

Е.Н. Зотов, Н.В. Логвинова, И.А. Баннов,

Я.А. Воронин, Н.А. Коренев

ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ»

г. Москва, Россия

ВЫБОР ИЗОЛЯТОРОВ И ШИН ПРИ СОЧЕТАНИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК, ВЫЗВАННЫХ ГОЛОЛЕДОМ, ВЕТРОМ И ТОКАМИ КЗ НА ПОДСТАНЦИИ 330/110/10 КВ

Аннотация

В статье рассмотрено проектирование подстанции 330/110/10 кВ и выполнен расчёт прочности жёсткой ошиновки распределительного устройства 330 кВ. Проведён выбор ошиновки и изоляционных опор, выполнены проверки на воздействие статических, ветровых и электродинамических нагрузок. По результатам расчётов определён рациональный вариант конструкции, обеспечивающий снижение материалоемкости при сохранении требований надёжности.

Annotation

The article presents the design of a 330/110/10 kV substation and the mechanical strength analysis of rigid busbar systems for a 330 kV switchyard. Busbar and insulator selection was carried out, and verification under static, wind and electrodynamic loads was performed. The results allowed determining a rational design solution with reduced material consumption while maintaining reliability requirements.

Ключевые слова: жёсткая ошиновка, распределительное устройство, подстанция 330 кВ, прочность шин, электродинамическая стойкость.

Keywords: rigid busbar, switchyard, 330 kV substation, busbar strength, electrodynamic stability.

При проектировании распределительных устройств широко применяется жёсткая ошиновка благодаря снижению занимаемой площади, удобству монтажа и эксплуатации, а также сокращению затрат на строительство. Использование

жестких проводников позволяет уменьшить потребность в дополнительных порталных конструкциях, снизить расход металла и объем строительных работ.

Вместе с тем статистика показывает, что значительная часть повреждений распределительных устройств связана со сборными шинами, что требует совершенствования методик их выбора с учетом совместного воздействия гололедных, ветровых и электродинамических нагрузок.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и оптимизации конструктивных решений при снижении стоимости строительства и занимаемой площади подстанций.

Работа выполнена на примере проектируемой подстанции 330/110/10 кВ в Московской области.

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПС 330/110/10 кВ

1.1 Исходные данные проектируемой подстанции

Подстанция 330/110/10:

ВН – $U_{\text{ном}} = 330$ кВ, $X_{c1} = 1,3$ о.е., $S_{\text{ном}} = 3500$ МВА, $X_{c2} = 1,2$ о.е., $S_{\text{ном}} = 3000$ МВА, $l_1 = 120$ км, $l_2 = 60$ км

СН – $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, $\cos\varphi = 0,86$, $P_{\text{max}} = 120$ МВт, $l_1 = 95$ км, $l_2 = 60$ км

НН – $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, $\cos\varphi = 0,86$, $P_{\text{max}} = 70$ МВт, $t_{\text{pz}} = 0,9$ с

Собственные нужды – $U_{\text{ном}} = 380/220$ В, $\cos\varphi = 0,86$, $P_{\text{max}} = 400$ кВт

На рисунке 1 приведена принципиальная схема проектируемой подстанции

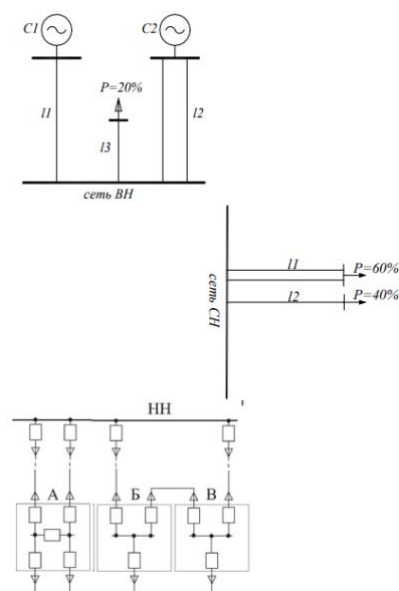


Рисунок 1 – Принципиальная схема проектируемой подстанции.

1.2 Выбор силовых трансформаторов

На рисунке 2 приведен график нагрузки высшего напряжения.

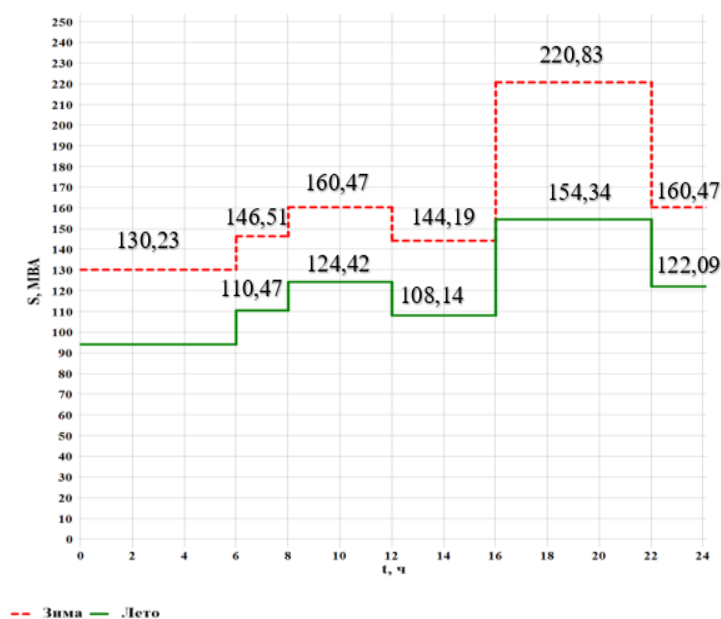


Рисунок 2 – График нагрузки высшего напряжения

В результате расчетов АТДЦТН-200000/330/110 отвечает требованиям по перегрузкам, дополнительные проверки не требуются.

1.3 Расчёт токов короткого замыкания

С помощью ручного расчёта, а также программного комплекса NEPLAN производится расчёт токов короткого замыкания на основных напряжениях ПС, расчетная схема представлена на рисунке 3. Учитывается присутствие реактора,

положение секционного выключателя и характеристики линий, трансформаторов, источников.

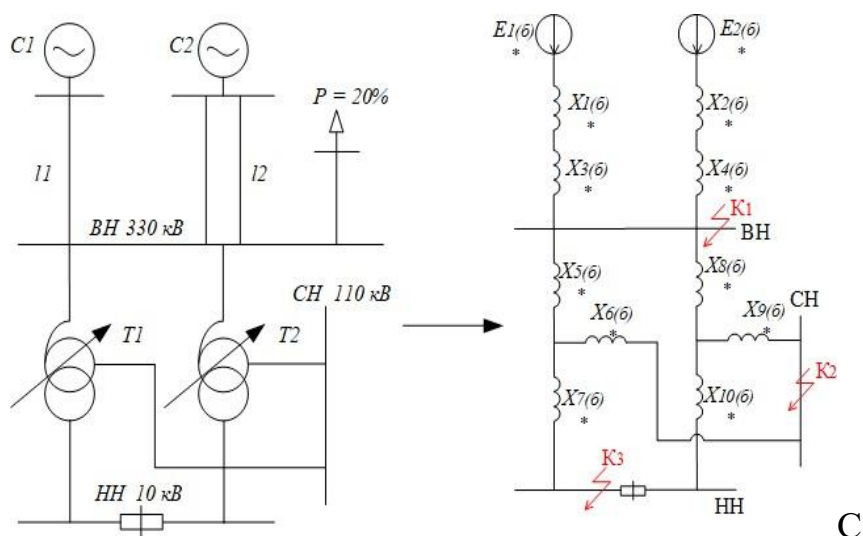


Рисунок 3 – Расчётная схема замещения ПС

С помощью программного комплекса NEPLAN воспроизводится расчётная схема и характеристики элементов.

В программном комплексе корректно не реализованы сдвоенные токоограничивающие реакторы для подсчёта с учётом их сопротивления используются трехобмоточные трансформаторы с коэффициентом трансформации равным единице (Рисунок 5). Сопротивление ниже выбранного реактора учтено через параметры трансформаторов (Рисунок 6). Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

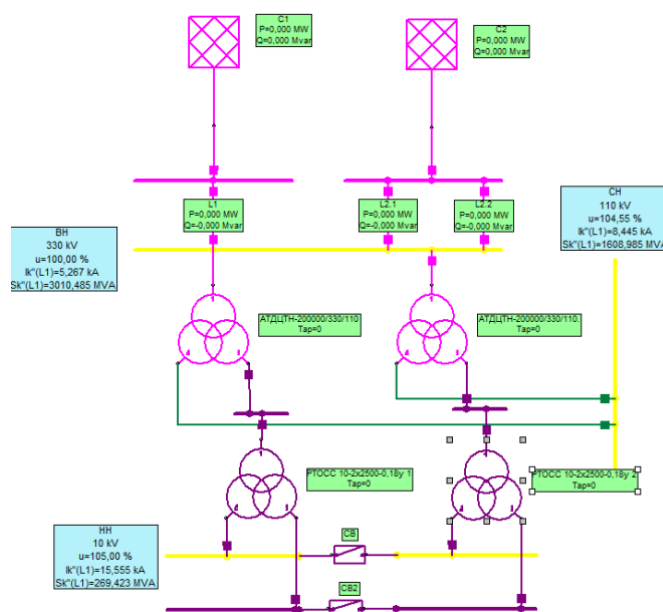


Рисунок 5 – Схема замещения с учётом реакторов (СВ разомкнут)

Name: PTOCC 10-2x2500-0.18y 2

Type:

Vector group: Yy0d5

Un1 .. kV:	10	Un2 .. kV:	10	Un3 .. kV:	10
Ur1 .. kV:	10	Ur2 .. kV:	10	Ur3 .. kV:	10
Sr12 .. MVA:	43,3	Sr23 .. MVA:	43,3	Sr31 .. MVA:	43,3
URr(1) 12 .. %:	0,14	URr(1) 23 .. %:	0,28	URr(1) 31 .. %:	0,14
Ukr(1) 12 .. %:	7,79	Ukr(1) 23 .. %:	23,38	Ukr(1) 31 .. %:	7,79
Ukr(0) 12 .. %:	7,79	Ukr(0) 23 .. %:	23,38	Ukr(0) 31 .. %:	7,79

Рисунок 6 – Параметры трансформаторов, представляющих реакторы в схеме
Таблица 1 – Результаты расчёта токов короткого замыкания для ВН

Точка КЗ	I_{poi} , кА	T_{ai} , с	i_{ydi} , кА	$I_{poinplan}$, кА	Погрешность, %
РУ ВН (К1)	4,942	0,0365	12,301	5,267	6,171

Расчёт в NEPLAN не превышает допустимой погрешности и подтверждают корректность ручных вычислений

2. РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ И ШИН ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

2.1 Выбор ошиновки для ОРУ 330 кВ

Высота расположения шин определяется требованиями к жёсткой ошиновке и выбирается с учётом обеспечения проезда ремонтной техники, допустимого уровня напряжённости электрического поля, параметров оборудования, схемы электрических соединений и необходимости снижения общей высоты ОРУ. Монтаж шин допускается на опорных изоляторах, электрических аппаратах или специальных надставках. Для проекта принята ошиновка типа ШНК–4–330/3150 УХЛ1.

2.2 Проверка ошиновки на условие статического прогиба

Согласно [4], для жёсткой ошиновки приняты следующие характеристики: номинальное напряжение – 330 кВ (наибольшее рабочее – 363 кВ), номинальный ток – 3150 А, ток термической стойкости – 63 кА, электродинамической стойкости – 160 кА, время термической стойкости – 3 с.

Исходные данные расчёта: длина пролёта – 18 м, расстояние между фазами – 3,5 м, климатическое исполнение – УХЛ, категория размещения – 1 (открытый воздух), материал шин – сплав 1915Т, район по гололёду – II, диапазон рабочих температур от –60 до +40 °С.

В данной работе будут проведены расчёты на прочность и прогиб по схеме: балка с шарнирным опиранием на обеих опорах, т.к. именно такая схема характерна для ОРУ 110 кВ и выше: По [2], а также исходя из самых популярных размеров проводников используемых для РУ 330 кВ рассматриваются следующие диаметры труб:

Таблица 2 – Диаметры исследуемой ошиновки

1	Сборные шины	Типоразмер трубы, мм	$\varnothing 240 \times 10$	Внешний диаметр D=240 мм
				Внутренний диаметр d=220 мм
				Толщина b=10 мм
2	Сборные шины	Типоразмер трубы, мм	$\varnothing 240 \times 8$	Внешний диаметр D=240 мм
				Внутренний диаметр d=224 мм
				Толщина b=8 мм
3	Сборные шины	Типоразмер трубы, мм	$\varnothing 220 \times 10$	Внешний диаметр D=220 мм
				Внутренний диаметр d=200 мм
				Толщина b=10 мм

Расчёт прочности и прогиба выполнен для схемы балки с шарнирным опиранием на обеих опорах, характерной для ОРУ 110 кВ и выше.

В качестве исследуемых вариантов приняты наиболее распространённые типоразмеры трубчатой ошиновки РУ 330 кВ: $\varnothing 240 \times 10$, $\varnothing 240 \times 8$ и $\varnothing 220 \times 10$ мм [2].

Для шины $\varnothing 240 \times 10$ выполнен расчёт статического прогиба под действием собственного веса и с учётом гололёдной нагрузки. Получены значения прогиба: 80,1 мм без учёта гололёда при допустимом значении 180 мм и 106,7 мм с учётом гололёда при допустимом значении 225 мм. Расчёт выполнен с использованием характеристик материала ($E = 70$ ГПа, плотность 2770 кг/м³) и поправочных коэффициентов, учитывающих высоту установки и диаметр шины.

Аналогичные расчёты выполнены для остальных вариантов ошиновки. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты проверки на статический прогиб шины

Диаметры D, мм	Статистический прогиб шины без учёта гололёда, $U_{ст.мах1}$, мм	Допустимый статистический прогиб, $U_{ст.доп1}$, мм	Статистический прогиб шины с учётом гололёда, $U_{ст.мах2}$, мм	Допустимый статистический прогиб, $U_{ст.доп2}$, мм
240x10	80,1	180	106,7	225
240x8	78,8		111,3	
220x10	96		128	

Полученные результаты показывают, что все исследуемые варианты ошиновки удовлетворяют требованиям по статическому прогибу и могут применяться в распределительном устройстве.

2.3 Выбор изоляционных опор и их характеристики

Поскольку полимерные изоляторы на напряжение 330 кВ серийно не выпускаются, для проекта принята составная изоляционная колонка из трёх фарфоровых изоляторов ИОС-110-600 М УХЛ1 согласно каталогу [3].

Основные характеристики колонки: высота – 3330 мм, номинальное напряжение – 330 кВ, наибольшее рабочее напряжение – 363 кВ, 50%-ное разрядное напряжение – 400 кВ, импульсное напряжение – 1440 кВ, длина пути утечки – 6690 мм, минимальная разрушающая сила при изгибе – 6 кН, масса – 219 кг.

Проверка выбора выполнена в соответствии с требованиями [8]. Для длины пути утечки получено условие: $L_{ут} \geq \lambda_3 \cdot U \cdot k$, которое выполняется ($669 \text{ см} > 594 \text{ см}$).

Дополнительно выполнена проверка разрядных характеристик для II степени загрязнения. Для электроустановок 330 кВ нормативное значение 50%-ного разрядного напряжения составляет не менее 315 кВ. Для выбранной колонки $U_{50\%} = 400 \text{ кВ}$, следовательно, условие также выполняется.

Прочность изоляционной опоры оценивалась по допустимой горизонтальной нагрузке, принимаемой равной 60% минимальной разрушающей силы с учётом высоты приложения нагрузки. Были получены усилие для нижнего яруса изолятора и вертикальная нагрузка от собственного веса шин и гололёда: $F_{доп} = 1,2 \text{ кН}$, $F_y = 3,06 \text{ кН}$.

Для трёхъярусной конструкции при жёсткости одиночного изолятора 1100 кН/м расчётная жёсткость опоры составила 40,7 кН/м.

Вывод: выбранная колонка изоляторов удовлетворяет требованиям ПУЭ-7 и может быть применена в проекте.

2.4 Расчет на ветровую стойкость

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

$$f_{1x(y)} = \frac{r_{1x(y)}^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}} = \frac{3,14^2}{2 \cdot 3,141 \cdot 18^2} \cdot \sqrt{\frac{70 \cdot 10^9 \cdot 4,79 \cdot 10^{-5}}{26,67}} = 1,717 \text{ Гц}$$

где l – длина пролета шины, м;

m – масса шины на единицу длины равная массе шины, кг/м;

E – модуль упругости материала шины, Па

J – модуль инерции шины, м⁴

$r_{1x(y)}^2$ – параметр первой частоты собственных колебаний шины в соответствующей плоскости. Для рассматриваемой расчётной схемы $r_{1x(y)}^2 = 3,14$.

По таблице 2.11 [9] нормативное ветровое давление $w_0 = 500$ Па, а нормативная скорость ветра $V_0 = 29$ м/с. Поправочный коэффициент на высоту и тип местности согласно таблице 2.12 [9] $K_w = 0,81$

Средняя скорость ветра, а также ветровое давление на высоте $h = 18$ м :

$$V_h = \sqrt{K_w V_0} = \sqrt{0,81 \cdot 29} = 4,846 \text{ м/с}$$

$$w_h = K_w w_0 = 0,81 \cdot 500 = 405 \text{ Па}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{D_{эк} V_h}{\nu} = \frac{(D + 2b_p) V_h}{\nu} = \frac{(0,240 + 2 \cdot 0,00945) \cdot 4,846}{14,6 \cdot 10^{-6}} = 0,86 \cdot 10^5$$

Аэродинамический коэффициент c_x определяется в зависимости от числа Рейнольдса, где $\nu = 14,6 \cdot 10^{-6}$ м/с² – кинетическая вязкость воздуха

Следовательно, $c_x = 1,2$. Аналогично для опоры $c_{xоп} = 1,2$.

Статическая ветровая нагрузка:

$$q_B = c_x \cdot D_{\text{ЭК}} \cdot w_h = 1,2 \cdot 0,2589 \cdot 405 = 125,825 \text{ Н}$$

Динамический коэффициент при ветровых нагрузках:

$$\eta_B = 1 + \xi_B V_h^{1/3}$$

Поскольку $f_x \leq 5$ Гц, то параметр динамичности ξ_B определяется по кривым на рисунке 9 при логарифмическом декременте затухания δ_x , равен 0,3

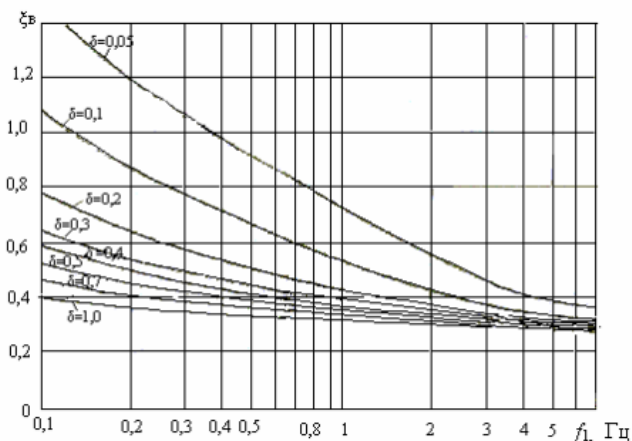


Рисунок 9 – Зависимость параметра динамичности при ветровых нагрузках от значений первой собственной частоты при различных логарифмических декрементах затухания

Следовательно, $\xi = 0,375$

Динамический коэффициент ветровых нагрузок:

$$\eta_B = 1 + \xi_B V_h^{1/3} = 1 + 0,375 \cdot 4,85^{1/3} = 1,635$$

Согласно [9] в РУ 150 кВ и выше должны быть учтены ветровые нагрузки на изоляторы.

Средняя ветровая нагрузка на опору:

$$q_{B \text{ оп}} = 0,5 \cdot \rho_B \cdot c_{x \text{ оп}} \cdot d_{\text{из}} \cdot V_h^2 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,2 \cdot 0,225 \cdot 4,846^2 = 3,805 \text{ Н}$$

Поправка, обусловленная ветровым воздействием на опору:

$$\Delta F = q_{B \text{ оп}} \cdot \frac{H}{2} = 3,805 \cdot \frac{3,33}{2} = 6,336 \text{ Н}$$

Нагрузка на опору:

$$F = \beta \cdot q_{B \text{ оп}} \cdot l = 0,5 \cdot 3,805 \cdot 18 = 35,248 \text{ Н}$$

Результирующие силы, действующие на опору при ветровой нагрузке:

$$F_{\text{max рез}} = (F + \Delta F) \eta_B = (35,248 + 6,336) \cdot 1,635 = 66,34 \text{ Н} < F_{\text{max x}} = 1200 \text{ Н}$$

Вывод: Условие прочности изоляционной опоры на изгиб при ветровых нагрузках выполняется с большим запасом.

Расчёт прочности шин при учёте собственного веса, гололёда и ветровой нагрузки:

Сборная шина Ø240x10:

Момент инерции:

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{3,141 \cdot (0,24^4 - 0,22^4)}{32 \cdot 0,24} = 3,988 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Изгибающий момент (для рассматриваемой схемы $\lambda = 8$ согласно таблице 2.4[9]):

$$M_{ym} = \frac{q_m \cdot l^2}{\lambda} = \frac{340,12 \cdot 18^2}{8} = 13777,63 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Напряжение в ошиновке по вертикальной оси:

$$\sigma_{ym} = \frac{M_{ym}}{W} = \frac{13777,63}{3,988 \cdot 10^{-4}} = 34,544 \cdot 10^6 \text{ Па} = 34,544 \text{ МПа}$$

Изгибающий момент для выбранной расчётной схемы по горизонтальной оси:

$$M_{xв} = \frac{q_{в} \cdot l^2}{\lambda} = \frac{125,825 \cdot 18^2}{8} = 5095,93 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Напряжение в ошиновке по горизонтальной оси с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки:

$$\begin{aligned} \sigma_{xв} &= \frac{M_x}{W} \eta_{в} = \frac{5095,93}{3,988 \cdot 10^{-4}} \cdot 1,635 = \\ &= 20,885 \cdot 10^6 \text{ Па} = 20,885 \text{ МПа} \end{aligned}$$

При монтаже труб применяется аргоновая сварка, после которой металл в месте шва теряет закалку и будет обладать свойствами марки 1915. Следовательно напряжение сравнивается с допустимым напряжением в зоне сварки $\sigma_{св.доп.} = 223 \text{ МПа}$

Аналогично для шин Ø240x8 и Ø220x10. Результаты сведём в таблицу 4:

Таблица 4 – Результаты проверки на прочность шины

Диаметры D, мм	Напряжение по ошиновке по горизонтальной оси σ_x , МПа	Напряжение по ошиновке по вертикальной оси σ_y , МПа	Максимальные результатирующие значения напряжения σ_{max} , МПа	Допустимое напряжение в зоне сварки $\sigma_{св, доп.}$, МПа
240x10	20,885	34,544	40,367	223
240x8	25,455	36,005	44,09	223
220x10	23,249	38,04	44,58	223

Так же произведён расчёт максимального ветрового прогиба для обоих проводников.

$$y_{\max в} = \frac{q_{\text{в}} l}{c_{\text{ш}}} \eta_{\text{в}} + \frac{F_{\text{max рез}}}{c_{\text{оп}}} = \frac{125,825 \cdot 18}{4,412 \cdot 10^4} \cdot 1,635 + \frac{66,34}{40,74 \cdot 10^3} = 0,0855 \text{ м}$$

Вывод: исследуемые диаметры ошиновки удовлетворяют требованиям на статический прогиб. Все ошиновки подходят условиям выбора и могут применяться на распределительном устройстве.

2.5 Проверка жёсткой ошиновки на ветровой резонанс

Проверка жёсткой ошиновки на ветровой резонанс в данной работе не проводится, поскольку в конструкции предусматривается установка демпфирующего устройства, обеспечивающего подавление резонансных колебаний и исключающего развитие опасных вибрационных режимов при ветровом воздействии.

2.6 Выбор изоляционных расстояний между проводниками

Наименьшие расстояния в свету между неизолированными токоведущими частями в ОРУ, находящимися под напряжением, до заземленных конструкций $a_{\phi-31}$, а также между разными фазами $a_{\phi-\phi1}$, а должны оставаться больше наименьших допустимых расстояний (Рисунок 10), соответственно, $A_{\phi-3} = 1200$ и $A_{\phi-\phi} = 1600$, приведенных в табл. 4.2.5 [8]:

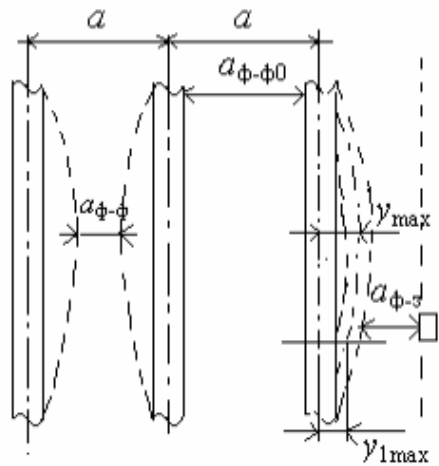


Рисунок 10 – К определению наименьших расстояний в свету
Условие минимального расстояния в свету между проводниками разных фаз:

$$a_{\phi-\phi 1} \geq A_{\phi-\phi}$$

В ОРУ $a_{\phi-\phi 1}$ и $a_{\phi-\phi 0}$ определяются с учетом воздействия ветровой нагрузки, равной 60% максимальной расчетной.

Согласно выбранной ШНК–4–330/3150 УХЛ1 $a_{\phi-\phi 0} = a = 3500$ мм

Наименьшее расстояние между фазами в свету:

$$\begin{aligned} a_{\phi-\phi 1} &= a - D - 2 \cdot 0,6 \cdot y_{\max \text{ в}} = 3500 - 240 - 2 \cdot 0,6 \cdot 85,54 = 3157,35 \text{ мм} \\ &= 3,157 \text{ м} \end{aligned}$$

Вывод: Изоляционные расстояния при воздействии ветровой нагрузки удовлетворяют условию ПУЭ-7.

2.7 Расчёт электродинамической стойкости шинных конструкций

Расчёт электродинамической стойкости выполнен для случая трёхфазного короткого замыкания с принятыми допущениями: ошиновка считается нитевидной, периодическая составляющая тока КЗ — незатухающей, расчёт ведётся для многопролётной конструкции с параллельными шинами.

Электродинамические нагрузки, Н/м:

$$q(\psi, t) = \frac{\alpha}{a_{\phi-\phi 1}} \cdot I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n(\psi) \cdot T_n(t)$$

Где α – параметр, равный $\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ при трехфазном КЗ и $2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ при двухфазном КЗ, I_m - амплитуда периодической составляющей тока, D_n -

функции зависящие от угла включения тока, T_n - функции времени, приведённые в формуле 3.2 [9].

Произведен расчет при учёте упругой податливости труб.

Коэффициент, пропорциональный импульсу апериодической составляющей:

$$\Delta D = T_a D_2 f_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{f_1 T_a}} \right) = 0,0365 \cdot 0,866 \cdot 1,717 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{1,717 \cdot 0,0365}} \right) = 0,0543$$

Эквивалентная ЭДН при учёте упругой податливости шин (по таблице 3.1 [9] $D_1 = 0$)

$$q_{эд} = \frac{\alpha}{a_{\phi-\phi_1}} I_m^2 (D_1 + \Delta D) = \frac{\alpha}{a_{\phi-\phi_1}} (\sqrt{2} I_{п0})^2 (D_1 + \Delta D) = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{3,157} \cdot (\sqrt{2} \cdot 4942)^2 \cdot (0 + 0,0174) = 0,145 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Наибольшие напряжения в материале шины, Па, максимальные нагрузки на изоляторы, Н:

$$\sigma_{x \text{ ЭДН}} = \frac{q_{эд} \cdot l^2}{\lambda \cdot W} = \frac{0,145 \cdot 18^2}{8 \cdot 3,988 \cdot 10^{-4}} = 14765,27 \text{ Па}$$

$$F_{x \text{ эд}} = \beta \cdot q_{эд} \cdot l = 0,5 \cdot 0,145 \cdot 18 = 1,308 \text{ Н}$$

Вывод: за счёт малой собственной частоты колебаний шин и быстрого затухания апериодической составляющей электродинамические нагрузки оказываются незначительными и не являются определяющими для конструкции.

2.8 Комплексные расчёты на прочность изоляторов и шин

По вертикальной оси на шины действует собственный вес, вес гололёда и ветровой резонанс. Так как в расчёте изоляционных промежутков использовалось 60% ветровой нагрузки.

Для Ø240x10:

Результирующие напряжения в жёсткой ошиновке:

$$\sigma_{y \text{ рез}} = \sigma_{ym} = 34,52 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{x \text{ рез}} = 0,6 \cdot \sigma_{xв} + \sigma_{x \text{ ЭДН } 10} \approx \sigma_{xв} = 0,6 \cdot 36,91 = 22,15 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{рез}} = \sqrt{\sigma_{x \text{ рез}}^2 + \sigma_{y \text{ рез}}^2} = \sqrt{22,15^2 + 34,52^2} = 41,02 \text{ МПа}$$

Результирующие воздействия на изоляционные опоры:

$$F_{\text{рез}} = 0,6F_{\text{мах рез}} + \beta \cdot q_{\text{эд}} \cdot l = 0,6 \cdot 69,131 + 0,5 \cdot 0,0466 \cdot 18 = 41,898 \text{ Н} \\ < 1,2 \text{ кН}$$

Аналогично для Ø240x8 и Ø220x10, результаты сведём в таблицу 5:

Таблица 5 – Результаты расчётов на прочность

Диаметры D, мм	Результирующие напряжения в шинах $\sigma_{\text{рез}}$, МПа	Допустимые напряжения в зоне сварки $\sigma_{\text{св.доп.}}$, МПа	Результирующие нагрузки в опорах $F_{\text{рез}}$, Н	Допустимые нагрузки на опоры $F_{\text{доп х}}$, Н
240x10	41,02	223	41,898	1200
240x8	39,12		41,094	
220x10	40,52		41,081	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исходных данных выполнено проектирование подстанции 330/110/10 кВ и произведён выбор основного оборудования.

Для РУ 330 кВ проектируемой подстанции, расположенной в Московской области, принята жёсткая ошиновка ЗАО «ЗЭТО» типа ШНК–4–330/3150 УХЛ1. Для оценки прочности рассмотрены варианты трубчатой ошиновки Ø240×8, Ø240×10 и Ø220×10, а также выбраны изоляционные опоры ИОС-110-600 М УХЛ1.

Проведены расчёты шинных конструкций и изоляционных опор с учётом воздействия гололёдных, ветровых и электродинамических нагрузок. Все рассмотренные варианты удовлетворяют требованиям по прочности и эксплуатационной надёжности.

По результатам работы установлено, что все исследуемые сечения успешно проходят проверку. Наиболее рациональным вариантом является ошиновка Ø240×8, обеспечивающая снижение массы конструкции на 11,6% по сравнению с Ø220×10 и на 19,3% по сравнению с Ø240×10. Дополнительно возможно применение труб меньшего диаметра при условии выполнения проверки на коронирование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Балаков, Ю.Н. Проектирование схем электроустановок: Учебное пособие для вузов / Ю.Н. Балаков, М.Ш. Мисриханов, А.В. Шунтов. – 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 288 с.

ГОСТ 18482-79. Трубы, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М. 2005. – 16 с.

Изоляторы типа ИОС. Технический каталог [Электронный ресурс] / ООО «Гжельский завод Электроизолятор». – URL: <https://insulator.ru/catalog/> (дата обращения: 10.06.2026).

Жесткая ошиновка ОРУ 110-750 кВ. Технический каталог [Электронный ресурс] / ЗАО «ЗЭТО». – URL: zeto.ru (дата обращения: 10.06.2026).

Карапетян, И.Г. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

Крючков, И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные и методические материалы для выполнения квалификационных работ: учебно-справочное пособие для вузов / И.П. Крючков, М.В. Пираторов, В.А. Старшинов; под ред. И.П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 138 с.

Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. – М. 2018. – 330 с.

СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ. – М. 2007. – 64 с.

СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. – М. 2008. – 130 с.