирования проверяется согласно указаниям п. 9.4 настоящего Руководящего документа.

При отсутствии гибких связей, а также при неудовлетворительных результатах испытаний на корону с гибкими связями, необходима установка отдельного электростатического экрана.

7.11 Шинодержатели (компенсаторы температурных деформаций) в узлах свободного крепления шины должны обеспечивать продольные перемещения шины при гололедных отложениях.

7.12 Следует отдавать предпочтение шинодержателям, обеспечивающим наименее трудоемкий монтаж ошиновки (в том числе исключаящий или до минимума снижающий объем сварочных работ и опрессовку гибких элементов конструкции). Этим требованиям в наибольшей степени отвечают шинодержатели обжимного типа, имеющие в узлах свободного крепления компенсаторы температурных деформаций (рис. 8, б).

7.13 Прочность всех шинодержателей должна соответствовать ожидаемым электродинамическим, ветровым, гололедным нагрузкам, а также нагрузкам от собственного веса шины и ответвлений.

Заявленная заводом-изготовителем прочность шинодержателя должна подтверждаться статическими испытаниями на прочность, а также испытаниями на электродинамическую стойкость при полномасштабных испытаниях жесткой ошиновки.

8 Требования к изоляционным опорам

8.1 Изоляционные опоры могут состоять из одного или нескольких изоляторов, а также надставок (рис. 2 и 3). Предпочтение следует отдавать одностоечным изоляционным опорам.

8.2 Изоляторы должны отвечать номинальному напряжению установки, уровню ожидаемых перенапряжений, загрязненности атмосферы и уровню механических воздействий, вызванных токами КЗ, ветром, гололедом и весом ошиновки.

8.3 Условия выбора и проверки изоляторов определяются в пп. 9.1 и 9.2 настоящего Руководящего документа.

8.4 Параметры жесткой ошиновки зависят от жесткости и массы изоляционных опор, учет которых проводится согласно требованиям Методических указаний по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ [4].

Следует учитывать, что жесткость полимерных изоляторов, как правило, меньше фарфоровых (при одинаковых значениях номинального напряжения и разрушающей нагрузки); жесткость опор значительно снижается при использовании надставок.

8.5 При снижении жесткости, а также увеличении массы опор, частота собственных колебаний ошиновки снижается. Для шинных конструкций с низкой основной частотой собственных колебаний (ниже 20 Гц), типичной для сборных ОРУ 110 кВ и выше, это снижение благоприятно сказывается на увеличении электродинамической стойкости, однако обычно ведет к снижению ветровой стойкости ошиновки (к росту нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин).

8.6 Снижение жесткости опор приводит к увеличению максимальных прогибов шин при КЗ (в том числе после отключения КЗ) и ветре. Поэтому использование изоляционных опор с меньшей жесткостью в некоторых случаях могут потребовать увеличения расстояний между фазами и, таким образом, увеличения площади ОРУ.

8.7 Жесткость опор в расчетах следует принимать на основании экспериментальных данных, полученных с учетом податливости болтовых соединений.

Жесткость составных опор допускается определять расчетным путем на основании экспериментальных данных жесткости каждого элемента составной опоры.

9 Условия и порядок проверки элементов жесткой ошиновки в рабочих и аварийных режимах

9.1 Изоляторы и изоляционные опоры выбираются по удельной эффективной длине пути утечки в зависимости от степени загрязненности (в месте расположения электроустановки) и ее номинального напряжения. Выбор изоляторов и изоляционных опор может производиться также по разрядным характеристикам.

9.2 Изоляторы проверяются по условиям стойкости (прочности) при действии электродинамических, ветровых, гололедных нагрузок, а также веса шины и ответвлений от шин.

9.3 Наименьшие изоляционные расстояния между токоведущими элементами, а также проводниками и заземленными частями должны оставаться больше наименьших (допустимых расстояний) $A_{\phi-\phi}$ и $A_{\phi-з}$, определяемых (табл. 4.25 и 4.27) [1].

В ЗРУ наименьшие расстояния в свету соответствуют монтажным расстояниям и определяются без учета внешних воздействий. В ОРУ наименьшие расстояния в свету определяются с учетом воздействия ветровой нагрузки равной 60% максимальной расчетной для установленного ветрового района.

Кроме того, после отключения КЗ расстояния в свету между фазами, а также между токоведущими частями (фазами) и заземленным оборудованием должны оставаться больше наименьших допустимых расстояний при наибольших рабочих напряжениях, принимаемых по табл. 2.5.17 и 2.5.18 [1].

9.4 Ошиновка должна проверяться по условиям короны и радиопомех. Проверку шин по условиям короны допускается проводить расчетным путем. Предварительный расчет по условиям короны отдельных узлов крепления шин, ответвлений и других элементов, должен подкрепляться результатами их испытаний.

Трубчатые шины РУ напряжением до 220 кВ допускается не проверять по условиям короны, так как диаметр шин, выбранный по условиям прогиба от собственного веса, нагрева в рабочих режимах и при КЗ, а также электродинамической и ветровой стойкости, превосходит необходимое минимально допустимое значение и отвечает требованиям по условиям

короны и радиопомех.

9.5 Температурные 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 температурных деформаций и другими конструктивными решениями (пп. 7.1-7.9 настоящего Руководящего документа). Поэтому длина неразрезного (целого или сварного) участка шины должна выбираться исходя из условий свободного продольного перемещения шины в интервале температур, указанных в п. 7.3 настоящего Руководящего документа.

9.6 В рабочих режимах температура нагрева шин не должна превышать длительно допустимого значения. В соответствии с ГОСТ 8024 [6] допустимая температура нагрева шин, не имеющих разъемных контактов, составляет 120⁰С. Вблизи контактных соединений (например, с выводами аппаратов) допустимая температура шин не должна превышать допустимой температуры контакта, которая для контактов из алюминиевых сплавов без покрытия равна 90⁰С. Такую же температуру следует принимать в качестве длительно допустимой для шин, крепление которых выполняется шинодержателями обжимного типа (рис. 8, б).

9.7 При проверке шин по условиям нагрева в рабочих режимах (нагрузочной способности), а также термической стойкости следует учитывать, что удельные электрические сопротивления алюминиевых сплавов шин 1915Т и АВТ1 значительно выше, чем у технического алюминия и электротехнических сплавов АДЗ1.

9.8 При расчете нагрузочной способности шин должны приниматься наиболее тяжелые условия окружающей среды: наибольшая летняя температура воздуха, наибольший уровень солнечной радиации для данной широты местности (региона), штиль (скорость ветра близкая к нулю).

При проектировании допускается температуру воздуха принимать равной нормативному значению 40⁰С.

Следует учитывать, что в ОРУ при штиле условия конвективного теплообмена эффективнее, чем в ЗРУ и определяются свободно-вынужденной (смешанной) конвекцией. Теплообмен излучением зависит от отсутствия или наличия окраски шин, а нагрев - от солнечной радиации, кроме того, от цвета краски. Как правило, в ОРУ используются неокрашенные шины. Коэффициент излучения, а также коэффициент поглощения солнечной радиации поверхности неокрашенных шин следует принимать для окисленного алюминия, если производителем шин не оговаривается другое состояние поверхности.

9.9 В соответствии с ПУЭ шины считаются термически стойкими (т.е. выдерживают без повреждений тепловое воздействие токов КЗ), если их температура при КЗ остается ниже кратковременно допустимой температуры, которая для алюминия и его сплавов принимается равной 200⁰С.

9.10 При оценке термической стойкости ток и продолжительность КЗ оправдано принять равной току и времени термической стойкости

выключателя. Допускается ток КЗ принять равным расчетным ожидаемым значениям, а продолжительность КЗ - сумме полного времени действия выключателя и времени действия резервной защиты.

9.11 По эстетико-психологическим соображениям, с учетом технико-экономических требований, наибольший прогиб шин от собственного веса и силы тяжести ответвлений (без учета гололедных отложений) не должен превышать $1/100$ длины пролета. Кроме того, в ОРУ наибольший прогиб шин с учетом гололедных отложений должен быть не более $1/80$ длины пролета.

9.12 Шинные конструкции (включая изоляторы, шины и другие элементы и узлы) должны удовлетворять параметрам стойкости (прочности) при электродинамических, ветровых, гололедных нагрузках, а также нагрузках от веса шин и ответвлений.

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

1) вес ошиновки, вес гололедных отложений при нормативной толщине стенки и нормативная ветровая нагрузка;

2) сила тяжести ошиновки, ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра и электродинамической нагрузке (ЭДН), без учета АПВ, равная 65% максимального расчетного значения (т.е. при токе КЗ равна 80% от максимального расчетного значения);

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

4) вес ошиновки и ЭДН 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 (раздел 5 настоящего Руководящего документа).

Ошиновка ЗРУ проверяется только при сочетании нагрузок от веса ошиновки, максимальной электродинамической нагрузки (без учета АПВ) и ветровой нагрузки, равной 60% нормативного значения.

9.14 Шинные конструкции отвечают условиям стойкости (прочности), если максимальные расчетные напряжения в материале шин и нагрузки на изоляционные опоры остаются меньше допустимых значений.

В области сварных швов шин наибольшие напряжения не должны превышать допустимых значений с учетом снижения прочности материала при сварке. Следует учитывать, что зона отжига достигает 70 мм.

9.15 Допустимое напряжение шины принимается равным 70% временного сопротивления разрыву (предела прочности) ее материала. Временное сопротивление необходимо принимать в соответствии с данными стандартов, технических условий или указаний.

В области сварного шва, за счет отжига временное сопротивление разрыву снижается и может составлять 50-94% предела прочности материала. Значения временных сопротивлений разрыву в области сварных швов следует принимать по данным завода изготовителя, но не более значений, установленных в [4].

9.16 Допустимые нагрузки на одиночные изоляторы (изоляционные

опоры) согласно [1] составляют 60% минимальной разрушающей силы, сдвоенных изоляторов (опор) - 50% суммарного разрушающего усилия параллельных опор. Указанные допустимые значения справедливы, если точка приложения нагрузки близка к вершине изоляционной опоры.

Если точка приложения нагрузки удалена от вершины опоры, то допустимая нагрузка уменьшается. В этом случае допустимая нагрузка корректируется из условия равенства моментов сил, приложенных к вершине изолятора и к центру тяжести поперечного сечения шины относительно опасного сечения изоляционной опоры (согласно [4]).

9.17 Электродинамическая стойкость шин, а также изоляторов определяется согласно [4]. Условия электродинамической стойкости шинной конструкции должны выполняться как при однократных КЗ, так и неуспешных автоматических повторных включениях (АПВ).

9.18 Стойкость (прочность) шин, а также изоляционных опор при ветровых нагрузках, определяется согласно требованиям [4] исходя из нормативной скорости ветра, установленной СНиП 2.01.01-82 [3] и [1]. Расчет на ветровую стойкость проводится с учетом действия электродинамической (пульсирующей) составляющей нагрузки, которая считается стационарным случайным процессом. Допускается ветровую нагрузку считать неизменной по фронту.

Направленное действие ветровой нагрузки принимается в расчетах перпендикулярной шине (угол атаки равен нулю).

9.19 Стойкость (прочность) при сочетании нагрузок: от собственного веса (включая вес ответвлений), гололедных, ветровых и электродинамических нагрузок следует определять согласно [4].

Если одна из ортогональных суммарных составляющих нагрузки (например, вертикальная) не превышает 25% другой составляющей (соответственно, горизонтальной) при расчетах на стойкость меньшей ортогональной составляющей нагрузки можно пренебречь (принять равной нулю).

10 Пример расчета жесткой ошиновки ОРУ

10.1 Исходные данные.

Ошиновка комплектных распределительных устройств блочного исполнения (КРУБ) 110 кВ (рис. 9). Сборные шины из сплава 1915, внешний диаметр которых $D = 100$ мм, внутренний 90 мм (толщина стенки $b = 5$ мм), имеют сварной шов на расстоянии от опорного сечения $Z_{св} = 2,5$ м. Длина пролета $l = 9$ м, длина неразрезного отрезка шины $L = 9,2$ м, расстояние между фазами $a = 1,4$ м. Шины закреплены шинодержателями в виде скоб на вертикальных надставках, выполненных из тех же труб, что и шины. Высота надставки $h_n = 1300$ мм. Для демпфирования колебаний в шинах проложен стальной пруток диаметром 5 мм.

Опорные изоляторы ИОС-110-1250 УХЛ1. Высота изолятора $H_{из} = 1100$ мм, высота чугунного фланца $h_{фл} = 100$ мм, масса $m_{из} = 70$ кг, наибольший диаметр фарфорового тела $D_{из} = 230$ мм.

Ошиновка расположена в Ш районе по скоростному напору ветра и Ш районе по толщине стенки гололеда. Минимальная зимняя температура в регионе $v_{\text{с, min}} = -47^{\circ}\text{C}$, а средняя зимняя температура $v_{\text{ср. зим}} = -15^{\circ}\text{C}$.

Наибольший ожидаемый рабочий ток $I_{\text{раб. нб}} = 2000 \text{ А}$, ударный ток КЗ $I_{\text{уд}} = 80 \text{ кА}$, действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\text{п0}} = 31,5 \text{ кА}$, постоянная времени затухания аperiodической с оставляющей тока КЗ $T_a = 0,05 \text{ с}$. Время термической стойкости (расчетная продолжительность КЗ) - 4 с. На ПС установлено быстродействующее АПВ с продолжительностью бестоковой паузы 0,3 с.

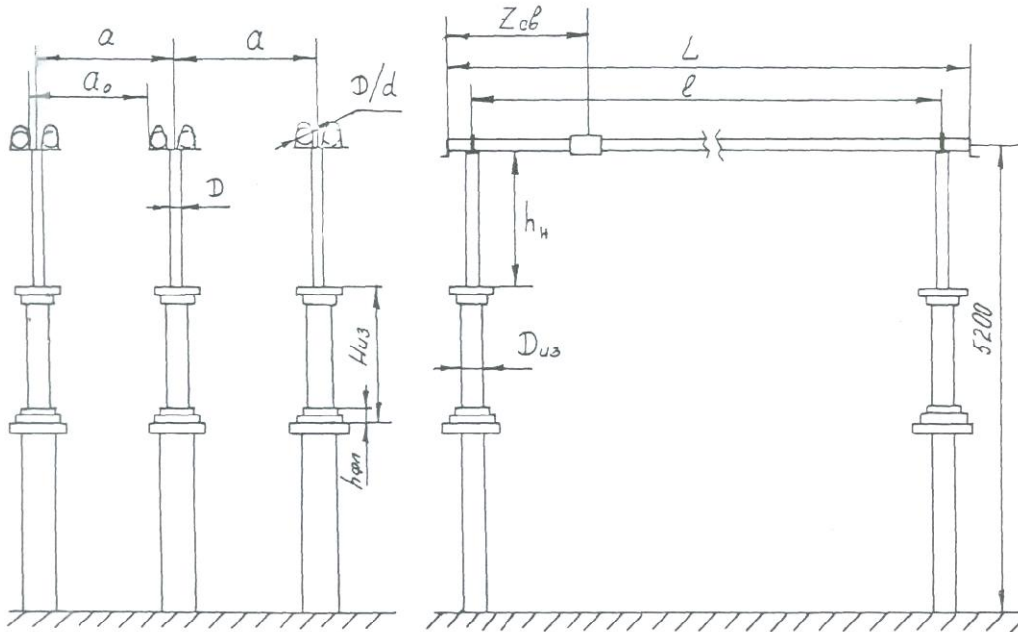


Рис. 9 Ошиновка 110 кВ.

10.2 Проверка шин по температурным удлинениям.

Здесь и ниже расчеты выполняются согласно настоящим рекомендациям и в соответствии с формулами, коэффициентами и параметрами, приведенными в [4].

Примем монтажную температуру воздуха, (и, следовательно, начальную температуру шины) равной $v_0 = 20^{\circ}\text{C}$, а длину неразрезного участка шины (согласно исходным условиям) $L = 9,2 \text{ м}$. Тогда в соответствии с формулой 1.9 и табл. 1.2 [4] длина шины при наименьшей температуре, равной минимальной зимней температуре, составляет:

$$L(v_{\text{min}}) = L_0 \cdot \prod_{i=1}^k (1 + \alpha_{ti} \cdot \Delta v_i) \approx L_0 \cdot (1 + \alpha_{tcc} \cdot \Delta v) = 9,2 [1 + 25,6 \cdot 10^{-6} \cdot (-47 - 20)] = 9,184 \text{ м},$$

а длина при наибольшей допустимой температуре шины (т.е. 200°C):

$$L(v_{\text{max}}) = L_0 \cdot \prod_{i=1}^k (1 + \alpha_{ti} \cdot \Delta v_i) \approx 9,2 [1 + 25,6 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 20)] \cdot [1 + 27,6 \cdot 10^{-6} \cdot (200 - 100)] = 9,244 \text{ м}.$$

Таким образом, при температурных деформациях длина шины изменяется на 60 мм, что следует учитывать при установке температурных

компенсаторов.

10.3 Проверка шин по нагреву в рабочих режимах.

По кривым (рис. 1.1, б) [4] для неокрашенных шин диаметром $D=100$ мм, толщиной стенки $t=5$ мм из сплава 1915Т определяем допустимый рабочий ток $I_{\text{доп}}$ в ОРУ равный 2160 А (при штиле $V=0$ м/с, нормативной температуре окружающего воздуха $v_{\text{в}}=40^{\circ}\text{C}$ и длительно допустимой температуре $v_{\text{доп}}=120^{\circ}\text{C}$). Таким образом, шины удовлетворяют условию (формула 1.11) [4] $I_{\text{раб.нб}}=2000 \text{ А} \leq I_{\text{доп}}=2160 \text{ А}$.

Если шины смонтированы с помощью шинодержателей обжимного типа (рис.6.1), то температура шин не должна превышать 90°C . В этом случае $I_{\text{доп}}=1450 \text{ А}$ (рис. 1.1, а) [4], т.е. шины не удовлетворяют условию формулы (1.11) [4]. Однако, если использовать шины, окрашенные желтой, зеленой или красной краской, допустимый рабочий ток увеличится до 2150 А, а белой эмалью - $I_{\text{доп}}$ возрастет еще больше (табл. 1.7) [4].

10.4 Термическая стойкость шин.

По формуле (1.33) [4] определяем интеграл Джоуля:

$$B_{\text{к}} \approx I_{\text{п0}}^2 (t_{\text{откл}} + T_{\text{а}}) = 31,5^2 \cdot (4 + 0,05) = 4019 \text{ кА}^2\text{с}.$$

Площадь сечения шины равна:

$$S = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} = 3,14 \frac{100^2 - 90^2}{4} = 1349 \text{ мм}^2.$$

Тогда удельный интеграл Джоуля составляет:

$$\frac{B_{\text{к}}}{S^2} = \frac{4019 \cdot 10^6}{1349^2} = 2208 \text{ А}^2\text{с/мм}^4.$$

Примем начальную температуру шины при КЗ равной длительно допустимой рабочей температуре, т.е. $v_{\text{н}}=v_{\text{доп}}=120^{\circ}\text{C}$. По кривой 8 (рис. 1.4) [4] находим параметр $A(v_{\text{н}})=5000 \text{ А}^2\text{с/мм}^4$.

Согласно (1.35 [4]):

$$A(v_{\text{КЗ}}) = A(v_{\text{н}}) + B_{\text{к}}/S^2 = 5000 + 2208 = 7208 \text{ А}^2\text{с/мм}^4.$$

По кривой 8 (рис.1.4) [4] определяем конечную температуру шины $v_{\text{КЗ}}=188^{\circ}\text{C}$. Таким образом, шины удовлетворяют условию (1.31) [4] и требованию п. 9 настоящего Руководящего документа.

$$v_{\text{КЗ}}=188^{\circ}\text{C} \leq v_{\text{КЗ.доп}}=200^{\circ}\text{C}.$$

Аналогичный результат получим, если воспользуемся соотношениями (1.36), (1.38) или (1.37), (1.39) [4]. Например, термически стойкое сечение согласно (1.38 [4]) и указаниям табл. 1.9 [4] составляет:

$$S_{\text{T}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C_{\text{T}}} = \frac{\sqrt{4019 \cdot 10^6}}{51} = 1243 \text{ мм}^2, \text{ что меньше сечения шины}$$

$$S=1349 \text{ мм}^2.$$

10.5 Проверка шин по допустимым прогибам от собственного веса.

Согласно (2.2) [4] допустимый статический прогиб шины без учета гололеда равен:

$$y_{\text{ст.доп1}} = \frac{l}{100} = \frac{9}{100} = 0,09 \text{ м} = 90 \text{ мм},$$

а с учетом гололедных отложений:

$$y_{\text{ст.доп2}} = \frac{l}{80} = \frac{9}{80} = 0,1125 \text{ м} = 112,5 \text{ мм}.$$

По формуле (2.4) [4] вычисляем момент инерции шины:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{3,14(0,1^4 - 0,09^4)}{64} = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

В соответствии с указаниями табл. (2.2) [4] модуль упругости материала шины $E=70 \text{ ГПа}=70 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, плотность $\delta=2770 \text{ кг/м}^3$. По (2.6) [4] находим массу шины на единицу длины

$$m_{\text{ш}} = \delta \cdot S = 2770 \cdot 1349 \cdot 10^{-6} = 3,73 \text{ кг/м}.$$

Согласно рекомендациям (п. 2.1.2) [4] ошиновка отвечает расчетной схеме балки с шарнирным опиранием, поэтому жесткость шины в соответствии с формулами, указанными в табл. (2.1) [4], равна

$$c_{\text{ш}} = \frac{384EJ}{5l^3} = \frac{384 \cdot 7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 9^3} = 1,136 \cdot 10^4 \text{ Н/м}.$$

Так как ответвления (спуски) выполнены в конструкции у осей опор, максимальный статический прогиб шины без учета гололедных отложений вычисляем по формуле (2.7) [4]:

$$y_{\text{ст. max 1}} = \frac{m_{\text{ш}} \cdot g \cdot l}{c_{\text{ш}}} = \frac{3,73 \cdot 9,81 \cdot 9}{1,136 \cdot 10^4} = 0,029 \text{ м} = 29 \text{ мм} \leq 90 \text{ мм}.$$

Таким образом, условие (2.1) [4] $y_{\text{ст. max 1}} \leq y_{\text{ст. доп 1}}$ выполняется.

Если учитывать гололедные отложения, то по табл. (2.5) [4] определяем нормированную толщину стенки гололеда $b_{\text{г}}=20 \text{ мм}$ для III района по гололеду. Высота расположения шин над поверхностью земли 5,2 м, поэтому коэффициент изменения толщины стенки гололеда $k_{\text{г}}=0,8$ (табл. 2.6) [4]. Так как диаметр шины больше 70 мм, коэффициент изменения толщины стенки гололеда от диаметра $k_{\text{д}}=0,6$ (табл. 2.7) [4]. Таким образом, расчетная толщина стенки гололеда составляет:

$$b_{\text{п}} = b \cdot k_{\text{г}} \cdot k_{\text{д}} = 20 \cdot 0,8 \cdot 0,6 = 9,6 \text{ мм}.$$

По формуле (2.22) [4] вычисляем массу гололедных отложений на единицу длины шины:

$$m_{\text{г}} = \pi \cdot \rho_{\text{г}} \cdot (D b_{\text{п}} + b_{\text{п}}^2) \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 900 \cdot (100 \cdot 9,6 + 9,6^2) = 2,97 \text{ кг/м},$$

а при расчете с учетом гололеда масса шина+гололед будет равна:

$$m = m_{\text{ш}} + m_{\text{г}} = 3,73 + 2,97 = 6,7 \text{ кг/м},$$

тогда максимальный статический прогиб шины получим:

$$y_{\text{ст max 2}} = \frac{m \cdot g \cdot l}{c_{\text{ш}}} = \frac{6,7 \cdot 9,81 \cdot 9}{1,136 \cdot 10^4} = 0,052 \text{ м} = 52 \text{ мм} \leq 90 \text{ мм}.$$

Таким образом, условие (формула 2.1) [4]: $y_{ст. max} 2 \leq y_{ст. доп 2}$ выполняется.

10.6 Допустимые напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы.

Временное сопротивление разрыву в материале шины и в области сварного шва согласно данным табл. (2.2) [4] составляет $\sigma_g=353$ МПа, $\sigma_{св}=318$ МПа, а допустимые напряжения $\sigma_{доп}=247$ МПа, $\sigma_{св, доп}=223$ МПа.

Центр тяжести сечения шины удален от вершины изолятора, опасное сечение которого находится у кромки нижнего фланца. Поэтому расстояние от опасного сечения изолятора до его вершины равно:

$$h = H_{из} - h_{фл} = 1100 - 100 = 1000 \text{ мм},$$

а расстояние от опасного сечения до центра тяжести шины:

$$H = H_{из} - h_{фл} + h_n + D/2 = 1100 - 100 + 1300 + 50 = 2350 \text{ мм}.$$

Допустимую нагрузку изоляторов при изгибе вычисляем по формуле 2.15 Методических указаний:

$$F_{доп} = N \cdot F_{разр} \cdot h/H = 0,6 \cdot 1250 \cdot 1000/2350 = 320 \text{ даН} = 3200 \text{ Н}.$$

С допустимыми значениями напряжения и нагрузки будут сравниваться максимальные расчетные значения:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{доп} \quad \sigma_{max, св} \leq \sigma_{доп, св}, \quad F_{max} \leq F_{доп}.$$

10.7 Усилия от собственного веса шины.

Согласно формуле (2.17) [4] равномерно распределенные нагрузки от собственного веса шины равны:

$$q_{ш} = m_{ш} \cdot g = 3,73 \cdot 9,81 = 36,6 \text{ Н/м}.$$

Момент сопротивления шины вычисляем по формуле (2.20) [4]:

$$W = \frac{2J}{D} = \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 30,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Согласно указаниям табл. (2.3) [4] в средних пролетах многопролетной балки ($n \geq 3$) с шарнирным опиранием $\beta=1$, по табл. (2.4) [4] – $\lambda=8$, а в области сварного шва ($z_{св}=2,5$ м):

$$\frac{1}{\lambda(z_{св})} = \frac{1}{2} \left| \frac{2,5}{9} - \left(\frac{2,5}{9} \right)^2 \right| = 0,1.$$

По формулам (2.18)-(2.19) [4] находим наибольшие напряжения в шине, в области сварного шва шины и максимальные нагрузки на изоляторы и сравниваем их с допустимыми значениями:

$$\sigma_{max, ш} = \frac{q \cdot l^2}{\lambda(z)W} = \frac{36,6 \cdot 9^2}{8 \cdot 30,8 \cdot 10^{-6}} = 12,03 \cdot 10^6 \text{ Па} = 12,03 \text{ МПа} < \sigma_{доп} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{св, max, ш} = \frac{q \cdot l^2}{\lambda(z_{св})W} = 0,1 \frac{36,6 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-6}} = 9,6 \text{ МПа} < \sigma_{св, доп} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{max, ш} = \beta \cdot q_{ш} \cdot l = 1 \cdot 36,6 \cdot 9 = 329 \text{ Н} < F_{доп} = 3200 \text{ Н}$$

Расчетные максимальные значения меньше допустимых, следовательно,

шина удовлетворяет условиям (2.11)-(2.13) [4].

10.8 Усилия от гололедных нагрузок.

Нагрузка от веса гололеда в соответствии с данными (п. 12.5 настоящего Руководящего документа) и формулой (2.21) [4]:

$$q_{\Gamma} = m_{\Gamma} g \gamma = 2,97 \cdot 9,81 \cdot 1,3 = 37,87 \text{ Н/м.}$$

В соответствии с (2.18)-(2.19) [4] определяем напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы, обусловленные воздействием гололедной нагрузки:

$$\sigma_{\max, \Gamma} = \frac{q \cdot l^2}{\lambda(z)W} = \frac{37,87 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 30,8 \cdot 10^{-6}} = 12,45 \cdot 10^6 = 12,45 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св}, \max, \Gamma} = \frac{q \cdot l^2}{\lambda(z_{\text{св}})W} = 0,1 \frac{37,87 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-6}} = 9,99 \text{ МПа};$$

$$F_{\max, \Gamma} = \beta \cdot q \cdot l = 1 \cdot 29,13 \cdot 9 = 262,17 \text{ Н.}$$

Таким образом, усилия в ошиновке от статических нагрузок (собственного веса шин и гололедных отложений) равны:

$$\sigma_{\max, \text{ш}, \Gamma} = \sigma_{\max, \text{ш}} + \sigma_{\max, \Gamma} = 12,03 + 12,45 = 24,48 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св}, \max, \text{ш}, \Gamma} = \sigma_{\text{св}, \max, \text{ш}} + \sigma_{\text{св}, \max, \Gamma} = 9,6 + 9,99 = 19,59 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св}, \text{доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\max, \text{ш}, \Gamma} = F_{\max, \text{ш}} + F_{\max, \Gamma} = 329 + 262,17 = 591,17 \text{ Н} < R_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н.}$$

Суммарные статические напряжения и нагрузка существенно меньше допустимых значений. Следовательно, при статических нагрузках изоляторы и шины удовлетворяют условиям (2.11)-(2.13) [4].

10.9 Ветровая стойкость ошиновки.

Предварительно (по табл. 2.11) [4] определяем нормативную скорость ветра $\bar{V} = 32$ м/с для Ш района по ветру. По табл. (2.12) [4] для местности типа В и высоты расположения ошиновки над поверхностью земли 5 м находим коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра по высоте, $k_w = 0,5$. По формуле (2.35, а) [4] вычисляем среднюю скорость ветра на уровне шины:

$$\bar{V}_h = \sqrt{0,5} \cdot 32 = 22,6 \text{ м/с.}$$

По (2.34) [4] определяем число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\bar{V}_h D}{\nu} = \frac{22,6 \cdot 0,1}{14,6 \cdot 10^{-6}} = 1,54 \cdot 10^5,$$

где ν - кинетическая вязкость воздуха, принимаемая в расчетах равной $14,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

По рис. 2.9 [4] находим коэффициент лобового сопротивления шины $c_x = 1,2$.

По формуле (2.32) [4] вычисляем значение средней (статической) ветровой нагрузки:

$$\bar{q}_e = 0,5 \cdot \rho_e \cdot c_x \cdot D_{\text{эк}} \cdot \bar{V}_h^2 = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 1,2 \cdot 0,1 \cdot 22,6^2 = 37,7 \text{ Н/м.}$$

По формулам (2.18)-(2.19) [4] находим напряжения в шинах и нагрузки на изоляторы, обусловленные статической (средней) ветровой нагрузкой:

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{q}_B \cdot l^2}{\lambda W} = \frac{37,7 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 30,8 \cdot 10^{-6}} = 12,4 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}_{\text{св}} = \frac{\bar{q}_B \cdot l^2}{\lambda(z_{\text{св}})W} = 0,1 \frac{37,7 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-6}} = 9,9 \text{ МПа};$$

$$\bar{F} = \beta \cdot \bar{q}_B \cdot l = 1 \cdot 37,7 \cdot 9 = 339,3 \text{ Н.}$$

Жесткость вертикальной надстройки согласно (2.27) [4], равна:

$$c = \frac{3EJ}{h^3} = \frac{3 \cdot 7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{1,3^3} = 147 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Жесткость изолятора ИОС-110-1250УХЛ1 в соответствии с указаниями табл. (2.9) [4] принимаем равной $c_2 = c_{\text{из}} = 1250 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$. Далее определяем параметры:

$$\gamma_1 = \frac{c \cdot h_n}{c_{\text{из}} \cdot H_{\text{из}}} = \frac{147 \cdot 1,3}{1250 \cdot 1,1} = 0,194 \quad \text{и} \quad z = \frac{h_n}{h_n + H_{\text{из}}} = \frac{1,3}{1,3 + 1,1} = 0,54.$$

По формуле (2.26) [4] вычисляем жесткость опоры, состоящей из вертикальной надставки и опорного изолятора (податливостью основания пренебрегаем):

$$c_{\text{оп}} = \frac{c h_n^3}{(H_{\text{из}} + h_n)^3 [\gamma_1 + (1 - \gamma_1)z^3]} = \frac{147 \cdot 10^3 \cdot 1,3^3}{(1,1 + 1,3)^3 [0,194 + (1 - 0,194)0,54^3]} = 72790 \text{ Н/м.}$$

Масса опоры M складывается из массы надставки:

$$M_n = m h_n = 3,73 \cdot 1,3 = 4,85 \text{ кг и изолятора } M_{\text{из}} = 70 \text{ кг,}$$

$$M = M_n + M_{\text{из}} = 4,85 + 70 = 74,85 \text{ кг.}$$

Расстояние от основания опоры до центров тяжести надставки, изолятора и шины соответственно равны:

$$H_1 = h_n / 2 + H_{\text{из}} = \frac{1,3}{2} + 1,1 = 1,75 \text{ м};$$

$$H_2 = H_{\text{из}} / 2 = 1,1 / 2 = 0,55 \text{ м};$$

$$H_{\text{ц.т.ш}} = H_{\text{из}} + h_n + \frac{D}{2} = 1,1 + 1,3 + 0,05 = 2,45 \text{ м.}$$

Расстояние от основания до центра тяжести опоры определяем по формуле (2.31) [4]:

$$H_{\text{ц.т.оп}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i H_i}{M} = \frac{M_n \cdot H_1 + M_{\text{из}} \cdot H_2}{M} = \frac{4,85 \cdot 1,75 + 70 \cdot 0,55}{74,85} = 0,63 \text{ м.}$$

По формуле (2.30) [4] вычисляем приведенную массу опоры:

$$M_{\text{оп}} \approx M \left(\frac{H_{\text{ц.т.оп}}}{H_{\text{ц.т.ш}}} \right)^2 \approx 74,85 \left(\frac{0,63}{2,45} \right)^2 = 4,94 \text{ кг.}$$

Находим относительную жесткость и массу опоры:

$$c_{\text{оп}} l^3 / EJ = \frac{72790 \cdot 9^3}{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}} = 492;$$

$$M_{\text{оп}} / ml = \frac{4,94}{3,73 \cdot 9} = 0,147.$$

По кривым (рис.2.8, в) [4] определяем параметр частоты $r_1=2,9$, а в формуле (2.25) [4] - основную частоту собственных колебаний ошиновки в горизонтальной плоскости XOZ (рис.2.2) [4]:

$$f_{1x} = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}} = \frac{2,9^2}{2\pi \cdot 9^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{3,73}} = 2,8 \text{ Гц.}$$

В соответствии с указаниями табл. (2.10) [4] примем декремент затухания при колебании в горизонтальной плоскости $\delta_x=0,3$, а в вертикальной $\delta_y=0,14$. Так частота собственных колебаний $f < 5$ Гц, то согласно (2.5.2) [4] находим параметр динамичности по кривым рис. (2.10) [4] $\xi_B=0,32$, а динамический коэффициент при ветровых нагрузках равный:

$$\eta_B = 1 + \xi_B \bar{V}^{1/3}.$$

Расчетные напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы (без учета воздействия ветра на вертикальные опоры) вычисляются по (2.36) [4] с учетом (2.37) [4]

$$\sigma_{\max, B} = \bar{\sigma} \cdot \left(1 + \xi \cdot \bar{V}^{-1/3}\right) = 12,4(1 + 0,32 \cdot 22,6^{1/3}) = 23,6 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св}, \max, B} = \bar{\sigma}_{\text{св}} \cdot \left(1 + \xi \cdot \bar{V}^{-1/3}\right) = 9,9 \cdot 1,9 = 18,8 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св}, \text{доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\max, B} = \bar{F} \cdot \left(1 + \xi \cdot \bar{V}^{-1/3}\right) = 339,3 \cdot 1,9 = 644,6 \text{ Н.}$$

Примем характерный размер опоры равным среднему арифметическому наибольшего и наименьшего диаметров фарфорового тела изолятора, т.е. $d_{\text{из}} \approx (230+170)/2 = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м}$.

$$\text{Число Рейнольдса для изоляторов } Re_{\text{из}} = \frac{\bar{V}_h d_{\text{из}}}{\nu} = \frac{22,6 \cdot 0,2}{14,6 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^5.$$

По кривым рис. (2.4) [4] находим $c_{x, \text{из}} = 0,75$.

Тогда с некоторым запасом распределенная по длине опоры статическая ветровая нагрузка, согласно (2.40) [4] равна:

$$\bar{q}_{\text{в}, \text{из}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} c_{x, \text{из}} d_{\text{из}}^2 \bar{V}_h^2 = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 0,75 \cdot 0,2 \cdot 22,6^2 = 47,1 \text{ Н/м.}$$

По (2.39) [4] вычисляем поправку статической нагрузки на изоляционную опору:

$$\Delta \bar{F} = \bar{q}_{\text{в}, \text{из}} H_{\text{ц.т.ш}} / 2 = 47,1 \cdot 2,45 / 2 = 57,7 \text{ Н.}$$

Результирующие силы, действующие на изоляционные опоры, согласно (2.38) [4] равны:

$$F_{\max, B} = \left(\bar{F} + \Delta \bar{F}\right) \eta_B = (339,3 + 57,7) \cdot 1,9 = 754,3 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н.}$$

Таким образом, наибольшие напряжения в материале шины (в том числе в зоне сварного шва) и нагрузки на изоляторы меньше допустимых значений, согласно условию (2.12) [4].

10.10 Ветровые усилия при гололеде.

Согласно указанию 1 (п. 2.2.1) [4] в качестве расчетной принимаем нормативную толщину стенки гололеда при нормативной скорости ветра.

Диаметр шины с учетом толщины стенки гололеда:

$$D_r = D + 2 \cdot b_r = 0,1 + 2 \cdot 0,0096 = 0,1192 \text{ м.}$$

Изменение относительной массы опоры при гололеде в рассматриваемой конструкции практически не влияет на параметр частоты $r_1 \approx 2,9$. Поэтому частота собственных колебаний ошиновки в горизонтальной плоскости согласно (2.25) [4] равна:

$$f_{1x(2)} = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}} = \frac{2,9^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 9^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{6,7}} = 2,09 \text{ Гц.}$$

Так же для конструкций без гололеда примем декремент затухания $\delta_x = 0,5$. Тогда параметр $\xi_b = 0,34$ (рис 2.10) [4], динамический коэффициент равен:

$$\eta_{b1} = 1 + \xi_b \bar{V}^{1/3} = 1 + 0,34 \cdot 22,6^{1/3} = 1,96.$$

Число Рейнольдса (2.34) [4] для шин и изоляторов соответственно равно:

$$Re = \frac{\bar{V}_h D_r}{\nu} = \frac{22,6 \cdot 0,1192}{14,6 \cdot 10^{-6}} = 1,84 \cdot 10^5 ;$$

$$Re_{из} = \frac{\bar{V}_h d_{из}}{\nu} = \frac{22,6 \cdot 0,2}{14,6 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^5 ,$$

а коэффициенты лобового сопротивления (рис. 2.4) [4] составляют $C_x = 1,2$ и $C_{x,из} = 1,0$.

Статические ветровые нагрузки согласно (2.32) и (2.40) [4] составляют:

$$\bar{q}_{b2} = \frac{1}{2} \rho_b c_x D_r \bar{V}_{h2}^2 = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 1,2 \cdot 0,1192 \cdot 22,6^2 = 44,9 \text{ Н/м;}$$

$$\bar{q}_{b,из2} = \frac{1}{2} \rho_b c_{x,из} d_{из} \bar{V}_h^2 = 0,5 \cdot 1,23 \cdot 1,0 \cdot 0,2 \cdot 22,6^2 = 62,8 \text{ Н/м.}$$

Наибольшие напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы согласно (2.18), (2.19), (2.36) - (2.40) [4], равны:

$$\sigma_{\max, в 2} = \frac{\bar{q}_{b2} \cdot l^2}{\lambda W} \cdot \eta_{b1} = \frac{44,9 \cdot 9^2}{8 \cdot 30,8} \cdot 1,96 = 14,7 \cdot 1,96 = 28,9 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{св, макс, в 2}} = \frac{q_{b,из2} \cdot l^2}{\lambda(z_{\text{св}}) W} \eta_{b1} = 0,1 \frac{44,9 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,96 = 23,1 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св, доп}} = 223 \text{ МПа;}$$

$$F_{\max, в 2} = \left(\bar{q}_{b2} l + 0,5 \bar{q}_{b,из2} \right) \eta_{b1} = (44,9 \cdot 9 + 0,5 \cdot 62,8 \cdot 2,4) \cdot 1,96 = (404,1 + 75,4) \cdot 1,96 = 939,7 \text{ Н} <$$

$$F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н.}$$

Расчетные максимальные значения напряжений и нагрузок меньше допустимых, следовательно, изоляторы и шина удовлетворяют условиям (2.11)-(2.13) [4].

10.11 Проверка ошиновки на ветровой резонанс.

При колебаниях в вертикальной плоскости шин опоры согласно указаниям (п. 2.5.1) [4] принимаем абсолютно жесткими. Тогда для шин с шарнирным опиранием параметр частоты $r_1=3,14$, а коэффициент $B=76,8$ (табл. 2.4) [4]. Частоту собственных колебаний вычисляют по формуле (2.25) [4]:

$$f_{1x(2)} = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}} = \frac{3,14^2}{2\pi \cdot 9^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,54 \cdot 10^{-6}}{3,73}} = 3,29 \text{ Гц.}$$

Струхалевская скорость ветра, равна:

$$V_s = \frac{D \cdot f_1}{Sh} = \frac{0,1 \cdot 3,29}{0,2} = 1,65 \text{ м/с.}$$

Устойчивые ветровые резонансы можно ожидать в диапазоне скоростей ветра $0,7 \cdot 1,65 = 1,16 \leq V \leq 0,3 \cdot 1,65 = 0,5 \text{ м/с.}$

При средней зимней температуре $t_{в,ср,зим} = -15^{\circ}\text{C}$ плотность воздуха $\rho_v = 1,369 \text{ кг/м}^3$. Расчетный прогиб при ветровых резонансах согласно (2.44) [4], равен:

$$y_{p,\max} = \frac{c_{y0} \cdot \rho_v \cdot D^3 \cdot r_1^4 \cdot k_2^2}{m \cdot B \cdot \delta_y} = \frac{0,8 \cdot 1,369 \cdot 0,1^3 \cdot 3,14^4 \cdot 1,1}{3,73 \cdot 76,8 \cdot 0,1} = 0,0029 \text{ м.}$$

Относительный прогиб:

$$y_{*p,\max} = \frac{y_{p,\max}}{D} = \frac{0,0029}{0,1} = 0,029 \leq y_{*p,\text{доп}} = 0,04.$$

Таким образом, условие (2.43) [4] обеспечивает необходимую отстройку от устойчивых резонансных колебаний.

10.12 Электродинамическая стойкость шинной конструкции.

По формуле (3.3) [4] определяем максимальное значение ЭДН:

$$q_{\max,\varepsilon} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{1,4} (80 \cdot 10^3)^2 = 791 \text{ Н/м.}$$

По кривым рис. (3.1) [4] для частоты собственных колебаний (в горизонтальной плоскости) $f_{1x} = 2,8 \text{ Гц}$ и постоянная времени $T_a = 0,05 \text{ с}$ определяем динамический коэффициент $\eta = 0,3$.

Вычисляем наибольшие напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы по (3.12)-(3.14) [4]:

$$\sigma_{\max,\varepsilon} = \frac{q_{\max,\varepsilon} \cdot l^2}{\lambda \cdot W} \eta = \frac{791 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 30,8 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,3 = 78 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св},\max,\varepsilon} = 0,1 \frac{q_{\max,\varepsilon} \cdot l^2}{W} \eta = 0,1 \frac{791 \cdot 9^2 \cdot 10^{-6}}{30,8 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,3 = 62,4 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св},\text{доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\max,\varepsilon} = \beta \cdot q_{\max,\varepsilon} \cdot l \cdot \eta = 1 \cdot 791 \cdot 9 \cdot 0,3 = 2135 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н.}$$

Гололедные отложения приводят к увеличению погонной массы шины и снижению частоты собственных колебаний до $2,09 \text{ Гц}$ (п. 10.10 настоящего

Руководящего документа). Однако это практически не сказывается на значениях динамического коэффициента $\eta \approx 0,3$. Таким образом, гололед не влияет на усилия в ошиновке, обусловленные ЭДН.

10.13 Электродинамическая стойкость при повторных включениях на КЗ (неуспешных АПВ)

Заданная продолжительность бестоковой паузы $t_{БП}=0,3$ с оказывается меньше отношения:

$$\frac{2,3}{f_{1x} \cdot \delta_x} = \frac{2,3}{28 \cdot 0,5} = 1,64,$$

т.е. условие $t_{БП} \geq \frac{2,3}{f_1 \cdot \delta_x}$ (3.15) [4] не выполняется. Поэтому при повторных включениях на КЗ напряжения в шинах и нагрузки на изоляторах могут быть выше, чем при первом КЗ.

По монограмме (рис. 3.2, б) [4] определяем, что точка с координатами $t_{БП} = 0,3$ и $f_1 = f_{1x} = 2,8$ лежит во второй зоне, ограниченной кривыми 1 и 2. Поэтому коэффициент превышения θ , равный 1,4, находим по кривой II (рис. 3.2, а) [4] при декременте затухания $\delta_x = 0,5$.

По формулам (3.16), (3.17) [4] вычисляем напряжения и нагрузки

$$\sigma_{\max, АПВ} = \frac{q_{\max, \vartheta} \cdot l^2}{\lambda \cdot W} \eta \cdot \theta = 78 \cdot 1,4 = 109,2 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св, макс, АПВ}} = 0,1 \frac{q_{\max, \vartheta} \cdot l^2}{W} \eta \cdot \theta = 62 \cdot 1,4 = 86,8 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св, доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\max, АПВ} = \beta \cdot q_{\max, \vartheta} \cdot l \cdot \eta \cdot \theta = 2135 \cdot 1,4 = 2989 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

Прочность ошиновки при сочетании внешних нагрузок.

В соответствии с указаниями п. 2.2.1[4] рассмотрим четыре основных сочетаний нагрузок:

1) Сила тяжести ошиновки, вес гололеда при нормативной толщине его отложений и нормативная ветровая нагрузка при нормативной толщине гололеда.

В соответствии с уравнениями (2.8) [4] напряжения в шинах и нагрузка на изоляторы составляет:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{(\sigma_{\max, ш} + \sigma_{\max, г})^2 + \sigma_{\max, в 2}^2} = \sqrt{24,48^2 + 28,9^2} = 37,74 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св, макс}} = \sqrt{(\sigma_{\text{св, макс, ш}} + \sigma_{\text{св, макс, г}})^2 + \sigma_{\text{св, макс, в 2}}^2} = \sqrt{19,59^2 + 23,1^2} = 30,28 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св, доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\max} = \sqrt{(F_{\max, ш} + F_{\max, г})^2 + F_{\max, в 2}^2} = \sqrt{591^2 + 939,7^2} = 1110,1 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

2) Сила тяжести 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):

$$\sigma_{\max} = \sqrt{(\sigma_{\max, в} + 0,65 \cdot \sigma_{\max, \vartheta})^2 + \sigma_{\max, ш}^2} = \sqrt{(23,6 + 0,65 \cdot 78)^2 + 12,03^2} = 75,2 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св,мак}} = \sqrt{(\sigma_{\text{св,мак,в}} + 0,65 \cdot \sigma_{\text{св,мак,э}})^2 + \sigma_{\text{св,мак,ш}}^2} = \sqrt{(18,8 + 0,65 \cdot 62)^2 + 9,6^2} = 59,8 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св,доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\text{мак}} = \sqrt{(F_{\text{мак,в}} + 0,65 \cdot F_{\text{мак,э}})^2 + F_{\text{мак,ш}}^2} = \sqrt{(644,6 + 0,65 \cdot 2135)^2 + 329^2} = 2058,8 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

3) Сила тяжести ошиновки, максимальная электродинамическая нагрузка (без учета АПВ) и ветровая нагрузка, равная 60% нормативного значения:

$$\sigma_{\text{мак}} = \sqrt{(0,6\sigma_{\text{мак,в}} + \sigma_{\text{мак,э}})^2 + \sigma_{\text{мак,ш}}^2} = \sqrt{(0,6 \cdot 23,6 + 78)^2 + 12,03^2} = 92,9 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св,мак}} = \sqrt{(0,6\sigma_{\text{св,мак,в}} + \sigma_{\text{св,мак,э}})^2 + \sigma_{\text{св,мак,ш}}^2} = \sqrt{(0,6 \cdot 18,8 + 62)^2 + 9,6^2} = 73,9 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св,доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\text{мак}} = \sqrt{(0,6F_{\text{мак,в}} + F_{\text{мак,э}})^2 + F_{\text{мак,ш}}^2} = \sqrt{(0,6 \cdot 644,6 + 2135)^2 + 329^2} = 2543,1 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

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

$$\sigma_{\text{мак}} = \sqrt{\sigma_{\text{мак,АПВ}}^2 + \sigma_{\text{мак,ш}}^2} = \sqrt{109,2^2 + 12,03^2} = 109,9 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св,мак}} = \sqrt{\sigma_{\text{св,мак,АПВ}}^2 + \sigma_{\text{св,мак,ш}}^2} = \sqrt{86,8^2 + 9,6^2} = 87,3 \text{ МПа} < \sigma_{\text{св,доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\text{мак}} = \sqrt{F_{\text{мак,АПВ}}^2 + F_{\text{мак,ш}}^2} = \sqrt{2989^2 + 329^2} = 3007 \text{ Н} < F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

Таким образом, нагрузки от собственного веса шины и гололедных отложений оказывают весьма незначительное влияние на результирующие усилия. Наибольшие напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы в рассматриваемой конструкции действуют при четвертом расчетном сочетании внешних нагрузок. Ошиновка отвечает условиям стойкости (2.11)-(2.13) [4], так как для всех расчетных режимов:

$$\sigma_{\text{мак}} \leq \sigma_{\text{доп}} = 247 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\text{св,мак}} \leq \sigma_{\text{св,доп}} = 223 \text{ МПа};$$

$$F_{\text{мак}} \leq F_{\text{доп}} = 3200 \text{ Н}.$$

12.14 Проверка ошиновки по допустимым изоляционным расстояниям и короне.

Жесткость шинной конструкции (без учета податливости основания):

$$c = \frac{c_{\text{ш}} \cdot c_{\text{он}}}{c_{\text{ш}} + c_{\text{он}}} = \frac{1,136 \cdot 10^4 \cdot 7,279 \cdot 10^4}{(1,136 + 7,279) \cdot 10^4} = 9,83 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Наибольший прогиб шины при воздействии ветровой нагрузки равной 60% максимальной:

$$y_{\max, \text{в}} = \frac{0,6q_{\text{в}2}l}{c} \eta_{\text{в1}} = \frac{0,6 \cdot 44,9 \cdot 9 \cdot 10^3}{9,83 \cdot 10^3} \cdot 1,96 = 48,3 \text{ мм.}$$

Расчетные наименьшие расстояния в свету между шинами при воздействии ветра равно:

$$a_{\text{ф-ф1}} = (a - D) - 2y_{\max, \text{в}} = 1400 - 100 - 2 \cdot 48 = 1204 \text{ мм.}$$

Наименьшее допустимое расстояние между токоведущими частями разных фаз составляет 1000 мм (табл. 4.2.5) [1].

Таким образом, $a_{\text{ф-ф1}} < A_{\text{ф-ф}}$ и отвечает требованиям по наименьшим расстояниям в свету в рабочих режимах.

Наибольший прогиб шины при КЗ и после его отключения определяем по формуле (3.14) [4]:

$$y_{\max, \text{КЗ}} = \frac{q_{\max, \text{э}}l}{c} \eta = \frac{791 \cdot 9 \cdot 10^3}{9,83 \cdot 10^3} \cdot 0,3 = 217 \text{ мм.}$$

Минимальное расстояние между шинами при КЗ согласно (1.5) [4] составляет:

$$a_{\text{ф-ф2}} = (a - D) - 2y_{\max, \text{КЗ}} = 1400 - 100 - 2 \cdot 217 = 866 \text{ мм.}$$

В соответствии с табл. (4.5.18) [1] допустимое расстояние между фазами при рабочем напряжении сети 110 кВ равно $A_{\text{ф-ф2}} = 450$ мм.

Таким образом, ошиновка после отключения КЗ отвечает условию (1.2) [4]:

$$a_{\text{ф-ф2}} \geq A_{\text{ф-ф2}} .$$

В соответствии с указаниями (п. 1.1.3) [4] проверка шин РУ 110 кВ по условиям короны не требуется, т.к. диаметр шин значительно превышает допустимое значение 9 мм.

Таким образом, ошиновка КРУБ 110 кВ отвечает всем требуемым условиям в рабочих и аварийных режимах.

Список литературы

- 1 Правила устройства электроустановок, 7-е изд. М., Энергосервис, 2003.
- 2 Правила устройства электроустановок, 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 1986.
- 3 СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика, Госстрой СССР, ЦНТП Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1983.
- 4 Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ 110-500 кВ, М., 2005.
- 5 ГОСТ Р50254 - 92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания, М., Изд-во стандартов, 1993.
- 6 ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний, М., Изд-во стандартов, 1990.