

Введение

Энергетика является одной из основных отраслей народного хозяйства и уровень её развития в значительной мере определяет положение государства в мировой экономике. Энергетика как основная отрасль хозяйства всегда стремилась как можно сильнее удовлетворять основным критериям функционирования энергетической системы, это:

- Надежность электроснабжения потребителей;
- Предоставление потребителю качественной электроэнергии;
- Экономическая эффективность всей энергосистемы.

Важнейшие задачи, решаемые энергетиками и энергостроителями, состоят в непрерывном увеличении объёмов производства, в сокращении сроков строительства новых энергетических объектов и реконструкции старых, уменьшение удельных капиталовложений, в сокращении расходов топлива, повышения производительности труда, в улучшении структуры производства и транспорта электроэнергии.

Проект будет осуществляться на территории Томской области.

В соответствии со схемой территориального планирования по территории Томской области в период 2016-2030гг. пройдут транспортные коридоры федерального и регионального значения, включающие в себя новые железнодорожные линии, речные порты и аэропорты, а также проектируемые в основных транспортных узлах информационно-логистические комплексы [1].

На перспективу развития на территории области возникнет Северосибирский мультимодальный транспортный коридор, являющийся дублером Транссибирского транспортного коридора. В составе проектируемого транспортного коридора на территории Томской области: транспортно-логистический комплекс в г.Колпашево;

- аэропорты – Колпашево, Каргасок, Стрежевой, Пионерный;
- речные порты – Белый Яр, Колпашево, Парабель;

- Северо-Сибирская железнодорожная магистраль.

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» протяженность Северо-Сибирской железнодорожной магистрали в пределах Томской области составит 860 км, (двупутная электрифицированная магистраль), в том числе на участке Чажемто – Белый Яр, с мостом через р. Обь в районе г. Колпашево, протяженностью 140 км. (Проектные решения СТП Томской области, инвестор проекта – Администрация Томской области, 2016-2025 годы).

Особенностью энергосистемы Томской области является то, что основные источники генерации сосредоточены на юге региона, а значительная доля потребителей электрической энергии, главным образом предприятия нефтегазового комплекса, расположены на севере области. Транспорт электрической энергии с юга на север осуществляется по длинным линиям напряжением 110 - 220 кВ, имеющим на сегодняшний день очень высокую загрузку, приводящую к тому, что в ремонтных и послеаварийных режимах этих воздушных линий требуется ограничение нагрузки потребителей. Такая ситуация характерна для большинства ВЛ напряжением 110-220 кВ. На многих подстанциях энергосистемы также остро стоит вопрос о дефиците резервов трансформаторной мощности. Такие обстоятельства приводят к тому, что в некоторых узлах энергосистемы практически исчерпана возможность подключения новых потребителей к электрической сети. Из практики видно, что наилучший способ обеспечения надежности энергообъектов после длительной эксплуатации - это установка нового оборудования взамен оборудования, отслужившего свой срок службы. В целях обеспечения покрытия растущих нагрузок и усиления электрических связей на напряжении 110 кВ схемой территориального планирования Томской области предусмотрено строительство ВЛ 110 кВ «ПС Чажемто – ПС Колпашево – ПС Белый Яр».

Цели проекта

Для создания условий устойчивого развития электроэнергетической инфраструктуры, обеспечивающей объекты социально-экономической сферы, жилищно-коммунального хозяйства, промышленности и жилищного строительства в рамках реализации приоритетных национальных проектов и повышение надежности, безопасности и качества функционирования энергетической инфраструктуры, схемой территориального планирования Томской области предусмотрено [1]:

Строительство двухцепной ВЛ 110 кВ «ПС Чажемто – ПС Колпашево – ПС Белый Яр».

В связи с этим, целью работы является проектирование:

- двухцепной воздушной линии электропередач 110 кВ от ПС «Чажемто» до ПС «Колпашево» протяженностью 63 км;
- двухцепной воздушной линии электропередач 110 кВ от ПС «Колпашево» до ПС «Белый Яр» протяженностью 138км.

Описание трассы ВЛ

Трасса проектируемой двухцепной ВЛ 110 кВ будет проходить по лесостепной, ненаселённой местности, Колпашевского района Томской области, тип местности – Б [2,п.2.5.6], относящейся ко II району по гололёду и ко II району по ветровой нагрузке. Началом трассы ВЛ 110 кВ служит подстанция «Чажемто», конечный пункт – подстанция «Белый Яр», с заходом на подстанцию «Колпашево».

Общая протяженность трассы ВЛ 110 кВ составляет 201 км. По участкам: ПС «Чажемто» - ПС «Колпашево» - 63км, ПС «Колпашево» - ПС «Белый Яр» - 138км. Длина участка 138 км, поэтому ЛЭП сооружаем в габаритах следующего класса напряжений (220кВ).

Точка токораздела – опора № 250, (между северными электрическими сетями и восточными электрическими сетями) на расстоянии 75км от ПС «Колпашево». В графической части дипломной работы на листе 1 (Приложение А) представлен обзорный план трассы ВЛ, условные обозначения к плану трассы, участок продольного профиля трассы с расстановкой опор.

На проектируемой ВЛ принимаются унифицированные стальные анкерно – угловые опоры У110 – 2Д+5 (лист 2, Приложение Б). В качестве промежуточных опор будут приняты унифицированные стальные опоры П110 – 6В (лист 3, Приложение В).

На проектируемой ВЛ предусматривается переход через реку Обь, протяженностью 1300 метров, выполненный опорами У-38М, высота опор – 105м, а также переход через планируемую к строительству ж/д дорогу, длина пролета 260 метров. Переход выполнен на опорах У110-2Д+5.

					ФЮРА.140400.007.ПЗ					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>						
<i>Разраб.</i>	<i>Рогальская</i>				<i>Реферат</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руководит.</i>	<i>Бацев А.А.</i>							5	114	
<i>Консульт.</i>								4		
<i>Н. контр.</i>								ТПУ ЭнЭО Группа 35А13		
<i>Утв.</i>										

1 Выбор оборудования на стороне 110 кВ

1.1 Выбор питающей линии.

Выбор сечений проводов ВЛЭП при проектировании электрических сетей проводится по методу экономической плотности тока, в зависимости от типа проводника и времени использования наибольшей нагрузки T_{\max} [3].

В этом случае расчетная величина сечения провода определяется по формуле:

$$F_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{макс}}}{j_{\text{эк}}},$$

где $I_{\text{макс}}$ – ток максимального режима в одной цепи линии электропередач, А;

$j_{\text{эк}}$ – нормированное значение экономической плотности тока, А/мм²; справочная величина.

Ток максимального режима в одной цепи линии электропередач находится по формуле:

$$I_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \cdot n},$$

где $P_{\text{макс}}$ – активная мощность потребителя в режиме максимальных нагрузок;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности потребителя;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ЛЭП;

n – число цепей ЛЭП.

Рассмотрим выбора провода на примере ВЛ 110кВ Чажемто – Колпашево.

$$I_{\text{макс}} = \frac{63,0}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,93 \cdot 2} = 177,8 \text{ А.}$$

По табл. 4.10 [3] выбираем значение экономической плотности тока. Учитывая продолжительность использования максимума нагрузки $T_{\text{макс}} = 5200$ ч, принимаем $j_{\text{эк}} = 1$ А/мм². Тогда

$$F_{расч} = \frac{177,8}{1} = 177,8 \text{ мм}^2.$$

Принимаем сталеалюминевый провод марки АС-185/29 по ГОСТ 839-80.

Параметры по двум линиям приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ЛЭП

Линия	$U_{ном}$	n	$P_{max},$ МВт	Марка провода	$I_{доп},$ А	R_0 Ом/км	X_0 Ом/км	$L,$ км	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом
Ч-К	110	2	63	АС-185	510	0,159	0,413	63	5,01	13,01
К-Б	110	2	31,7	АС-240	610	0,118	0,405	138	8,14	27,95

Выбранное сечение провода проверяем на соответствие ряду технических условий.

Проверке «по короне» подлежат ВЛЭП 110 кВ и выше, расположенные выше 1500 м над уровнем моря. При более низких отметках проверка не производится, т.к. при использовании метода экономической плотности тока при выборе сечения следует принимать его не меньшим допустимого по условию «короны» [4].

Проверке «по нагреву» подлежат режимы, когда по проверяемой линии протекают наибольшие токи. В этом случае сечение проводов двухцепной линии проверяется при отключении одной из цепей ($n = 1$) в период максимальной нагрузки. При этом значение тока в послеаварийном режиме $I_{n/ав}$ не должно превышать значение длительно допустимого тока $I_{доп}$ [6, с. 234] для выбранного сечения провода.

Проверка сечения на нагрев провода АС-185 в нормальном режиме:

$$I_{дл. доп} \geq I_{нб},$$

где $I_{дл. доп}$ – длительно допустимая нагрузка на одну цепь,

$$I_{дл. доп} = 510 \text{ А};$$

$$510 \text{ А} > 177,8 \text{ А}.$$

Условие выполняется.

Проверка сечения на нагрев провода АС-185 в послеаварийном режиме. Этот режим характеризуется увеличением тока, протекающего по оставшейся линии в два раза по сравнению с нормальным режимом.

$$I_{\text{дл. доп}} \geq I_{\text{ав.}}$$

где $I_{\text{ав}}$ – ток в послеаварийном режиме, А;

$$I_{\text{ав}} = I_{\text{нб}} \cdot 2 = 177,8 \cdot 2 = 355,6 \text{ А};$$

$$510 \text{ А} > 356 \text{ А}.$$

Условие выполняется.

Выбор провода для ВЛ Чажемто – Колпашево и ВЛ Колпашево – Белый Яр приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика проводов ЛЭП

Линия	$U_{\text{ном, кВ}}$	n	$P_{\text{max, МВт}}$	Марка провода	$I_{\text{рас, А}}$	$I^{\text{наг}}, \text{А}$	$I_{\text{доп, А}}$	Отключение линии
Ч-К	110	2	61,8	АС-185	177,8	355,6	510	Одна цепь
К-Б	110	2	31,7	АС-240	90	180	610	

Сравнение токов послеаварийных режимов для каждой линии с допустимыми по нагреву $I_{\text{доп}}$ показало, что для каждого участка сети $I^{\text{наг}} < I_{\text{доп}}$. Следовательно, выбранные сечения для проектируемой ВЛЭП 110 кВ проходят по условию «нагрева» током наиболее тяжелого режима работы.

Проверке по потерям напряжения воздушные линии 35 кВ и выше не подлежат, так как повышение уровня напряжения путем увеличения сечения проводов по сравнению с применением на понижающих подстанциях трансформаторов с РПН, экономически не оправдано.

В результате проведенных расчетов, можно сделать вывод, что выбранные марки проводов воздушных линий электропередачи удовлетворяют условиям работы, как в нормальном, так и послеаварийном режимах.

1.2 Выбор силового оборудования.

С целью выбора выключателей на реконструируемых ОРУ, произведены расчеты токов трехфазного короткого замыкания (КЗ). Полученные результаты сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета токов КЗ

Место КЗ	Значение тока КЗ в ветви выключателя, кА
Секция шин 110кВ ПС Чажемто	2,28
Секция шин 110кВ ПС Колпашево	1,83
Секция 110кВ ПС Белый Яр	1,93

Для установки выбираем современные элегазовые выключатели, которые имеют следующие преимущества:

- высокий механический и коммутационный ресурс;
- большие межремонтные сроки и малый объем обслуживания;
- низкий уровень шума при оперировании выключателя, отсутствие выбросов;
- малый расход сжатого воздуха, потребляемого пневматическим приводом и малые токи потребления электромагнитного управления;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- быстрота действия;
- высокая отключающая способность;
- высокая заводская готовность, выключатель поставляется укрупнёнными узлами, заполненными элегазом, в отрегулированном и испытанном состоянии.

Для всех присоединений принимаем выключатели типа ВЭБ-110-40/2000.

Номинальное напряжение: $U_{ном}=110$ кВ;

Номинальный ток: $I_{ном}=2000$ А;

Номинальный ток отключения: $I_{откл.ном}=40$ кА;

Содержание апериодической составляющей тока отключения: $\beta_n=30\%$

Ток электродинамической стойкости $I_{дин}=40$ кА;

Ток электродинамической стойкости наибольший пик (амплитудное значение) $i_{дин}=100$ кА;

Ток термической стойкости $I_{тер}=40$ кА;

Время протекания тока термической стойкости: $t_{тер}=3$ с;

Полное время отключения: $t_{отк.в}=0,08$ с;

Собственное время отключения: $t_{с.в}=0,05$ с;

Проверка выключателей

1. Номинальное напряжение (уровень изоляции):

$$U_{уст} \leq U_{ном}; 110 \text{ кВ} = 110 \text{ кВ};$$

2. Номинальный (длительно продолжительный) ток:

$$I_{норм} \leq I_{ном}; 178 \text{ А} \leq 2000 \text{ А};$$

$$I_{утеж} \leq I_{ном}; 356 \text{ А} \leq 2000 \text{ А}$$

3. Отключающая (коммутирующая) способность:

$$I_{н.о}^{BH} = I_{н.т}; I_{п.т} \leq I_{откл.ном};$$

$$2,28 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

$$i_{ат} \leq i_{а.ном} = \sqrt{2} \cdot I_{откл.ном} \cdot \beta;$$

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot I_{н0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 2,28 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,03}} = 0,436 \text{ кА};$$

$$i_{а.ном} = \sqrt{2} \cdot I_{откл.ном} \cdot \beta = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 0,3 = 16,97 \text{ кА}$$

$$0,436 < 16,97$$

где $T_a = 0,03$ с – значение постоянной времени затухания апериодической составляющей.

$$\tau = t_{з.мин} + t_{с.в.} - \text{расчетное время.}$$

$$0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с}$$

4. Электродинамическая стойкость:

$$I_{п.о} \leq I_{дин};$$

$$2,28 \text{ кА} \leq 40 \text{ кА};$$

$$i_y \leq i_{дин};$$

$$5,54\text{кА} \leq 100\text{кА};$$

5. Термическая стойкость:

$$B_k \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}};$$

$$B_{k.\text{расч}} = I_{\text{н.о}}^2 \cdot (t_{\text{откл}} + T_a) = 0,28^2 \cdot (0,08 + 0,03) = 0,009 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$0,009 \leq 40^2 \cdot 3 = 4800 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Выключатель проверку проходит.

Выбор разъединителя

Выбираем разъединитель РНДЗ-110Б/1000У1 для наружной установки:

Номинальное напряжение: $U_{\text{ном}}=110 \text{ кВ};$

Номинальный ток: $I_{\text{ном}}=1000 \text{ А};$

Амплитуда предельного сквозного тока: $i_y=80 \text{ кА};$

Ток термической стойкости главных ножей/допустимое время

$$I_{\text{тер}}=31,5\text{кА}/3\text{с};$$

Ток термической стойкости заземляющих ножей/допустимое время

$$I_{\text{тер}}=31,5 \text{ кА}/1\text{с};$$

Проверка разъединителя по параметрам:

1. Номинальное напряжение (уровень изоляции):

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}; 110\text{кВ} = 110 \text{ кВ};$$

2. Номинальный (длительно продолжительный) ток:

$$I_{\text{норм}} \leq I_{\text{ном}}; 178\text{А} \leq 1000\text{А};$$

$$I_{\text{утеж}} \leq I_{\text{ном}}; 356\text{А} \leq 1000\text{А};$$

3. Электродинамическая стойкость:

$$i_y \leq i_{\text{дин}}; 5,54\text{кА} \leq 80\text{кА};$$

4. Термическая стойкость:

$$B_k \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}};$$

$$B_{k.расч} = I_{п.о}^2 \cdot (t_{откл} + T_a) = 2,28^2 \cdot (0,08 + 0,03) = 0,57 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$0,57 \leq 31,5^2 \cdot 3 = 2976 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Разъединитель проверку проходит.

Принципиальная схема проектируемой ВЛ представлена в
Приложении Г.

2 Механический расчет воздушных линий электропередач 110 кВ.

2.1 Исходные данные для проектирования ВЛ

Для проведения механического расчета ВЛ110 кВ используем основные показатели климатических условий, приведенные в таблица 4.

Таблица 4 – Основные показатели климатических условий

Наименование показателя	Величина показателя
1	2
1. Температура воздуха (°С)	
а) высшая	36
б) низшая	-54
в) при гололеде	-5
г) среднегодовая	-1,5
2. Район климатических условий:	
а) по ветру	II
б) по гололеду	II
в) по интенсивности пляски проводов и тросов	умеренный
г) по среднегодовой продолжительности гроз	10-60 час.
д) по степени загрязненности атмосферы (СЗА)	обычные условия

2.2 Определение единичных и удельных механических нагрузок на провод от внешних воздействий

Сооружаемая трасса воздушной линии электропередачи 110 кВ проходит по ненаселённой местности, содержащей лесные массивы. На унифицированных свободностоящих стальных опорах типа П110-6В будут смонтированы провода марки АС-185/29, технические данные которого в соответствии с [7, табл. 3.50] приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические данные провода АС-185/29

Параметры	Проводник	Сердечник	Провод
Сечение, мм ²	181	29	210
Диаметр, мм	-	6,9	18,8
Масса, кг/км	-	-	728

Основой для районирования по ветровому давлению служат значения максимальных скоростей ветра с 10-минутным интервалом осреднения скоростей на высоте 10 м с повторяемостью 1 раз в 25 лет [2]. Районирование по гололеду производится по максимальной толщине стенки отложения гололеда цилиндрической формы при плотности 0,9 г/см³ на проводе диаметром 10 мм, расположенном на высоте 10 м над поверхностью земли, повторяемостью 1 раз в 25 лет [2, п.2.5.38].

Нормативное ветровое давление W_0 принимается согласно [2,табл. 2.5.1]:

$$W_0 = 500 \text{ Па (скорость ветра } v_0=29 \text{ м/с)}$$

Нормативная толщина стенки гололеда b_3 для высоты 10 м над поверхностью земли принимается согласно [2, табл. 2.5.3]:

$$b_3 = 15 \text{ мм}$$

1) Постоянно действующая нагрузка от собственного веса на один метр провода:

$$P_n = M_n \cdot g \cdot 10^{-3} = 728 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 7,134 \text{ Н/м}$$

где M - расчетный вес провода в кг/км;

g - коэффициент, учитывающий приращение длины скрученных проволок: $g = 9,8$;

F_{np} - площадь поперечного сечения, мм²;

10^{-3} - для получения единичной нагрузки от собственного веса в килограммах на один метр следует разделить на 1000 вес, указанный в стандарте.

$$\gamma_n = \frac{P_n}{F_{np}} = \frac{7,134}{210} = 0,034 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

2) Нормативная временно действующая нагрузка от массы гололедных отложений на один метр провода:

$$P_{en}^H = \pi \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_3 \cdot (d_n + K_i \cdot K_d \cdot b_3) \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3}$$

K_i, K_d – коэффициенты, учитывающие изменения толщины стенки гололёда по высоте и в зависимости от диаметра провода, определяются по [2, табл. 2.5.4].

Для дальнейших расчётов была выбрана унифицированная свободностоящая опора типа П110-6В. Эскиз опоры приведён в Приложении А.

Согласно [2, п. 2.5.44] высота расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов h_{np} для габаритного пролета определяется по формуле, м:

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3} \cdot f,$$

где h_{cp} - среднеарифметическое значение высоты крепления проводов к изоляторам или

среднеарифметическое значение высоты крепления тросов к опоре, отсчитываемое от отметок земли в местах установки опор, м;

f - стрела провеса провода или троса в середине пролета при высшей температуре, м.

$$h_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^i H_{mp}^i}{n} = \frac{75,0}{3} = 25,0 \text{ м.}$$

Стрела провеса при среднеэксплуатационных условиях:

$$f = \frac{\gamma_n \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{сэ}}$$

Согласно табл. 2.2 провод марки АС 185/29 имеет поперечное сечение проводника $F_{AL}=181$ мм, сердечника – $F_{ст}=29$ мм. Отношение площадей поперечных сечений равно:

$$\frac{F_{AL}}{F_{ст}} = \frac{181}{29} = 6,24$$

Для этого отношения по [2, табл. 2.5.7] допустимое механическое напряжение σ равно 90 Н/мм².

Среднеэксплуатационные условия работы провода характеризуются постоянной нагрузкой на провод $\gamma_{пр}$.

Провод монтируется на опорах П110-6В. Промежуточные пролёты согласно [7, табл..36] находятся в пределах 330-200 м. Примем длину пролёта $l = 250$ м, тогда

$$f = \frac{\gamma_n \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{сз}} = \frac{0,034 \cdot 250^2}{8 \cdot 90} = 2,95 \text{ м}$$

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3} \cdot f = 25,0 - \frac{2}{3} \cdot 2,95 = 23 \text{ м}$$

При высоте расположения приведенного центра тяжести проводов или тросов до 25м поправки на толщину стенки гололеда на проводах и тросах в зависимости от высоты и диаметра проводов и тросов не вводятся [4, п.2.5.49].

$$K_i = 1 \quad K_d = 0,9.$$

$$P_{zn}^H = \pi \cdot K_d \cdot b_3 \cdot (d_n + K_d \cdot b_3) \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3} = \\ = 3,14 \cdot 0,9 \cdot 15 \cdot (18,8 + 0,9 \cdot 15) \cdot 0,9 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 12,07 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{zn}^H = \frac{P_{zn}^H}{F_{np}} = \frac{12,07}{210} = 0,0575 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

3) Нормативная временно действующая нагрузка от давления ветра на один метр провода (провод, свободный от гололеда):

$$P_{Wn}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi = \\ = 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 500 \cdot 18,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 6,607 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wn}^H = \frac{P_{Wn}^H}{F_{np}} = \frac{6,607}{210} = 0,031 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

α_w – коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролёту ВЛ и зависящий от ветрового давления. Определяется согласно [2, п.2.5.52] $\alpha_w = 0,71$.

K_L – коэффициент, учитывающий влияние длины пролёта на ветровую нагрузку. Определяется согласно [2, п.2.5.52], $K_L = 1$.

K_w – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности. Определяется согласно [2, табл. 2.5.2], $K_w = 0,9$.

C_x – коэффициент лобового сопротивления. Для проводов, свободных от гололёда диаметром 20 мм и более $C_x = 1,1$ согласно [2, п.2.5.52].

W – нормативное ветровое давление, Па.

F – площадь продольного диаметрального сечения провода, мм²,
 $F = d_n \times 10^{-3}$

φ – угол между направлением ветра и осью ВЛ, для упрощения расчётов примем равным 90^0 .

4) Нормативная временно действующая нагрузка от давления ветра на один метр провода (провод с гололедом):

$$P_{Wnz}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot 0,25 \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi = \\ = 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 0,25 \cdot 500 \cdot 45,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 4,328 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wnz}^H = \frac{P_{Wnz}^H}{F_{np}} = \frac{4,328}{210} = 0,021 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

$C_x = 1,2$ согласно [2, п 2.5.52].

$$F = (d_n + 2 \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_s) \cdot 10^{-3} = (18,8 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 15) \cdot 10^{-3} = 45,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

5) Расчётная временно действующая нагрузка от массы гололедных отложений на один метр провода:

$$P_{zn} = P_{zn}^H \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d = 11,14 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 0,5 = 7,241 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{zn} = \frac{P_{zn}}{F_{np}} = \frac{7,241}{210} = 0,034 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

$\gamma_{nw} = 1$ – коэффициент надёжности по ответственности, принимаемый согласно [2, п. 2.5.55];

$\gamma_p = 1$ – региональный коэффициент, значение которого принимается на основании опыта эксплуатации и указывается в задании на проектирование ВЛ, согласно [2, п. 2.5.55];

$\gamma_f = 1,3$ – коэффициент надёжности по гололёдной нагрузке, принимаемый 1,3 для районов по гололеду I и II;

$\gamma_d = 0,5$ – коэффициент условий работы.

б) Расчётная временно действующая нагрузка от давления ветра на один метр провода (провод, свободный от гололеда):

$$P_{Wn} = P_{Wn}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 6,607 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 7,268 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wn} = \frac{P_{Wn}}{F_{np}} = \frac{7,268}{210} = 0,035 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

$\gamma_{mw} = 1$ – коэффициент надёжности по ответственности, принимаемый согласно [2, п. 2.5.54];

$\gamma_p = 1$ – региональный коэффициент, значение которого принимается на основании опыта эксплуатации и указывается в задании на проектирование ВЛ, согласно [2, п. 2.5.54];

$\gamma_f = 1,1$ – коэффициент надёжности по гололёдной нагрузке, принимаемый 1,1.

7) Расчётная временно действующая нагрузка от давления ветра на один метр провода (провод с гололедом):

$$P_{Wn2} = P_{Wn2}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 4,247 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4,672 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wn2} = \frac{P_{Wn2}}{F_{np}} = \frac{4,672}{210} = 0,023 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

8) Результирующая нагрузка от массы провода и массы гололеда:

$$P_{\Sigma 1} = P_n + P_{en} = 7,134 + 7,241 = 14,375 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{\Sigma 1} = \frac{P_{\Sigma 1}}{F_{np}} = \frac{14,375}{210} = 0,069 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

9) Результирующая нагрузка от собственной массы провода и давления ветра:

$$P_{\Sigma 2} = \sqrt{P_n^2 + P_{wn}^2} = \sqrt{7,134^2 + 7,268^2} = 10,184 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{\Sigma 2} = \frac{P_{\Sigma 2}}{F_{np}} = \frac{10,184}{210} = 0,049 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

10) Результирующая нагрузка от массы провода с гололедом и давления ветра:

$$P_{\Sigma 3} = \sqrt{P_{\Sigma 1}^2 + P_{\text{внз}}^2} = \sqrt{14,375^2 + 4,672^2} = 15,115 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{\Sigma 3} = \frac{P_{\Sigma 3}}{F_{\text{пр}}} = \frac{15,115}{210} = 0,072 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

Таким, образом, при сравнении значений результирующих нагрузок видно, что наибольшая – действующая от массы провода с гололедом и давлением ветра. Следовательно, в дальнейших расчётах принимаем, что $\gamma_{\text{нб}} = \gamma_{\Sigma 3} = 0,072 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$.

2.3 Определение критических длин пролётов

Модуль упругости $E = 8,25 \times 10^4 \text{ Н/м}$, температурный коэффициент $\alpha = 19,2 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ согласно [2, табл. 2.5.8].

Предельные значения напряжений при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре по [2, табл. 2.5.7]: $\sigma_{\text{нб}} = \sigma_{-} = 135 \text{ Н/мм}^2$, а также при среднегодовой температуре $\sigma_{\text{сз}} = 90 \text{ Н/мм}^2$. Каждое из этих значений не должно быть превышено в процессе работы ВЛ.

Рассчитаем изменение значений среднеэксплуатационных напряжений в проводе, которые будут возникать в пролетах различной длины, если требуется обеспечить сохранение допускаемых напряжений при возникновении наибольшей нагрузки или наибольшей температуры.

Для этого составим и решим уравнение состояния провода в двух вариантах. В каждом из вариантов искомым считаем $\sigma_{\text{сз}}$. При этом искомое напряжение для первого варианта обозначим $\sigma_{\text{сз1}}$, для второго – $\sigma_{\text{сз2}}$.

Вариант 1: исходные условия – возникновение наибольшей механической нагрузки $\gamma_{\text{нб}}$; искомые условия – среднеэксплуатационные. Тогда уравнение состояния примет вид:

$$\sigma_{\text{сз}} - \frac{\gamma_{\text{н}}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{\text{сз}}^2} = \sigma_{\text{нб}} - \frac{\gamma_{\Sigma 2}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{\text{нб}}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{\text{сз}} - t_{\text{г}})$$

Полученное уравнение можно представить как неполное кубическое:

$$\sigma_{c3}^3 - A \cdot \sigma_{c3}^2 - B = 0,$$

$$\text{где } A = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{\Sigma 2}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E(t_{c2} - t_2);$$

$$B = \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24}.$$

Данную задачу можно решить методом Ньютона:

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k - \frac{f(\sigma_k)}{f'(\sigma_k)}$$

$$f'(\sigma_k) = 3\sigma_k^2 - 2A\sigma_k$$

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k - \frac{\sigma_k^3 - A\sigma_k^2 - B}{3\sigma_k^2 - 2A\sigma_k} = \frac{\sigma_k^2(2\sigma_k - A) + B}{\sigma_k(3\sigma_k - 2A)}$$

Рассмотрим, как меняется σ_{c3} с изменением l при $\gamma_{нб}$.

Независимая переменная l может меняться от 0 до ∞ .

При $l=0$:

$$\begin{aligned} \sigma_{c3 Н}^{(1)} &= \sigma_{нб} - \alpha E(t_{c2} - t_2) = 135 - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-1,5 - (-5)) = \\ &= 129,45 \text{ Н/мм}^2 \end{aligned}$$

При $l \rightarrow \infty$:

$$\sigma_{c3 К}^{(1)} = \frac{\gamma_n}{\gamma_{\Sigma 3}} \cdot \sigma_{нб} = \frac{0,034}{0,072} \cdot 135 = 63,75 \text{ Н/мм}^2$$

Т.е. при возникновении $\gamma_{нб}\sigma_{c3}$ будет меняться от 129,45 до 63,75 Н/мм².

Получим зависимости коэффициентов А и В от l_i :

$$A = 129,45 - 0,001 \cdot l_i^2$$

$$B = 4,125 \cdot l_i^2$$

Вычислим значения А и В, а также значения σ_{c3} при длинах пролетов от 0 до 450 м и сведем результаты в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчётов

L, м	A	B	$\delta_0, \text{Н/мм}^2$	$\delta_1, \text{Н/мм}^2$	$\delta_2, \text{Н/мм}^2$	$\delta_3, \text{Н/мм}^2$	$\delta_4, \text{Н/мм}^2$
0	129,45	0	129,4500	129,4500	129,4500	129,4500	129,4500
50	126,95	10313	129,4500	127,6355	127,5836	127,5835	127,5835
100	119,45	41250	127,5835	122,6174	122,2144	122,2118	122,2118
150	106,95	92813	122,2118	114,9723	114,0939	114,0814	114,0814
200	89,45	165000	114,0814	105,7331	104,5680	104,5462	104,5462
250	66,95	257813	104,5462	96,3981	95,3402	95,3231	95,3231
300	39,45	371250	95,3231	88,4107	87,7157	87,7090	87,7090
350	6,95	505313	87,7090	82,4044	82,0372	82,0355	82,0355
400	-30,55	660000	82,0355	78,1596	77,9822	77,9818	77,9818
450	-73,05	835313	77,9818	75,1766	75,0909	75,0909	75,0909

Вариант2: исходные условия – условия наиминших температур окружающей среды t_- ; искомые условия – среднеэксплуатационные.

Уравнение состояния:

$$\sigma_{сз} - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_-^2} = \sigma_- - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha \cdot E(t_{сз} - t_-)$$

Аналогично предыдущему варианту, определяем $\sigma_{сз}$ при $l=0$ и при $l \rightarrow \infty$.

При $l=0$:

$$\begin{aligned} \sigma_{сз \text{ Н}}^{(2)} &= \sigma_- - \alpha \cdot E(t_{сз} - t_-) = 135 - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-1,5 - (-54)) = \\ &= 51,84 \text{ Н/мм}^2 \end{aligned}$$

При $l \rightarrow \infty$:

$$\sigma_{сз \text{ К}}^{(2)} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n} \cdot \sigma_- = 135 \text{ Н/мм}^2$$

Т.е. при возникновении $\gamma_{нб} \sigma_{сз}$ будет меняться от 51,84 до 135 Н/мм².

Получим зависимости коэффициентов А и В от l_i :

$$A = \sigma_- - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha E(t_{сз} - t_-) = 51,84 - 0,00022 \cdot l_i^2;$$

$$B = \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24} = 4,125 \cdot l_i^2$$

Вычислим значения А и В, а также значения $\sigma_{сз}$ при длинах пролетов от 0 до 450 м и сведём результаты в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчётов

L, м	A	B	$\delta_0, \text{Н/мм}^2$	$\delta_1, \text{Н/мм}^2$	$\delta_2, \text{Н/мм}^2$	$\delta_3, \text{Н/мм}^2$	$\delta_4, \text{Н/мм}^2$
0	51,84	0	51,8400	51,8400	51,8400	51,8400	51,8400
50	51,29	10 313	51,8400	55,0591	54,7360	54,7325	54,7325
100	49,64	41 250	54,7325	62,0486	60,8383	60,7991	60,7991
150	46,89	92 813	60,7991	68,4825	67,3771	67,3508	67,3508
200	43,04	165 000	67,3508	74,3569	73,5568	73,5453	73,5453
250	38,09	257 813	73,5453	79,7612	79,2006	79,1956	79,1956
300	32,04	371 250	79,1956	84,6896	84,2937	84,2915	84,2915
350	24,89	505 313	84,2915	89,1551	88,8713	88,8703	88,8703
400	16,64	660 000	88,8703	93,1879	92,9813	92,9808	92,9808
450	7,29	835 313	92,9808	96,8244	96,6721	96,6718	96,6718

График зависимости среднеэксплуатационного механического напряжения от длины пролёта представлен на рисунке 1.

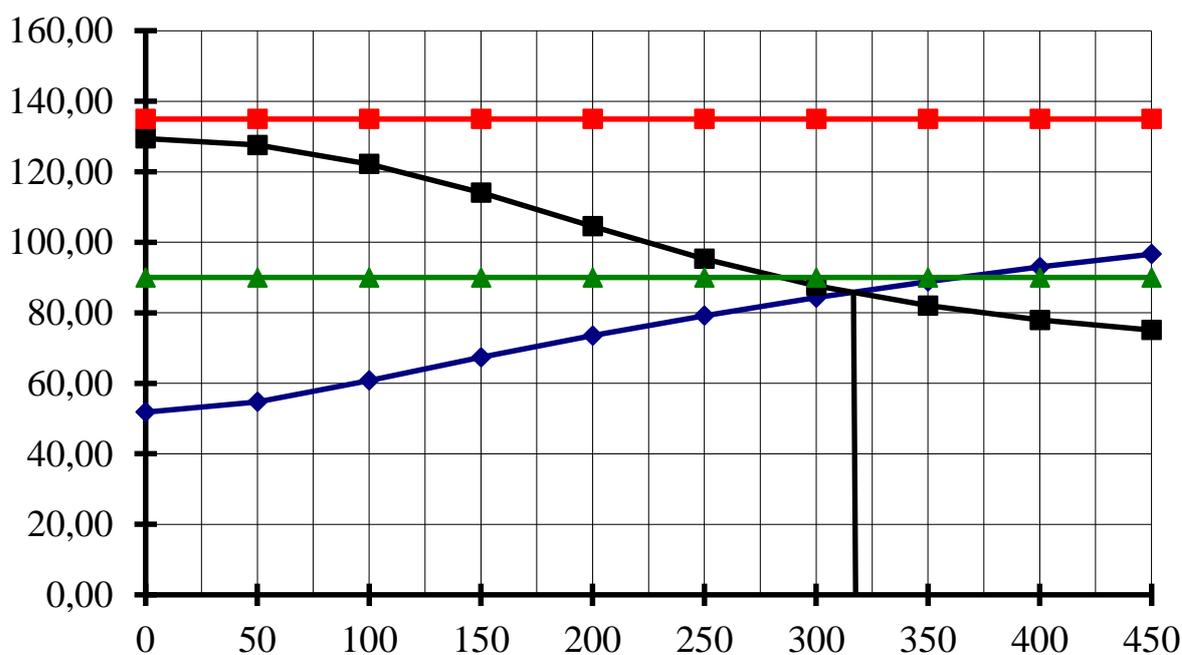


Рисунок 1 – График зависимости среднеэксплуатационного механического напряжения от длины пролёта: 1- при наибольших нагрузках, 2 – при наименьшей температуре.

Определим значения $l_{к1}, l_{к2}, l_{к3}$:

$$l_{1k} = 4,9 \frac{\sigma_-}{\gamma_n} \cdot \sqrt{\frac{(\sigma_- - \sigma_{CЭ}) + \alpha \cdot E \cdot (t_{c2} - t_-)}{E \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_-}{\sigma_{CЭ}} \right)^2 \right]}} =$$

$$= 4,9 \cdot \frac{135}{0,034} \cdot \sqrt{\frac{(135 - 90) + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-1,5 - (-54))}{8,25 \cdot 10^4 \cdot \left[1 - \left(\frac{135}{90} \right)^2 \right]}} = 374 \text{ м}$$

$$l_{2k} = 4,9 \frac{\sigma_{нб}}{\gamma_n} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot (t_2 - t_-)}{\left(\frac{\gamma_{\Sigma 3}}{\gamma_n} \right)^2 - 1}} = 4,9 \cdot \frac{135}{0,034} \cdot \sqrt{\frac{19,2 \cdot 10^{-6} \cdot (-5 - (-54))}{\left(\frac{0,072}{0,034} \right)^2 - 1}} = 320 \text{ м}$$

$$l_{3k} = 4,9 \frac{\sigma_{нб}}{\gamma_n} \cdot \sqrt{\frac{(\sigma_{нб} - \sigma_{CЭ}) + \alpha \cdot E \cdot (t_2 - t_{c2})}{E \cdot \left[\left(\frac{\gamma_{\Sigma 3}}{\gamma_n} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{нб}}{\sigma_{CЭ}} \right)^2 \right]}} =$$

$$= 4,9 \cdot \frac{135}{0,034} \cdot \sqrt{\frac{(135 - 90) + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-5 - (-1,5))}{8,25 \cdot 10^4 \cdot \left[\left(\frac{0,072}{0,034} \right)^2 - \left(\frac{135}{90} \right)^2 \right]}} = 285 \text{ м}$$

Таким образом, имеем:

Выбранный пролёт $l = 250 \text{ м}$, $l_{1к} = 374 \text{ м}$, $l_{2к} = 320 \text{ м}$, $l_{3к} = 285 \text{ м}$.

Соотношение пролетов $l_{1к} > l_{2к} > l_{3к}$, значит расчетным пролетом является $l_{2к}$.

Так как $l < l_{2к}$, то определяющими климатическими условиями будут : t , σ , γ_1 .

Вывод: окончательными для строительства воздушной линии электропередач будут климатические условия при наинизших температурах.

2.4 Определение критической температуры и габаритного пролета

Значение критической температуры:

$$t_k = (t_2 - 3) + \frac{\sigma_{нб}}{\alpha \cdot E} \cdot \frac{\gamma_n}{\gamma_{\Sigma 3}} = (-5 - 3) + \frac{135}{8,25 \cdot 10^4 \cdot 19,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,034}{0,072} = 33^\circ \text{C}$$

$t_k = 33^\circ \text{C}$, $t_+ = 35^\circ \text{C}$, $t_k < t_+$ - следовательно, максимальное провисание провода будет при максимальных температурах.

Габаритный пролет:

$$l_{заб}^4 \left(\frac{\gamma_{[f]}}{8f} + \left(\frac{\gamma_{[\sigma]}}{\sigma} \right)^2 \right) \cdot \frac{E}{24} - l_{заб}^2 (\sigma + \alpha \cdot E(t_{[\sigma]} - t_{[f]})) - \frac{8}{3} f^2 E = 0$$

$$\gamma_{[f]} = \gamma_n, \quad \gamma_{[\sigma]} = \gamma_{\Sigma 2}, \quad t_{[\sigma]} = t_{\sigma}, \quad t_{[f]} = t_{+}$$

Данное уравнение является биквадратным. Представим его в следующем виде: $A \cdot l_{заб}^4 - B \cdot l_{заб}^2 - C = 0$,

$$A = \frac{\gamma_{[f]}}{8f} + \left(\frac{\gamma_{[\sigma]}}{\sigma} \right)^2 \cdot \frac{E}{24} = \frac{0,034}{8 \cdot 4,25} + \left(\frac{0,072}{135} \right)^2 \cdot \frac{8,25 \cdot 10^4}{24} = 0,002237$$

$$B = \sigma + \alpha E(t_{[\sigma]} - t_{[f]}) = 135 + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-5 - 36) = 70,05$$

$$C = \frac{8}{3} f^2 E = \frac{8}{3} \cdot 4,25^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4 = 3973753$$

Тогда $l_{габ}$ может быть определено по следующей формуле:

$$l_{заб} = \sqrt{\frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}} = \sqrt{\frac{70,5 + \sqrt{70,5^2 + 4 \cdot 0,002237 \cdot 3973753}}{2 \cdot 0,002237}} = 247 \text{ м}$$

Значение $l_{габ} = 247 \text{ м} < l_{2к} = 320 \text{ м}$ – следовательно, расчётные условия выбраны не верно. Выбираем режим наимизших температур, т.е. $\sigma_{-}, t_{-}, \gamma_n$.

Пересчитаем стрелу провисания для габаритного пролета:

$$f_{заб} = \frac{\gamma_n \cdot l_{заб}^2}{8 \cdot \sigma_{-}} = \frac{0,034 \cdot 247^2}{8 \cdot 135} = 1,92 \text{ м}$$

Вывод: Выполнив данные расчеты, определили габаритные пролеты в зависимости воздействия на них климатических условий. Т.к габаритные размеры не соответствуют условиям, пересчитали стрелу провисания. Это значение необходимо использовать в дальнейших вычислениях.

2.5 Выбор изоляторов, арматуры и комплектование гирлянд

Подвесные изоляторы для промежуточных опор.

Чтобы выбрать тип изолятора, необходимо найти весовой пролет линии: $l_{вес} = 1,25 \cdot l_{заб} = 1,25 \cdot 247 = 308,75 \text{ м}$

1) При наибольшей нагрузке

$$2,7 \cdot (n_{\phi} \cdot \gamma_{нб} \cdot F_{np} \cdot l_{вес} + G_z) \leq P,$$

где $n_{\phi} = 1$ – число проводов в расщепленной фазе;

$\gamma_{нб}$ – наибольшая нагрузка;

F_{np} – площадь поперечного сечения провода;

G_z – средний вес гирлянды изоляторов, в соответствии с [8, табл. 2.3]

для ЛЭП 110кВ $G_z = 400$ Н;

P – электромеханическая разрушающая нагрузка изоляторов, в соответствии с [8, табл.2.2] для ЛЭП 110кВ $P = 60\,000$ Н.

Таким образом,

$$2,7 \cdot (1 \cdot 0,072 \cdot 210 \cdot 308,75 + 400) = 13\,685 \text{ Н}$$

2) При среднеэксплуатационных условиях работы

$$5 \cdot (n_{\phi} \cdot \gamma_n \cdot F_{np} \cdot l_{вес} + G_z) \leq P$$

$$5 \cdot (1 \cdot 0,034 \cdot 210 \cdot 308,75 + 400) = 13\,023 \text{ Н}$$

3) В аварийных режимах работы:

$$2,0 \cdot \sqrt{\left[\frac{n_{\phi} \cdot \gamma_n \cdot F_{np} \cdot l_{вес}}{2} + G_z \right]^2 + [K_{pd} \cdot T_{нб}]^2} \leq P$$

$$2,0 \cdot \sqrt{\left[\frac{1 \cdot 0,034 \cdot 210 \cdot 308,75}{2} + 400 \right]^2 + [0,4 \cdot 1 \cdot 85 \cdot 210]^2} = 14\,593 \text{ Н}$$

Где $K_{pd} = 0,4$ – коэффициент редукации;

$T_{нб} = n_{\phi} \cdot \sigma \cdot F_{np}$ – тяжесть проводов, $\sigma \approx 85 \text{ Н/м}^2$ – соответствует весовому пролёту, определяется по рисунку 1.

Сравнив три варианта значений, можно сделать вывод о том, что выбор изоляторов следует производить по аварийному режиму работы.

Согласно [7, табл.1.70] выбираем изоляторы стеклянные подвесные тарельчатые типа ПС70Е, с параметрами, представленными в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры изолятора

Параметр		
Механическая разрушающая сила	кН	70
Диаметр тарелки, D	мм	255
Строительная высота, Н	мм	146
Длина пути утечки	мм	303
Масса	кг	3,4

Для определения количества изоляторов в гирлянде определим длину пути утечки. Длина пути утечки L (см) изоляторов и изоляционных конструкций должна определяться по формуле [2, п.1.9.9]

$$L = \lambda_3 U K$$

где $\lambda_3 = 1,5$ - удельная эффективная длина пути утечки, см/кВ [9];

$U = 126$ кВ - наибольшее рабочее междуфазное напряжение (ГОСТ 721-77);

$K = 1,1$ - коэффициент эффективности [2, табл.1.9.20]

$$L = 1,5 \cdot 126 \cdot 1,1 = 207,9 \text{ см}$$

Количество подвесных тарельчатых изоляторов в поддерживающих гирляндах, а также в каждой гирлянде специальной конструкции (ν , Λ , Y , λ и др.), составленной из изоляторов одного типа (в одной последовательной ветви), ВЛ на металлических, железобетонных и деревянных опорах с заземленными креплениями гирлянд определяется по формуле [2, п.1.9.12]:

$$m = \frac{L}{L_{II}} = \frac{207,9}{30,3} = 6,8 \approx 7 \text{ шт.},$$

где L_{II} - длина пути утечки одного изолятора, см;

Тогда длина и вес поддерживающей гирлянды составят:

$$\Lambda_n = m \cdot H = 7 \cdot 0,146 = 1,022 \text{ м}$$

$$G_{grp} = m \cdot m_u = 7 \cdot 3,50 = 24,5 \text{ кг}$$

Чертеж изолятора представлен в Приложении Д.

Натяжные изоляторы для анкерных опор.

Нормативные нагрузки, приложенные к натяжным гирляндам анкерных опор, находятся для 2-х условий:

1) При наибольшей нагрузке

$$2,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma_{нб} \cdot F_{нр} \cdot l_{вес}}{2} + G_2\right)^2 + (\sigma_{нб} \cdot F_{нр})^2} \leq P$$

$$2,5 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,072 \cdot 210 \cdot 308,75}{2} + 400\right)^2 + (135 \cdot 210)^2} = 71\,204 \text{ Н}$$

2) При среднеэксплуатационных условиях работы

$$6 \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma_n \cdot F_{нр} \cdot l_{вес}}{2} + G_2\right)^2 + (\sigma_{сз} \cdot F_{нр})^2} \leq P,$$

$\sigma_{сз} = 80$ - напряжение в проводе, которое определяется по графику для

$l_{вес}$.

$$6 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,034 \cdot 210 \cdot 308,75}{2} + 400\right)^2 + (80 \cdot 210)^2} = 101\,202 \text{ Н}$$

Сравнив два варианта значений, можно сделать вывод о том, что выбор изоляторов следует производить по режиму среднеэксплуатационных условий.

Согласно [6, табл. 1.65] изоляторы стеклянные тарельчатого типа: ПС – 120Б, с параметрами, представленными в таблице 9.

Таблица 9 – Параметры изолятора ПСВ – 120Б

Механическая разрушающая сила	кН	120
Диаметр тарелки D	мм	255
Строительная высота H	мм	147
Длина пути утечки	мм	320
Масса	кг	3,9

Для определения количества изоляторов в гирлянде определим длину пути утечки.

$$L = \lambda_3 U K$$

где $\lambda_3 = 1,5$ - удельная эффективная длина пути утечки, см/кВ [9];

$U = 525$ кВ - наибольшее рабочее междуфазное напряжение (ГОСТ 721-77);

$K = 1,15$ - коэффициент эффективности [5, табл.1.9.20]

$$L = 1,5 \cdot 126 \cdot 1,15 = 217,35 \text{ см}$$

Количество изоляторов:

$$m = \frac{L}{L_{II}} = \frac{217,35}{32} = 6,79 \approx 7 \text{ шт.},$$

где L_{II} - длина пути утечки одного изолятора, см;

Тогда длина и вес натяжной гирлянды составят:

$$L_{ан} = m \cdot H = 7 \cdot 0,147 = 1,029 \text{ м}$$

$$G_{зан} = m \cdot m_u = 7 \cdot 3,9 = 27,3 \text{ кг}$$

Чертеж натяжной гирлянды представлен в Приложении Е.

2.6 Расстановка опор по профилю трассы

При выборе трассы необходимо учесть следующие правила:

- 1) Габариты не должны быть меньше, чем принятые в ПУЭ
- 2) Нагрузка на опоры не должна превышать значения, принятые для

опор соответствующих типов.

Шаблон строится на основании ординат кривой максимального провисания.

Выше был сделан вывод о том, что наибольшее провисание провода имеет место при t_+ . Следовательно, в формулу для расчета коэффициента шаблона подставим значения γ_n .

Исходные условия: γ_n, σ_-, t ; Искомые величины: $\gamma_n, \sigma_{габ}, t_{с2}$.

$$\sigma_{габ} - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_{габ}^2}{24 \sigma_{габ}^2} = \sigma_- - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_{габ}^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha E (t_{с2} - t_-)$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$\sigma_{габ} - \frac{0,034^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot 247^2}{24 \cdot \sigma_{габ}^2} = 135 - \frac{0,034^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot 247^2}{24 \cdot 135^2} - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-1,5 - (-54))$$

$$\sigma_{габ} - \frac{242434,5}{\sigma_{габ}^2} = 35,94$$

Приведем к общему знаменателю:

$$\sigma_{габ}^3 - 35,94 \cdot \sigma_{габ}^2 - 242434,5 = 0$$

Решим данное уравнение методом Ньютона:

$$\sigma_{габ}^{\kappa+1} = \frac{(\sigma_{габ}^{\kappa})^2 \cdot (2 \cdot \sigma_{габ}^{\kappa} - 35,94) - 242434,5}{\sigma_{габ}^{\kappa} \cdot (3 \cdot \sigma_{габ}^{\kappa} - 2 \cdot 35,94)}$$

Первое приближение $\sigma_{габ} = \sigma_{нб} = 135 \text{ Н/мм}^2$.

В результате получаем $\sigma_{габ} = 89,46 \text{ Н/мм}^2$

Для расстановки опор с помощью шаблона, построим 3 кривых:

1-ая – кривая максимального провисания провода, строится по уравнению:

$$y = \frac{\gamma \cdot x^2}{2 \cdot \sigma} = \frac{\gamma \cdot 10^4}{2 \cdot \sigma_{габ}} \cdot \left(\frac{x}{100}\right)^2 = K_{III} \cdot \left(\frac{x}{100}\right)^2,$$

где γ – удельная механическая нагрузка, при которой имеет место наибольшее провисание провода (γ_n);

σ – напряжение, соответствующее габаритному пролету;

x – значение длины габаритного пролета от $(0 \div 0,75)l_{габ}$.

$$y = \frac{0,034 \cdot 10^4}{2 \cdot 89,46} \cdot \left(\frac{x}{100}\right)^2 = 1,9 \cdot \left(\frac{x}{100}\right)^2$$

2-ая – габаритная кривая (служит для проверки габаритов от низшей точки кривой провисания провода до земли и инженерных сооружений)

$$h_{габ} = \Gamma + (0,3 \div 0,5),$$

Γ – допустимый габарит, принимаем $\Gamma = 7 + 0,3 = 7,3$ [2, табл.2.5.22].

3-ая – земляная кривая; сдвиг от 1-ой кривой на расстояние, равное высоте подвеса провода на опорах.

$$h_0 = H_{тр}^{нжс} - \Lambda,$$

где $H_{тр}^{нжс}$ - расстояние от земли до нижней траверсы опоры;

Λ - длина гирлянды изоляторов.

$$h_0 = 19,0 - 1,17 \approx 17,83 \text{ м}$$

Результаты расчетов представим в виде таблице 10. На шаблоне указываем значения габаритного пролета.

Таблица 10 – Результаты расчетов для построения шаблона.

X,м	Y ₁	Y ₂	Y ₃
0	0	-7,30	-17,83
50	0,48	-6,83	-17,36
100	1,90	-5,40	-15,93
150	4,28	-3,03	-13,56
200	7,60	0,30	-10,23
250	11,88	3,58	-5,96
300	17,10	8,80	-0,73

Полученный в результате расчетов шаблон для расстановки опор по профилю трассы представлен на рисунке 2.

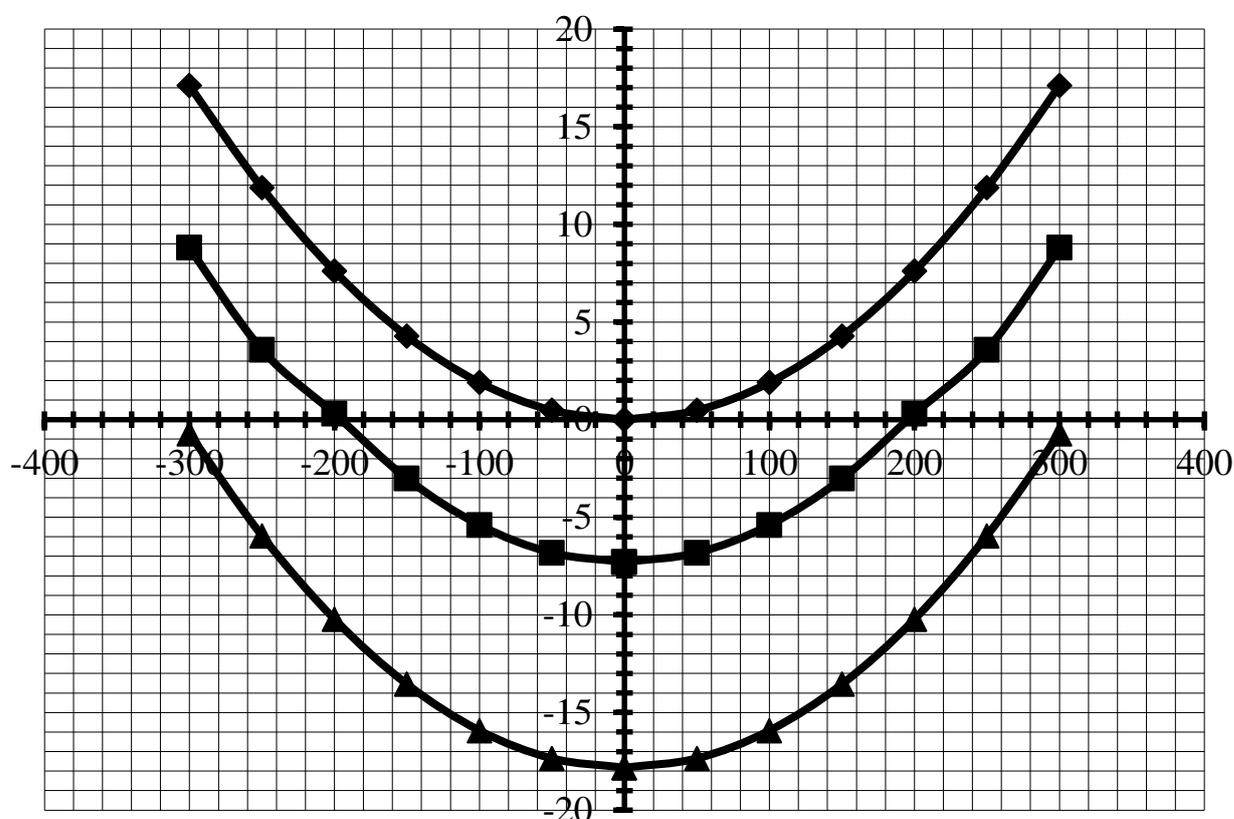


Рисунок 2 – Шаблон для расстановки опор по профилю трассы

Расстановка опор по профилю трассы производится в следующем порядке: шаблон накладывается на профиль трассы так, чтобы кривая 3 пересекала профиль в месте установки первой анкерной опоры, а кривая 2 касалась его. При этом ось y должна находиться в вертикальном положении. Тогда другая точка пересечения кривой с профилем будет соответствовать месту установки первой промежуточной опоры. При таком положении

Выбираем опоры с шифром У110-2д + 5 с высотой расположения нижней траверсы 15,5 м, полной высотой 29,6 м. Чертёж опоры представлен в Приложении Г.

Высота опоры линии связи – 7 м.

Высота щебенчатого покрытия железнодорожного полотна – 0,6 м.

Высота опоры контактной сети – 6 м.

Наименьшее расстояние по горизонтали от основания опоры до линии должно быть не менее высоты опоры плюс 3 м, т.е. 33 м. Так как местность имеет равнинный характер, то нет разницы, с какой стороны устанавливаем первую опору. Устанавливаем первую опору слева от железнодорожного пути. Положение второй опоры определяем расчетом.

Принимаем расстояния по горизонтали от вертикальной оси левой опоры:

- до левой опоры линии связи – 33 м;
- до левой полосы железнодорожного полотна – $33+3=36$ м;
- до правой полосы железнодорожного полотна – $36+6=42$ м;
- до правой опоры линии связи – $42+3=45$ м.

Начало системы координат совмещается с точкой крепления нижнего провода на левой анкерной опоре и будет располагаться на высоте 15,5 м.

Допущение: длина пролёта пересечения больше, чем $l_{2к}$, следовательно, климатические условия – гололёдные, т.е.

$$\gamma_{н\bar{o}} = 0,072 \left(H / м \cdot мм^2 \right); \quad \sigma_{н\bar{o}} = 135 \left(H / мм^2 \right); \quad t_2 = -5^\circ C.$$

Наибольшее провисание провода имеет место при нагрузке провода собственной массой: $\gamma_n = 0,034 \left(H / м \cdot мм^2 \right)$.

Для ВЛ, пересекающей несколько инженерных сооружений, следует выполнить проверку габаритов при нагрузке проводов собственной массой и допустимой температурой $t_{дон} = 70^\circ C$.

Исходные условия – возникновение наибольшей механической удельной нагрузки.

Искомые условия – среднеэксплуатационные, тогда уравнение состояния примет вид:

$$\sigma_{сэ1} - \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{сэ}^2} = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{сэ} - t_2),$$

Сводим к неполному кубическому

$$\sigma_{сэ}^3 - A \cdot \sigma_{сэ}^2 - B = 0,$$

$$\text{где } A = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{сэ} - t_2); \quad B = \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24}.$$

Уравнение состояния:

$$\begin{aligned} A &= \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{сэ} - t_2) = \\ &= 135 - \frac{0,072^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot l_i^2}{24 \cdot 135^2} - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot (-5 - 70) = 253,8 - 0,000978 \cdot l^2 \end{aligned}$$

$$B = \frac{\gamma_n^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24} = \frac{0,034^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4 \cdot l_i^2}{24} = 3,974 \cdot l^2$$

Определим значение среднеэксплуатационного механического напряжения, решив неполное кубическое уравнение методом Ньютона:

$$\sigma_{к+1} = \sigma_k - \frac{\sigma_k^3 - A \cdot \sigma_k^2 - B}{3 \cdot \sigma_k^2 - 2 \cdot A \cdot \sigma_k} = \frac{\sigma_k^2 \cdot (2 \cdot \sigma_k - A) - B}{\sigma_k \cdot (3 \cdot \sigma_k - 2 \cdot A)}$$

Рассчитанные значения механического напряжения при длинах пролетов от 100 м до 300 м представлены в таблице 11.

$$\sigma_{сэ} \approx \sigma_{70} = 63,75$$

Таблица 11 – Значения механических напряжений в зависимости от длины пролёта

l, м	A	B	σ_0 , Н/мм ²	σ_1 , Н/мм ²	σ_2 , Н/мм ²	σ_3 , Н/мм ²	σ_4 , Н/мм ²	σ_5 , Н/мм ²	σ_6 , Н/мм ²	σ_7 , Н/мм ²	σ_8 , Н/мм ²
0	253.8	0	63.7	25.44	11.97	5.833	2.882	1.433	0.714	0.357	0.178
25	253.189	2483.5	0.178	27.64	13.13	6.786	4.099	3.259	3.153	3.152	3.152
50	251.356	9934.3	3.152	7.956	6.52	6.37	6.368	6.368	6.368	6.368	6.368
75	248.3	22352.	6.368	10.49	9.708	9.679	9.678	9.678	9.678	9.678	9.678
100	244.022	39737.	9.678	13.68	13.13	13.11	13.11	13.11	13.11	13.11	13.11

125	238.522	62089	13.11	17.17	16.77	16.73	16.73	16.73	16.73	16.73	16.73
150	231.8	89409	16.73	20.95	20.58	20.57	20.57	20.57	20.57	20.57	20.57
175	223.856	121696	20.57	25.06	24.73	24.72	24.72	24.72	24.72	24.72	24.72
200	214.689	158950	24.72	29.60	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28
225	204.3	201171	29.28	34.72	34.42	34.41	34.41	34.41	34.41	34.41	34.41
250	192.689	248359	34.41	40.68	40.38	40.38	40.38	40.38	40.38	40.38	40.38
275	179.856	300514	40.38	47.96	47.68	47.68	47.68	47.68	47.68	47.68	47.68
300	165.8	357637	47.68	57.59	57.45	57.45	57.45	57.45	57.45	57.45	57.45

Ординаты кривой провисания провода для точек на оси абсцисс, соответствующие левой и правой бровки земляного полотна:

$$y = \frac{\gamma \cdot x}{2 \cdot \sigma} \cdot (l - x)$$

Таблица 12 – Ординаты кривой провисания

L,м	x1= 33м	x2 =36м	x3= 42м	x4 =45м	x5= L/2
0	0,00	-0,73	-1,00	-1,14	0,00
50	0,32	0,28	0,19	0,13	0,35
100	1,25	1,30	1,38	1,40	1,41
150	2,18	2,32	2,56	2,67	3,18
200	3,11	3,33	3,75	3,94	5,65
250	4,04	4,35	4,93	5,21	8,82
300	4,98	5,37	6,12	6,48	12,71
350	5,91	6,38	7,31	7,75	17,29
400	6,84	7,40	8,49	9,02	22,59

Проверка запасов в габаритах, согласно ПУЭ.

$$Y_1 = Y_4 = 15.5 - (y_1 + 7 + 0.6), Y_2 = Y_3 = 15.5 - (y_1 + 6 + 0.6), Y_5 = 15.5 - (y_5 + 6)$$

Таблица 13 – Ординаты кривой провисания

L,м	y1	y2	y3	y4	y5
50	8,12	8,62	8,71	8,31	9,15
100	7,19	7,60	7,52	7,04	8,09
150	6,26	6,58	6,34	5,77	6,32
200	5,33	5,57	5,15	4,50	3,85
250	4,40	4,55	3,97	3,23	0,68
300	3,46	3,53	2,78	1,96	-3,21
350	2,53	2,52	1,59	0,69	-7,79
400	1,60	1,50	0,41	-0,58	-13,09

Из последней таблицы видно, что искомая длина пролета находится в пределах от 250 до 300 м. Выбор длины диктуется запасом в габаритах над серединой пролета.

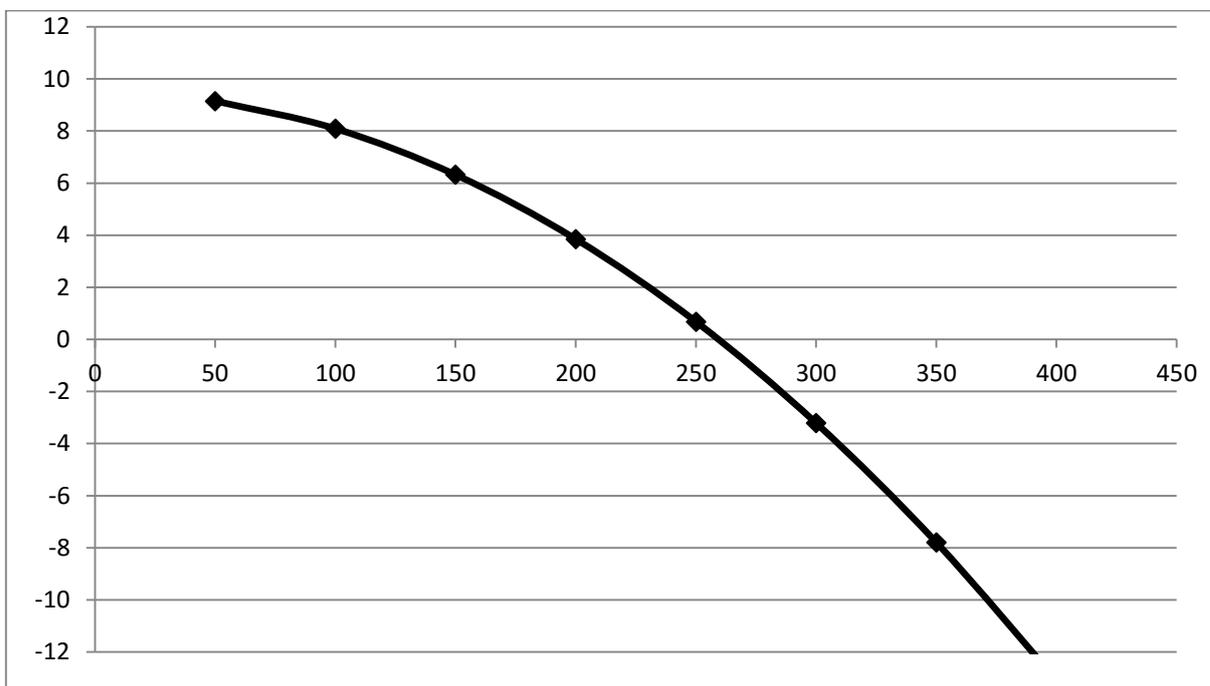


Рисунок 4 – Зависимость величины запаса от длины пролета

По графику (рисунок 4) видно, что длина анкерного пролета $l_{ан} \approx 260 м$.

2.8 Расчёт грозозащитного троса, подвешенного на промежуточных опорах

Грозозащитный трос марки ГТК-20-0/120-14,2/142, установленный на опоре типа П110-6В, имеет высоту от границы верхней траверсы до вершины тросостойки $H_{тс} = 4 м$.

Технические данные выбранного троса представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Технические данные троса марки ГТК-20

Параметры	ГТК-20
Действительная площадь поперечного сечения, мм ²	117,9
Вес ГТК, кг/км	807
Диаметр троса, мм	14,2

Высота изолятора, зажима и узла крепления троса $\lambda_T = 0,397 м$.

высота гирлянды на промежуточной опоре $\lambda_{п} = 1,274 м$;

интенсивность ветра: $W_0 = 500$ Па;

интенсивность гололеда: $b_{\text{э}} = 15$ мм;

габаритное расстояние $l_{\text{заб}} = 247$ м;

стрела провеса провода $f_n = 1,92$ м

$$\alpha_{\text{т}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

$$E_{\text{т}} = 18,5 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$$

$$t_{\text{ст}} = -1,5^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{т}} = -5^{\circ}\text{C};$$

$$t_{-} = -54^{\circ}\text{C};$$

$$t_{+} = 36^{\circ}\text{C}.$$

Трос рассчитывается при температуре атмосферных перенапряжений $t_a = 15^{\circ}\text{C}$.

$$\sigma_{\text{тнб}} = \sigma_{\text{т-}} = 600 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{э(т)}} = 420 \text{ Н/мм}^2$$

Максимальный защитный угол проводов верхней траверсы:

$$\alpha_{\text{нб}} = \arctg \frac{D_{\text{э}}}{H_{\text{мс}} + \lambda_n - \lambda_m} = \arctg \frac{4,2}{4 + 1,274 - 0,397} \approx 45,2^{\circ}$$

$D_{\text{э}}$ - длина верхней траверсы опоры: $D_{\text{э}} = 4,2$ (см.рис. опоры).

Требования ПУЭ не выполняются [2, п.2.5.120]. Требуется увеличить высоту тросостойки до 7,5м:

$$\alpha_{\text{нб}} = \arctg \frac{D_{\text{э}}}{H_{\text{мс}} + \lambda_n - \lambda_m} = \arctg \frac{4,2}{7,5 + 1,274 - 0,397} = 28,5^{\circ}$$

Требования ПУЭ выполняются.

Определение натяжения троса.

1) Нагрузка от собственного веса троса:

$$\gamma_{\text{т}} = \frac{M_{\text{т}} \cdot g \cdot 10^{-3}}{F_{\text{т}}} = \frac{807 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}}{117,9} = \frac{7,91}{117,9} = 0,067 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

2) Временно действующая нагрузка от массы гололедных отложений:

$$P_{zm}^H = \pi \cdot K_d \cdot b_s \cdot (d_m + K_d \cdot b_s) \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3,14 \cdot 0,9 \cdot 15 \cdot (14,2 + 0,9 \cdot 15) \cdot 0,9 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 10,35 \text{ Н/м}$$

$$P_{zm} = P_{zm}^H \cdot \gamma_{mz} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d = 10,35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,5 = 5,69 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{zm} = \frac{P_{zm}}{F_m} = \frac{5,69}{117,9} = 0,048 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

3) Суммарная вертикальная нагрузка от массы троса и массы гололеда:

$$\gamma_{\Sigma m1} = \gamma_m + \gamma_{zm} = 0,067 + 0,048 = 0,115 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

4) Горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос, без гололеда:

$$W_a = 0,06 \cdot W, \text{ но не менее } 50 \text{ Па. } W_a = 0,06 \cdot 500 = 30 \text{ Па} < 50 \text{ Па,}$$

принимаем

$$W_a = 50 \text{ Па; } \alpha_w = 1; k_l = 1; k_w = 0,9; C_x = 1,1$$

$$P_{Wma}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi =$$

$$= 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 14,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,499 \text{ Н/м}$$

$$P_{Wma} = P_{Wma}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 0,499 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 0,549 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wma} = \frac{P_{Wma}}{F_m} = \frac{0,549}{117,9} = 0,0047 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

5) Горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос с гололедом:

$$P_{Wmza}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot 0,25 \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi =$$

$$= 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 0,25 \cdot 500 \cdot (14,2 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 15) \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 3,949 \text{ Н/м}$$

$$P_{Wmza} = P_{Wmza}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 3,949 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4,778 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wmza} = \frac{P_{Wmza}}{F_m} = \frac{4,778}{117,9} = 0,04 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

6) Результирующая нагрузка от собственной массы троса и давления ветра

$$\gamma_{\Sigma 2та} = \sqrt{\gamma_{\tau}^2 + \gamma_{та}^2} = \sqrt{0,067^2 + 0,0047^2} = 0,067 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

7) Результирующая нагрузка от массы троса с гололедом и давления ветра.

$$\gamma_{\Sigma 3та} = \sqrt{\gamma_{\Sigma 1}^2 + \gamma_{\text{вгта}}^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,04^2} = 0,121 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

Расстояние между тросом и проводом в середине пролета должно быть не менее требуемого ПУЭ [2, табл. 2.5.16].

Расчет грозозащитного троса проводится совместно с расчетом провода. Так как ветровая нагрузка на трос без гололеда рассчитывалась для условий атмосферных перенапряжений, то и нагрузку на провод без гололеда необходимо пересчитать для этих же условий.

$$P_{\text{wna}}^H = \alpha_W \cdot k_l \cdot k_W \cdot C_x \cdot W_a \cdot F_{\Pi} \cdot \sin \varphi = 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 18,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,66 \text{ Н / м}$$

$$P_{\text{wna}} = P_{\text{wna}}^H \cdot \gamma_{\text{nw}} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$$

$$P_{\text{wna}} = 1 = 0,66 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,3 = 0,94 \text{ Н / м}$$

$$\gamma_{\text{wna}} = \frac{P_{\text{wna}}}{F_{\Pi}} = \frac{0,94}{210} = 0,004 \text{ Н / м} \cdot \text{мм}^2$$

Тогда:

$$P_{\Sigma 2на} = \sqrt{P_{\Pi}^2 + P_{\text{wna}}^2} = \sqrt{7,134^2 + 0,94^2} = 7,19 \text{ Н / м}$$

$$\gamma_{\Sigma 2па} = \frac{P_{\Sigma 2на}}{F_{\Pi}} = \frac{7,19}{210} = 0,034 \text{ Н / м} \cdot \text{мм}^2$$

Угол отклонения провода от вертикальной плоскости:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\gamma_{\text{wna}}}{\gamma_{\Sigma 2на}}\right) = \arctg\left(\frac{0,004}{0,034}\right) = 6,71^{\circ}$$

Стрела провисания провода при t_a :

$$l_{\text{np}} = 0,9 \cdot l_{\text{заб}} = 0,9 \cdot 247 = 223 \text{ м}$$

Уравнение состояния в комбинированной форме:

$$f_{\text{на}}^3 + 0,375 \cdot \left(\frac{A \cdot l_{\text{np}}^2}{E}\right) \cdot f_{\text{на}} - \frac{3}{64} \cdot \frac{\gamma_{\Sigma 2на} \cdot l_{\text{np}}^4}{E} = 0, \text{ где}$$

$$A = \sigma_- - \frac{\gamma_n^2 \cdot l_{\text{np}}^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_-^2} + \alpha E (t_a - t_-) =$$

$$= 135 - \frac{0,034^2 \cdot 223^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4}{24 \cdot 135^2} + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 (15 - 54) = 62,38$$

$$D = 0,375 \cdot \left(\frac{A \cdot l_{\text{np}}^2}{E}\right) = 0,375 \cdot \left(\frac{62,38 \cdot 223^2}{8,25 \cdot 10^4}\right) = 14,1$$

$$F = \frac{3}{64} \cdot \frac{\gamma_{\Sigma 2na} \cdot l_{np}^4}{E} = \frac{3}{64} \cdot \frac{0,034 \cdot 223^4}{8,25 \cdot 10^4} = 47,77$$

Уравнение примет вид:

$$f_{na}^3 + 14,1 \cdot f_{na} - 47,77 = 0$$

В первом приближении $f_{заб} = 1,92 м$

$$f_{k+1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{f_k^3 + F/2}{f_k^2 + D/3}$$

Итог: $f_{na} = 2,403 м$

Напряжение в низшей точке провода для атмосферных перенапряжений:

$$\sigma_{na} = \frac{\gamma_{\Sigma 2na} \cdot l_{np}^2}{8 \cdot f_{na}} = \frac{0,034 \cdot 223^2}{8 \cdot 2,403} = 87,95 \text{ Н / мм}^2$$

Максимальная длина пролёта может достигать l_{max} :

$$l_{max} = 1,25 \cdot l_{заб} = 1,25 \cdot 247 = 308,75 \text{ м.}$$

Максимальная стрела провеса:

$$f_{na \text{ max}} = f_{na} \cdot \left(\frac{l_{max}}{l_{np}} \right)^2 = 2,403 \cdot \left(\frac{308,75}{223} \right)^2 = 4,61 \text{ м}$$

Вертикальная проекция максимальной стрелы провисания:

$$f_{na \text{ max}}^B = f_{na \text{ max}} \cdot \cos \beta = 4,61 \cdot \cos 6,71^\circ = 4,58 \text{ м}$$

Расстояние между проводом и тросом в середине пролёта Z_m можно определить по эмпирической формуле:

$$Z_m = 4 + 0,015(l_{max} - 200) = 4 + 0,015(308,75 - 200) = 5,6 \text{ м}$$

Стрела провисания троса:

$$f_{ma \text{ max}} = f_{na}^B + \lambda_n + H_{mc} - \lambda_m - Z_m = 4,58 + 1,274 + 7,5 - 0,397 - 5,6 = 7,37 \text{ м}$$

По условию исключения прорыва тросовой защиты грозowymi разрядами разность между f_n и f_{ma} должна составлять 1,2 м.

$$f_{na}^B - f_{ma \text{ max}} = 1,2$$

$$f_{ma \max} = f_{na}^B - 1,2 = 4,58 - 1,2 = 3,38 \text{ м}$$

$$Z_m = (f_{na}^B - f_{ma \max}) + \lambda_n + H_{mc} - \lambda_m = 1,2 + 1,274 + 7,5 - 0,397 = 9,577 \text{ м}$$

Проверка защитного угла троса в середине пролёта:

$$\alpha_{cp} = \arctg \frac{D_6}{Z_m} = \arctg \frac{4,2}{9,577} = 23,31^\circ < 28,5^\circ,$$

что и требуется для эффективной защиты проводов на опоре.

Напряжение в тросе, которое обеспечивает получение $f_{ma} = 3,38$ м в условиях атмосферных перенапряжений. Напряжение в тросе вычисляется для приведенного пролета ($l_{пр} = 223$ м).

$$f_{ma} = f_{ma \max} \cdot \left(\frac{l_{пр}}{l_{\max}} \right)^2 = 3,38 \cdot \left(\frac{223}{308,75} \right)^2 = 1,76 \text{ м}$$

$$\sigma_{ma} = \frac{\gamma_{\Sigma 2ma} \cdot l_{пр}^2}{8 \cdot f_{ma}} = \frac{0,067 \cdot 223^2}{8 \cdot 1,76} = 237 \text{ Н/мм}^2,$$

что не превышает допустимого значения 600 Н/мм².

2.9 Расчёт грозозащитного троса, подвешенного на анкерных опорах

Грозозащитный трос марки ГТК-20-0/120-14,2/142, установленный на опоре типа У110-2+5, имеет высоту от границы верхней траверсы до вершины тросостойки $H_{тс} = 6,2$ м.

Технические данные выбранного троса представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Технические данные троса марки ТК-11

Параметры	ГТК-20
Действительная площадь поперечного сечения, мм ²	117,9
Масса смазанного каната, кг/км	807
Диаметр троса, мм	14,2

Высота изолятора, зажима и узла крепления троса $\lambda_{т} = 0,5$ м
(Приложение В)

высота гирлянды на анкерной опоре $\lambda_{п} = 1,559$ м;

интенсивность ветра: $W_0 = 500$ Па;

интенсивность гололеда: $b_{\text{Э}} = 15 \text{ мм}$;

габаритное расстояние $l_{\text{габ}} = 247 \text{ м}$;

стрела провеса провода $f_n = 1,92 \text{ м}$

$$\alpha_{\text{T}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$$

$$E_{\text{T}} = 18,5 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$$

$$t_{\text{сг}} = -1,5^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{г}} = -5^{\circ}\text{C};$$

$$t_{-} = -54^{\circ}\text{C};$$

$$t_{+} = 36^{\circ}\text{C}.$$

Трос рассчитывается при температуре атмосферных перенапряжений $t_{\text{а}} = 15^{\circ}\text{C}$.

$$\sigma_{\text{тнб}} = \sigma_{\text{T-}} = 600 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{\text{Э(T)}} = 420 \text{ Н/мм}^2$$

Максимальный защитный угол проводов верхней траверсы:

$$\alpha_{\text{нс}} = \arctg \frac{D_{\text{с}}}{H_{\text{мс}} + \lambda_n - \lambda_m} = \arctg \frac{7}{6,2 + 1,559 - 0,5} = 48,8^{\circ}$$

$D_{\text{с}}$ - длина верхней траверсы опоры: $D_{\text{с}} = 7$ (см.рис. опоры).

Требования ПУЭ не выполняются [4, п.2.5.120]. Требуется увеличить высоту тросостойки до 13 м:

$$\alpha_{\text{нс}} = \arctg \frac{D_{\text{с}}}{H_{\text{мс}} + \lambda_n - \lambda_m} = \arctg \frac{7}{13 + 1,559 - 0,5} = 28,85^{\circ}$$

Требования ПУЭ выполняются.

Определение натяжения троса.

8) Нагрузка от собственного веса троса:

$$\gamma_{\text{T}} = \frac{M_{\text{T}} \cdot g \cdot 10^{-3}}{F_{\text{T}}} = \frac{807 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}}{117,9} = \frac{9,908}{117,9} = 0,067 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

9) Временно действующая нагрузка от массы гололедных отложений:

$$P_{zm}^H = \pi \cdot K_d \cdot b_s \cdot (d_m + K_d \cdot b_s) \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3} =$$

$$= 3,14 \cdot 0,9 \cdot 15 \cdot (14,2 + 0,9 \cdot 15) \cdot 0,9 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 10,35 \text{ Н/м}$$

$$P_{zm} = P_{zm}^H \cdot \gamma_{mz} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d = 10,35 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,5 = 6,262 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{zm} = \frac{P_{zm}}{F_m} = \frac{6,262}{117,9} = 0,053 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

10) Суммарная вертикальная нагрузка от массы троса и массы гололеда:

$$\gamma_{\Sigma m1} = \gamma_m + \gamma_{zm} = 0,067 + 0,053 = 0,120 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

11) Горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос, без гололеда:

$$W_a = 0,06 \cdot W, \text{ но не менее } 50 \text{ Па. } W_a = 0,06 \cdot 500 = 30 \text{ Па} < 50 \text{ Па,}$$

принимаем

$$W_a = 50 \text{ Па; } \alpha_w = 1; k_l = 1; k_w = 0,9; C_x = 1,2$$

$$P_{Wma}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi =$$

$$= 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot 14,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,544 \text{ Н/м}$$

$$P_{Wma} = P_{Wma}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 0,544 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 0,658 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wma} = \frac{P_{Wma}}{F_m} = \frac{0,658}{117,9} = 0,0056 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

12) Горизонтальная нагрузка от давления ветра на трос с гололедом:

$$P_{Wmza}^H = \alpha_w \cdot K_L \cdot K_w \cdot C_x \cdot 0,25 \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi =$$

$$= 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,2 \cdot 0,25 \cdot 500 \cdot (14,2 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 15) \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 3,949 \text{ Н/м}$$

$$P_{Wmza} = P_{Wmza}^H \cdot \gamma_{mw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f = 3,949 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4,778 \text{ Н/м}$$

$$\gamma_{Wmza} = \frac{P_{Wmza}}{F_m} = \frac{4,778}{117,9} = 0,04 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

13) Результирующая нагрузка от собственной массы троса и давления ветра

$$\gamma_{\Sigma 2та} = \sqrt{\gamma_{\tau}^2 + \gamma_{\tauга}^2} = \sqrt{0,067^2 + 0,0056^2} = 0,067 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

14) Результирующая нагрузка от массы троса с гололедом и давления ветра.

$$\gamma_{\Sigma 3ra} = \sqrt{\gamma_{\Sigma 1}^2 + \gamma_{wtra}^2} = \sqrt{0,120^2 + 0,04^2} = 0,126 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$$

Расстояние между тросом и проводом в середине пролета должно быть не менее требуемого ПУЭ [2, табл. 2.5.16].

Расчет грозозащитного троса проводится совместно с расчетом провода. Так как ветровая нагрузка на трос без гололеда рассчитывалась для условий атмосферных перенапряжений, то и нагрузку на провод без гололеда необходимо пересчитать для этих же условий.

$$P_{wna}^H = \alpha_W \cdot k_l \cdot k_W \cdot C_x \cdot W_a \cdot F_{\Pi} \cdot \sin \varphi = 0,71 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 18,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,66 \text{ Н / м}$$

$$P_{wna} = P_{wna}^H \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$$

$$P_{wna} = 0,66 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,3 = 0,94 \text{ Н / м}$$

$$\gamma_{wna} = \frac{P_{wna}}{F_{\Pi}} = \frac{0,94}{210} = 0,004 \text{ Н / м} \cdot \text{мм}^2$$

Тогда:

$$P_{\Sigma 2na} = \sqrt{P_{\Pi}^2 + P_{wna}^2} = \sqrt{7,134^2 + 0,94^2} = 7,19 \text{ Н / м}$$

$$\gamma_{\Sigma 2na} = \frac{P_{\Sigma 2na}}{F_{\Pi}} = \frac{7,19}{210} = 0,034 \text{ Н / м} \cdot \text{мм}^2$$

Угол отклонения провода от вертикальной плоскости:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\gamma_{wna}}{\gamma_{\Sigma 2na}}\right) = \arctg\left(\frac{0,004}{0,034}\right) = 6,7^{\circ}$$

Стрела провисания провода при t_a :

$$l_{np} = 0,9 \cdot l_{\text{заб}} = 0,9 \cdot 247 = 223 \text{ м}$$

Уравнение состояния в комбинированной форме:

$$f_{na}^3 + 0,375 \cdot \left(\frac{A \cdot l_{np}^2}{E}\right) \cdot f_{na} - \frac{3}{64} \cdot \frac{\gamma_{\Sigma 2na} \cdot l_{np}^4}{E} = 0,$$

где

$$A = \sigma_- - \frac{\gamma_n^2 \cdot l_{np}^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_-^2} + \alpha E(t_a - t_-) =$$

$$= 135 - \frac{0,034^2 \cdot 223^2 \cdot 8,25 \cdot 10^4}{24 \cdot 135^2} + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^4 (15 - 54) = 62,38$$

$$D = 0,375 \cdot \left(\frac{A \cdot l_{np}^2}{E} \right) = 0,375 \cdot \left(\frac{62,38 \cdot 223^2}{8,25 \cdot 10^4} \right) = 14,1$$

$$F = \frac{3}{64} \cdot \frac{\gamma_{\Sigma 2na} \cdot l_{np}^4}{E} = \frac{3}{64} \cdot \frac{0,034 \cdot 223^4}{8,25 \cdot 10^4} = 47,77$$

Уравнение примет вид:

$$f_{na}^3 + 14,1 \cdot f_{na} - 47,77 = 0$$

В первом приближении $f_{габ} = 1,92$ м

$$f_{k+1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{f_k^3 + F/2}{f_k^2 + D/3}$$

Итог: $f_{na} = 2,403$ м

Напряжение в низшей точке провода для атмосферных перенапряжений:

$$\sigma_{na} = \frac{\gamma_{\Sigma 2na} \cdot l_{np}^2}{8 \cdot f_{na}} = \frac{0,034 \cdot 223^2}{8 \cdot 2,403} = 87,95 \text{ Н / мм}^2$$

Максимальная длина пролёта может достигать l_{\max} :

$$l_{\max} = 1,25 \cdot l_{габ} = 1,25 \cdot 247 = 308,75 \text{ м.}$$

Максимальная стрела провеса:

$$f_{na \max} = f_{na} \cdot \left(\frac{l_{\max}}{l_{np}} \right)^2 = 2,403 \cdot \left(\frac{308,75}{223} \right)^2 = 4,61 \text{ м}$$

Вертикальная проекция максимальной стрелы провисания:

$$f_{na \max}^B = f_{na \max} \cdot \cos \beta = 4,61 \cdot \cos 6,71^\circ = 4,58 \text{ м}$$

Расстояние между проводом и тросом в середине пролёта Z_m можно определить по эмпирической формуле:

$$Z_m = 4 + 0,015(l_{\max} - 200) = 4 + 0,015(308,75 - 200) = 5,6 \text{ м}$$

Стрела провисания троса:

$$f_{ma \max} = f_{na}^B + \lambda_n + H_{mc} - \lambda_m - Z_m = 4,58 + 1,559 + 12 - 0,5 - 5,6 = 12,03 \text{ м}$$

По условию исключения прорыва тросовой защиты грозowymi разрядами разность между f_n и f_{ma} должна составлять 1,2 м.

$$f_{na}^B - f_{ma \max} = 1,2$$

$$f_{ma \max} = f_{na}^B - 1,2 = 4,58 - 1,2 = 3,38 \text{ м}$$

$$Z_m = (f_{na}^B - f_{ma \max}) + \lambda_n + H_{mc} - \lambda_m = 1,2 + 1,559 + 12 - 0,5 = 14,26 \text{ м}$$

Проверка защитного угла троса в середине пролёта:

$$\alpha_{cp} = \arctg \frac{D_6}{Z_m} = \arctg \frac{7}{14,6} = 26,56^\circ < 28,85^\circ,$$

что и требуется для эффективной защиты проводов на опоре.

Напряжение в тросе, которое обеспечивает получение $f_{ma} = 3,38 \text{ м}$ в условиях атмосферных перенапряжений. Напряжение в тросе вычисляется для приведенного пролета ($l_{пр} = 315 \text{ м}$).

$$f_{ma} = f_{ma \max} \cdot \left(\frac{l_{np}}{l_{\max}} \right)^2 = 3,38 \cdot \left(\frac{223}{308,75} \right)^2 = 1,76 \text{ м}$$

$$\sigma_{ma} = \frac{\gamma_{\Sigma 2ma} \cdot l_{np}^2}{8 \cdot f_{ma}} = \frac{0,067 \cdot 223^2}{8 \cdot 1,76} = 237 \text{ Н/мм}^2,$$

что не превышает допустимого значения 600 Н/мм².

2.10 Определение нагрузок на фундамент под опору

Определим нормативные и расчетные нагрузки на промежуточную П110-6В и на анкерную У110-2Д+5 стальные опоры в нормальном режиме работы ВЛ для выбора в дальнейшем фундамента под опору.

На рисунке 5 представлена схема нагрузок, действующих на промежуточную опору.

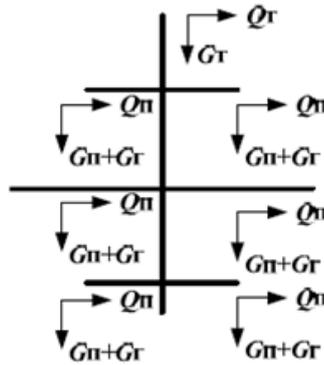


Рисунок 5 – Нагрузки, действующие на промежуточную опору

I Промежуточная опора

1) Постоянные нагрузки

а) От собственного веса опоры

$$P_{ОП} = 3\,749 \text{ кг} = 3\,749 \cdot 9,8 = 36\,740 \text{ Н} = 36,74 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

б) От собственного веса гирлянды изоляторов

$$G_{ГП} = n_{Г} \cdot G_{Г} = 6 \cdot 21 \cdot 9,8 = 1,23 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

в) От собственного веса провода на весовом пролете (с учетом двух цепей и 3-хфазной системы)

$$l_{вес} = 1,25 \cdot l_{заб} = 1,25 \cdot 247 = 309 \text{ м}$$

$$P_{П} = 2 \cdot 3 \cdot p_n \cdot 10^{-3} \cdot l_{вес} = 2 \cdot 3 \cdot 7,134 \cdot 309 = 13,22 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

г) От собственного веса троса на весовой пролет

$$P_{Т} = p_{Т} \cdot l_{вес} = 7,9 \cdot 309 = 2,44 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

Итого по постоянной нормальной нагрузке для промежуточной опоры имеем:

$$P_{пост} = P_{ОП} + G_{ГП} + P_{П} + P_{Т} = 36,74 + 1,23 + 13,22 + 2,44 = 53,63 \text{ Н} \cdot 10^3.$$

2) Кратковременные нагрузки

а) От давления ветра на провод без гололеда (под углом 90^0 к оси провода), с учетом трехфазной системы и двух цепей ВЛ:

$$P_{ВП} = 2 \cdot 3 \cdot p_{вн} \cdot l_{вес} = 2 \cdot 3 \cdot 7,268 \cdot 309 = 13,47 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

где, $p_{вн}$ – единичная горизонтальная нагрузка от давления ветра на провод, свободный от гололеда;

б) От давления ветра на трос без гололеда

$$P_{WT} = p_{WTa} \cdot l_{\text{век}} = 0,658 \cdot 309 = 0,20 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

в) От веса гололеда на провод

$$P_{ГП} = 2 \cdot 3 \cdot p_{ГП} \cdot l_{\text{век}} = 2 \cdot 3 \cdot 7,241 \cdot 309 = 13,42 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

г) От веса гололеда на трос

$$P_{ГТ} = p_{ГТа} \cdot l_{\text{век}} = 2 \cdot 4,778 \cdot 309 = 2,95 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

д) От давления ветра на конструкцию опоры

Нормативная средняя составляющая:

$$Q_C^H = k_w \cdot C_x \cdot W \cdot A,$$

где A – площадь проекции по наружному обмеру с наветренной стороны:

Ширина опоры по ее основанию – 2,8 м.

Высота опоры от основания до нижней траверсы – 19 м.

Средняя ширина ствола опоры от нижней траверсы до верхушки тросостойки – 1 м.

Размеры опоры от нижней траверсы до средней, от средней до верхней и от верхней до верхушки тросостойки – 6 + 6 + 4 м.

$$A = 2,8 \cdot 19 + 1,1 \cdot (6 + 6 + 4) = 70,8 \text{ м}^2;$$

$$k_w = 0,0 \quad W = 500 \text{ Па} \quad C_x = 1,1$$

$$Q_C^H = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 500 \cdot 70,8 = 35,05 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Нормативная пульсационная составляющая:

$$Q_{II}^H = 0,6 \cdot Q_C^H = 0,6 \cdot 35,03 = 21,03 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

Суммарная:

$$Q = (Q_C^H + Q_{II}^H) \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$$

$$\gamma_f = 1,1$$

$$Q = (35,03 + 21,03) \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 67,83 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Итого по кратковременной нормальной нагрузке:

$$P_{KP} = P_{WH} + P_{ГП} + P_{WT} + P_{ГТ} + Q = 13,47 + 13,42 + 0,20 + 2,95 + 67,83 = 97,87 \text{ Н} \cdot 10^3.$$

Суммарная нагрузка на промежуточную опору:

$$P_{ПРОМ \text{ ОП}} = P_{ПОСТ} + P_{KP} = 53,63 + 97,87 = 151,50 \text{ Н} \cdot 10^3.$$

II Анкерная опора

1) Постоянные нагрузки

а) От собственного веса опоры:

$$P_{ОП} = \frac{9,717}{3} \cdot T = 3239 \cdot 9,8 = 31,74 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

б) От собственного веса гирлянды изоляторов

$$G_{ГП} = n_{Г} \cdot G_{Г} = 6 \cdot 27,3 \cdot 9,8 = 1,61 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

в) От собственного веса провода на весовом пролете (с учетом 3-х фазной системы и двух цепей ВЛ)

$$l_{вес} = 1,25 \cdot l_{заб} = 1,25 \cdot 247 = 309 \text{ м}$$

$$P_{П} = 3 \cdot 2 \cdot p_n \cdot 10^{-3} \cdot l_{вес} = 3 \cdot 2 \cdot 7,134 \cdot 309 = 13,22 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

г) От собственного веса троса

$$P_{Т} = p_{Т} \cdot l_{вес} = 7,91 \cdot 309 = 2,44 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

д) сила от тяжения провода:

$$\Delta T_{П} = 3 \cdot 2 \cdot \sigma_{НБ} \cdot F_{П} = 3 \cdot 2 \cdot 135 \cdot 210 = 170,1 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

е) сила от тяжения троса:

$$\Delta T_{Т} = \sigma_{НБ} \cdot F_{Т} = 600 \cdot 117,9 = 70,74 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

Итого по постоянной нормальной нагрузке для промежуточной опоры имеем:

$$P_{ПОСТ} = P_{ОП} + G_{ГП} + P_{П} + P_{Т} + \Delta T_{П} + \Delta T_{Т} = 31,74 + 1,61 + 13,22 + 2,44 + 170,1 + 70,74 = 289,85 \text{ Н} \cdot 10^3$$

1) Кратковременные нагрузки

а) От давления ветра на провод без гололеда (под углом 90^0 к оси провода)

$$P_{WII} = 3 \cdot 2 \cdot p_{wn} \cdot l_{вс} = 3 \cdot 2 \cdot 7,268 \cdot 309 = 13,47 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

б) От давления ветра на трос без гололеда

$$P_{WT} = p_{WTa} \cdot l_{вс} = 0,658 \cdot 309 = 0,20 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

в) От веса гололеда на провод

$$P_{ГП} = 3 \cdot 2 \cdot p_{ГП} \cdot l_{вс} = 3 \cdot 2 \cdot 7,241 \cdot 309 = 13,42 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

г) От веса гололеда на трос

$$P_{ГТ} = p_{ГТа} \cdot l_{вс} = 4,778 \cdot 309 = 1,47 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

д) От давления ветра на конструкцию опоры

Нормативная средняя составляющая:

$$Q_C^H = k_w \cdot C_x \cdot W \cdot A,$$

где A – площадь проекции по наружному обмеру с наветренной стороны:

Ширина опоры по ее основанию – 6,3 м.

Высота опоры от основания до нижней траверсы – 15,5 м.

Средняя ширина ствола от нижней траверсы до верхушки тросостойки – 1 м.

Высота опоры от нижней траверсы до верхушки тросостойки – 14,1 м (см. чертёж опоры).

$$A = 6,3 \cdot 15,5 + 14,1 \cdot 1 = 112 \text{ м}^2;$$

$$k_w = 0,9 \quad W = 500 \text{ Па} \quad C_x = 1,1$$

$$Q_C^H = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 500 \cdot 112 = 55,4 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Нормативная пульсационная составляющая:

$$Q_{II}^H = 0,6 \cdot Q_C^H = 0,6 \cdot 55,4 = 33,26 \text{ Н} \cdot 10^3;$$

Суммарная:

$$Q = (Q_C^H + Q_{II}^H) \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$$

$$\gamma_f = 1,1$$

$$Q = (55,4 + 33,26) \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 108 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Итого по кратковременной нормальной нагрузке:

$$P_{KP} = P_{ВП} + P_{ГП} + P_{WT} + P_{ГТ} + Q = 13,47 + 13,42 + 0,20 + 1,47 + 108 = 136,56 \text{ Н} \cdot 10^3.$$

Суммарная нагрузка на анкерную опору:

$$P_{АНК \text{ ОП}} = P_{ПОСТ} + P_{KP} = 289,85 + 136,56 = 426,41 \text{ Н} \cdot 10^3.$$

2.11 Расчет железобетонного грибовидного фундамента-подножника для промежуточной опоры

Для начала рассмотрим грибовидный фундамент-подножник, марки Ф4-2 [7, табл.1.18].

Грунт представляет собой суглинок с показателем консистенции $J_L=0,18$ и коэффициентом пористости $e=0,5$.

Технические данные фундамента Ф4-2 представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Технические данные фундамента Ф4-2

Высота фундамента	Глубина заложения фундамента	Размер стороны квадрата опорной плиты	Масса фундамента
h	h_{ϕ}	a	G_{ϕ}
м	м	м	т
2,7	2,5	2,1×2,1	3,4

Исходя из характеристик грунта согласно [7, табл 2.10 и 2.11]:

- нормальное значение модуля деформации $E = 28000 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$;
- нормативное значение внутреннего сцепления $c^H = 13 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$;
- нормативное значение угла внутреннего трения $\varphi^H = 30^0$

Давление на грунт основания подножника рассчитывается из условий предельной деформации основания в нормальном режиме работы линии для $E = 28000 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$ при размере стороны квадратной опоры плиты $a = 2,1$ м и глубине заложения фундамента $h_{\phi} = 2,5$ м.

Коэффициент бокового расширения $\mu = 0,6$ (табл.2.12 [8]), коэффициент безопасности по грунту для угла внутреннего трения $K_{\Gamma} = 1,1$, а для супеси $K_{\Gamma} = 2,4$ (табл.2.13 [8]).

Угол внутреннего трения обратной засыпки:

$$\varphi_0 = \mu \frac{\varphi^H}{k_\Gamma} = 0,6 \frac{30}{1,1} = 18^\circ$$

Удельное сцепление грунта обратной засыпки:

$$c_0 = \mu \frac{c^H}{k_\Gamma} = 0,6 \frac{13}{2,4} = 3,25 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$$

$$R_s = 305 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2.$$

Для промежуточной прямой опоры, которая устанавливается в грунте - суглинок с показателем консистенции $J_L=0,18$ и с относительным заглублением $h/a = 2,7/2,1 = 1,3$, объемным весом грунта обратной засыпки при механическом уплотнении $\gamma_3 = 17 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^3$ расчетное давление $R_3 = 53 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$ (табл. 2.8 [8]).

Сжимающая нагрузка, действующая на грибовидный фундамент, равна сумме постоянных и кратковременных нормальных нагрузок, действующих на опору П110-6В и равна расчетной вырывающей нагрузке:

$$N_e^p = N_c = 151,50 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Нормативная вырывающая нагрузка равна итоговой сумме постоянных нагрузок, действующих на опору П110-6В:

$$N_e^n = 53,63 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Для прямой промежуточной опоры коэффициент надежности $k_H = 1$ [8].

I. Расчет по деформациям (на сжатие)

Основное требование расчета – ограничение вертикальной осадки. Условие – среднее давление по подошве фундамента не должно превышать расчетного давления на основание: $\sigma_{cp} \leq R_s$.

Среднее давление по подошве фундамента:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_c}{F} + \gamma_3 \cdot h_\Phi = \frac{151,5}{2,1^2} + 17 \cdot 2,5 = 77 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$$

$$\sigma_{cp} \leq R_s \text{ или } 77 < 305$$

Условие расчета по деформациям на сжатие соблюдается, и вертикальная осадка фундамента Ф4-2 находится в допустимых пределах.

II. Расчет по деформациям (на вырывание)

Определяем коэффициент условий работы:

$$m = m_{гр} \cdot m_0 \cdot m_c = 1 \cdot 1,2 \cdot 1 = 1,2$$

где $m_{гр} = 1$ – коэффициент грунта;

m_0 – коэффициент опоры, зависящий от базы опоры b ;

m_c – коэффициент сочетаний, который зависит от режима работы ВЛ (в нормальном режиме $m_c = 1$).

Вырывающая нагрузка, действующая на фундамент:

$$m \cdot R_3 \cdot F_0 + G_\phi = 1,2 \cdot 53 \cdot 2,1^2 + 3,4 \cdot 9,8 = 314 \text{ Н} \cdot 10^3$$

$$N_B^H < m \cdot R_3 \cdot F_0 + G_\phi \text{ или } 53,63 < 314$$

Фундамент марки Ф4-2 удовлетворяет условию расчета по деформациям на вырывание.

Таким образом, на основании проведенных проверок можно утверждать о правильном выборе фундамента.

III. Расчет по несущей способности.

Объем обелиска грибовидного фундамента –подножника марки Ф4-2 при $a = 2,1$ м:

$$a_1 = a + 2h_\phi \cdot \operatorname{tg} \phi_0 = 2,1 + 2 \cdot 2,5 \cdot \operatorname{tg} 18^\circ = 3,72 \text{ м}$$

$$V_\phi = \frac{h_\phi}{6} [(2a_1 + a)a_1 + (2a + a_1)a] = \frac{2,5}{6} [(2 \cdot 3,72 + 2,1) \cdot 3,72 + (2 \cdot 2,1 + 3,72) \cdot 2,1] = 21,72 \text{ м}^3$$

Сумма площадей боковых поверхностей грибовидного фундамента-подножника:

$$\Sigma \omega_\phi = 2h_\phi (a + a_1) = 2 \cdot 2,5 \cdot (2,1 + 3,72) = 29,1 \text{ м}^2$$

Проверка выполнения условия по несущей способности:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_H} (N_\phi + 0,9G_\phi \cdot 9,8) &= \frac{1}{K_H} (V_\phi \cdot \gamma_3 + C_0 \cos \phi_0 \cdot \Sigma \omega_\phi + 0,9G_\phi \cdot 9,8) = \\ &= \frac{1}{1} (21,72 \cdot 17 + 3,25 \cdot \cos 18^\circ \cdot 29,1 + 0,9 \cdot 3,4 \cdot 9,8) = 489,17 \text{ Н} \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$N_e^p < 489,17$; $53,63 < 489,17$, следовательно, выбранный фундамент удовлетворяет условию расчета по несущей способности.

2.12 Расчет железобетонного грибовидного фундамента-подножника для анкерной опоры

Для начала рассмотрим грибовидный фундамент-подножник, марки ФЗ-А5М [7, табл.1.19].

Грунт представляет собой суглинок с показателем консистенции $J_L=0,18$ и коэффициентом пористости $e=0,5$.

Технические данные фундамента представлены в таблица 17.

Таблица 17 – Технические данные фундамента ФЗ-А5М

Высота фундамента	Глубина заложения фундамента	Размер стороны квадрата опорной плиты	Масса фундамента
h	h_ϕ	a	G_ϕ
м	м	м	т
3,115	3,0	2,1×2,1	4,5

Исходя из характеристик грунта (табл 2.10 и 2.11 [8]):

- нормальное значение модуля деформации $E = 28000 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$;
- нормативное значение внутреннего сцепления $c^H = 13 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$;
- нормативное значение угла внутреннего трения $\varphi^H = 30^\circ$

Давление на грунт основания подножника рассчитывается из условий предельной деформации основания в нормальном режиме работы линии для $E = 28000 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$ при размере стороны квадратной опоры плиты $a = 2,1 \text{ м}$ и глубине заложения фундамента $h_\phi = 3,0 \text{ м}$.

Коэффициент бокового расширения $\mu = 0,6$ (табл.2.12 [8]), коэффициент безопасности по грунту для угла внутреннего трения $K_\Gamma = 1,1$, а для супеси $K_\Gamma = 2,4$ (табл.2.13 [8]).

Угол внутреннего трения обратной засыпки:

$$\varphi_0 = \mu \frac{\varphi^H}{k_\Gamma} = 0,6 \frac{30}{1,1} = 18^\circ$$

Удельное сцепление грунта обратной засыпки:

$$c_0 = \mu \frac{c^H}{k_\Gamma} = 0,6 \frac{13}{2,4} = 3,25 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$$

$$R_s = 276 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2.$$

Для анкерной прямой опоры, которая устанавливается в грунте - суглинок с показателем консистенции $J_L=0,18$ и с относительным заглублением $h/a = 3,115/2,1 = 1,5$, объемным весом грунта обратной засыпки при механическом уплотнении $\gamma_3 = 17 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^3$ расчетное давление $R_3 = 50 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$ (табл. 2.8 [8]).

Сжимающая нагрузка, действующая на грибовидный фундамент, равна сумме постоянных и кратковременных нормальных нагрузок, действующих на опору У110-2+5 и равна расчетной вырывающей нагрузке:

$$N_g^p = N_c = 426,41 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Нормативная вырывающая нагрузка равна итоговой сумме постоянных нагрузок, действующих на опору У110-2+5:

$$N_g^n = 289,85 \text{ Н} \cdot 10^3$$

Для прямой анкерной опоры коэффициент надежности $k_H = 1,3$ [8].

1 Расчет по деформациям (на сжатие)

Основное требование расчета – ограничение вертикальной осадки. Условие – среднее давление по подошве фундамента не должно превышать расчетного давления на основание: $\sigma_{\text{ср}} \leq R_s$.

Среднее давление по подошве фундамента:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{N_c}{F} + \gamma_3 \cdot h_\Phi = \frac{426,41}{2,1^2} + 17 \cdot 3,115 = 150 \text{ Н} \cdot 10^3 / \text{м}^2$$

$$\sigma_{\text{ср}} \leq R_s \text{ или } 150 < 276$$

Условие расчета по деформациям на сжатие соблюдается, и вертикальная осадка фундамента Ф3-А5М находится в допустимых пределах.

2 Расчет по деформациям (на вырывание)

Определяем коэффициент условий работы:

$$m = m_{\text{ГР}} \cdot m_0 \cdot m_{\text{С}} = 1 \cdot 1,2 \cdot 1 = 1,2$$

где $m_{\text{ГР}} = 1$ – коэффициент грунта;

m_0 – коэффициент опоры, зависящий от базы опоры b ;

$m_{\text{С}}$ – коэффициент сочетаний, который зависит от режима работы ВЛ (в нормальном режиме $m_{\text{С}} = 1$).

Вырывающая нагрузка, действующая на фундамент:

$$m \cdot R_3 \cdot F_0 + G_{\text{Ф}} = 1,2 \cdot 50 \cdot 2,1^2 + 4,5 \cdot 9,8 = 309 \text{ Н} \cdot 10^3$$

$$N_{\text{В}}^{\text{H}} < m \cdot R_3 \cdot F_0 + G_{\text{Ф}} \text{ или } 289,85 < 309$$

Фундамент марки Ф3-А5М удовлетворяет условию расчета по деформациям на вырывание.

Таким образом, на основании проведенных проверок можно утверждать о правильном выборе фундамента.

3 Расчет по несущей способности.

Объем обелиска грибовидного фундамента – подножника марки Ф3-А5М при $a = 2,1 \text{ м}$

$$a_1 = a + 2h_{\text{Ф}} \cdot \text{tg} \varphi_0 = 2,1 + 2 \cdot 3,115 \cdot \text{tg} 18^\circ = 4,12 \text{ м}$$

$$V_{\text{Ф}} = \frac{h_{\text{Ф}}}{6} [(2a_1 + a)a_1 + (2a + a_1)a] =$$

$$\frac{2,5}{6} \cdot [(2 \cdot 4,12 + 2,1) \cdot 4,12 + (2 \cdot 2,1 + 4,12) \cdot 2,1] = 25,03 \text{ м}^3$$

Сумма площадей боковых поверхностей грибовидного фундамента-подножника:

$$\Sigma \omega_{\text{Ф}} = 2h_{\text{Ф}}(a + a_1) = 2 \cdot 3,115 \cdot (2,1 + 4,12) = 38,75 \text{ м}^2$$

Проверка выполнения условия по несущей способности:

$$\frac{1}{K_{\text{Н}}} (N_{\text{Ф}} + 0,9G_{\text{Ф}} \cdot 9,8) = \frac{1}{K_{\text{Н}}} (V_{\text{Ф}} \cdot \gamma_3 + C_0 \cos \phi_0 \cdot \Sigma \omega_{\text{Ф}} + 0,9G_{\text{Ф}} \cdot 9,8) =$$

$$= \frac{1}{1} (25,03 \cdot 17 + 3,25 \cdot \cos 18^\circ \cdot 38,75 + 0,9 \cdot 4,5 \cdot 9,8) = 585 \text{ Н} \cdot 10^3$$

$N_{\text{е}}^{\text{п}} < 585$: $289,85 < 585$, следовательно, выбранный фундамент удовлетворяет условию расчета по несущей способности.

2.13 Результаты проведенных расчетов

В процессе выполнения данной работы был произведен механический расчет воздушной линии электропередачи 110 кВ. Получены следующие результаты.

ВЛ 110кВ «Чажемто - Колпашево».

На унифицированных свободностоящих стальных опорах типа П110-6В и У110 –2Д+5 будут смонтированы провода марки АС-185/29.

По результатам расчета удельных механических нагрузок получили, что наибольшая нагрузка – действующая от массы провода с гололедом при давлении ветра, т.е. $\gamma_{нб} = \gamma_{\Sigma 3} = 0,034 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$.

Расчет критической температуры показал, что наибольшая стрела провеса будет при режиме наинизших температур, т.е. $\sigma_{-}, t_{-}, \gamma_{n}$.

Был рассчитан габаритный пролет и стрела провеса при габаритном пролете: $l_{габ} = 247 \text{ м}, f_{габ} = 1,92 \text{ м}.$

Были выбраны изоляторы, определен вес и длина гирлянды изоляторов:

- для промежуточных опор выбраны изоляторы стеклянные подвесные тарельчатого типа ПС70Е - 7шт, $\Lambda_n = 1,27 \text{ м},$
- для анкерных опор выбраны изоляторы стеклянные натяжные тарельчатого типа ПС – 120Д - 7шт, $\Lambda_n = 1,56 \text{ м}.$

В соответствии с принятым типом изоляторов выбраны элементы арматуры и определено их количество, вес гирлянды вместе с арматурой.

Вес поддерживающей гирлянды вместе с арматурой: $G_{Гн} = 27 \text{ кг}.$

Вес натяжной гирлянды вместе с арматурой $G_{Гн} = 37,6 \text{ кг}.$

Был произведен расчет и построение расстановочного шаблона.

Опор всего: 247шт, в т.ч.

- промежуточных – 231шт.;
- анкерно-угловых – 16шт.

ВЛ 110кВ «Колпашево – Белый Яр».

На унифицированных свободностоящих стальных опорах типа П220-2 и 1У220-2 будут смонтированы провода марки АС-240/32.

Наибольшая нагрузка – действующая от массы провода с гололедом при давлении ветра, т.е. $\gamma_{нб} = \gamma_{\Sigma 3} = 0,066 \text{ Н/м} \cdot \text{мм}^2$.

Наибольшая стрела провеса будет при режиме наиминимых температур, т.е. $\sigma_{-}, t_{-}, \gamma_{n}$.

$$l_{заб} = 243 \text{ м}, \quad f_{заб} = 1,933 \text{ м}.$$

Для промежуточных опор выбраны изоляторы стеклянные подвесные тарельчатого типа ПС70Е - 12шт, $\Lambda_n = 1,8 \text{ м}$,

Для анкерных опор выбраны изоляторы стеклянные натяжные тарельчатого типа ПС – 120Д - 12шт, $\Lambda_n = 1,8 \text{ м}$,

Вес поддерживающей гирлянды вместе с арматурой: $G_{Гн} = 44,5 \text{ кг}$.

Вес натяжной гирлянды вместе с арматурой $G_{Гн} = 57,1 \text{ кг}$.

Опор всего: 550шт, в т.ч.

- промежуточных – 523шт.;
- анкерно-угловых – 27шт.;
- транспозиционных – 1шт.