

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **Методические указания**

по организации лабораторных работ обучающихся  
по дисциплине «Сооружение линий электропередачи»  
для студентов направления подготовки /специальности  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Направленность (профиль) Электроэнергетические системы и сети

Ставрополь 2026

## Оглавление

Лабораторная работа №1 «Выбор основных конструктивных элементов ВЛ и определение их физико-механических характеристик»

Лабораторная работа № 2 «Определение геометрических параметров линии толщины и расчетных климатических условий»

Лабораторная работа №3 «Расчет удельных механических нагрузок на провода»

Лабораторная работа 4 «Определение критических пролетов и критической температуры»

Лабораторная работа5. «Исследование зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета и выбор исходного режима»

Лабораторная работа 6 «Систематический расчет проводов и построение зависимостей  $\sigma(l)$  и  $f(l)$  для различных климатических режимов»

Лабораторная работа 7 «Проверка изоляторов по условиям механической прочности и выбор линейной арматуры»

Лабораторная работа 8 «Расчет и проверка механических характеристик провода при обрыве его в соседнем пролёте»

Лабораторная работа 9 «Построение шаблона для расстановки опор по продольному профилю трассы и монтажных графиков»

Литература

Приложение 1

Приложение 2

Приложение 3

Приложение 4

## **Лабораторная работа №1 «Выбор основных конструктивных элементов ВЛ и определение их физико-механических характеристик»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний основ выбора конструктивных элементов ВЛ при проектировании.

### **Теоретическая часть**

#### **1 Основные конструктивные элементы ВЛ**

В «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ) содержится определение воздушной линии, которое гласит, «воздушная линия - это устройство для передачи электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикреплённым при помощи изоляторов и арматуры к опорам или кронштейнам инженерных сооружений». В соответствии с приведенным определением основными элементами воздушной ЛЭП являются:

1. Провода для передачи электроэнергии;
2. Изоляторы для изолирования провода от тела опоры;
3. Линейная арматура – для закрепления проводов на изоляторах;
4. Опоры – несущие конструкции для поддержания провода на определенной высоте над уровнем земли или воды.

К дополнительным элементам относятся грозозащитные тросы заземления, разрядники и др.

## 1.1 Провода и грозозащитные тросы

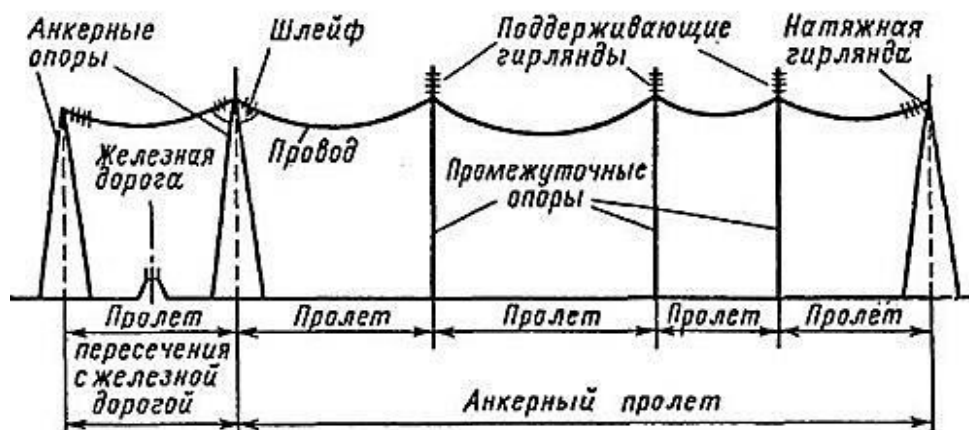


Рисунок 1.1 – Схема анкерного пролёта воздушной линии и пролёта пересечения с железной дорогой

На воздушных линиях преимущественно применяются неизолированные провода и тросы. Вместе с тем в последние три десятилетия за рубежом и в 90-е годы XX в. в России на линиях 0,4 и 6-20 кВ стали довольно широко применяться самонесущие изолированные провода (СИП). Сооружение линий с такими проводами значительно дороже по сравнению с ЛЭП с неизолированными проводами, однако их повреждаемость существенно ниже. Последним в основном и объясняется их все расширяющееся применение.

Провода, состоящие из одной проволоки, называются однопроволочными, выполненные из одного металла — монометаллическими. Из монометаллических в России ограниченно применяются алюминиевые провода — главным образом в местных электрических сетях 0,4 и 6-10 кВ, где длины пролётов не превышают 100-150 м. За рубежом монометаллические провода из сплавов алюминия («алдрей», «альмелек») используются на линиях всех классов номинальных напряжений.

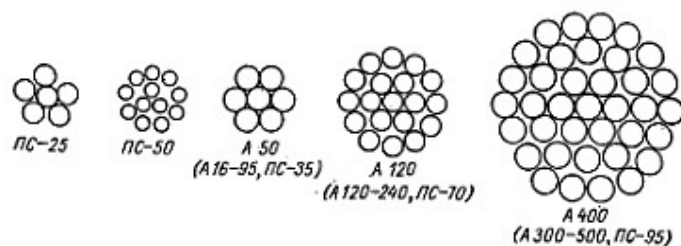


Рисунок 1.2 – Конструкции алюминиевых и стальных проводов

Многопроволочные провода, свитые из многих проволок, используются на линиях всех напряжений.

К материалу проводов предъявляются следующие основные требования:

- высокая электрическая проводимость;
- достаточная механическая прочность;
- устойчивость к атмосферным воздействиям.

Основными видом проводов линий электропередачи являются сталеалюминиевые провода, свитые из стальных и алюминиевых проволок, целесообразно сочетающие высокую механическую прочность и хорошую электрическую проводимость.

В России основным используемым типом проводов для ВЛ 35-1150 кВ до настоящего времени являются сталеалюминевые. Они имеют стальной сердечник из 1, 7, 19, 37 или 61 проволок (соответственно 1, 2, 3, 4 или 5 повивов). На этот сердечник накладываются от 1 до 4 повивов алюминиевых проволок. В соответствии с ГОСТ 839-80 сталеалюминевые провода выпускаются в четырёх модификациях (марок АС, АСК, АСКС и АСКП). Буквы в марке провода указывают материал провода. Отношение сечений алюминиевой и стальной части провода обозначается дробной цифровой частью марки, числитель которой показывает сечение алюминиевой части, а знаменатель – сечение стальной части. Наличие в марке буквы «К» символизирует коррозионную устойчивость провода. Такие провода применяются в районах с «загрязнённой атмосферой» (на побережьях морей,

солёных озёр, в промышленных районах и т. п.). Стойкость против коррозии обеспечивается, во-первых, изоляцией стального сердечника двумя лентами из синтетической плёнки и, во-вторых, нанесением на его поверхность нейтральной смазки повышенной термостойкости (марка АСК) или заполнением ею сердечника (марка АСКС) или всего провода (марка АСКП).

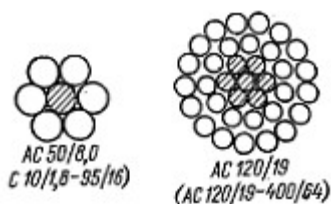


Рисунок 1.3 – Конструкции сталеалюминиевых проводов с отношением  
 $A/C$  6-6,13

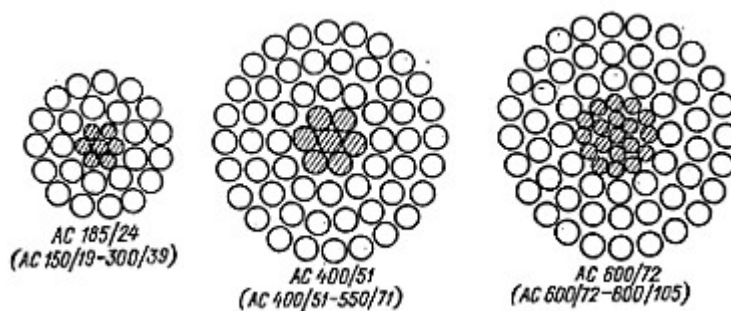


Рисунок 1.4 – Конструкции сталеалюминиевых проводов с отношением  
 $A/C = 7,71-8,04$

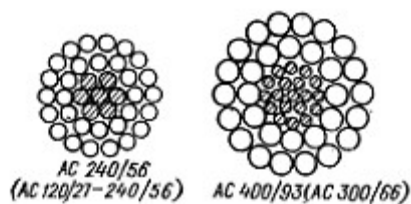


Рисунок 1.5 – Конструкции сталеалюминиевых проводов с отношением  
 $A/C = 4,29-4,39$

Расширенные и полые провода разрабатывались для применения на ВЛ напряжением 220кВ и выше с целью уменьшения отрицательных последствий явления коронного разряда на проводах (потерь электроэнергии,

акустического шума и помех радио- и телевизионному приёму). Это явление возникает при определённой напряжённости электрического поля на поверхности провода (около 30кВ/см), которая обратно пропорциональна внешнему диаметру провода. Применение проводов обычной многопроволочной конструкции с увеличенным по этой причине диаметром неэкономично, поскольку сечение такого провода из-за явления поверхностного эффекта при протекании по нему переменного тока используется не полностью, т.е. какое-то количество материала не работает и является как бы лишним. Пустотелая конструкция позволяет избежать перерасхода цветного металла и удорожания ВЛ. Аналогичные цели преследовались и при создании расширенных проводов за счёт размещения внутри многопроволочной конструкции каркасных спиралей или стеклопластиковых наполнителей. Альтернативой применения таких достаточно сложных в изготовлении конструкций является так называемое расщепление фазы на несколько составляющих, широко применяемое во всем мире для ВЛ СВН и УВН. Так, на отечественных линиях 330кВ используется расщепление фазы на два провода, фиксируемых на расстоянии = 40см друг от друга металлическими распорками. На ВЛ 500кВ применяется «пучок» из трёх проводов, находящихся в вершинах равностороннего треугольника со стороной 40 см.

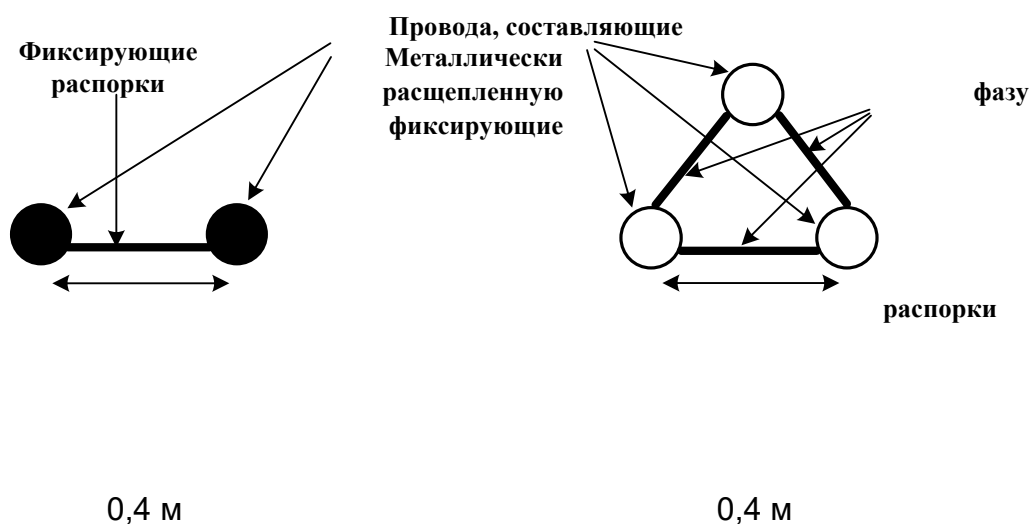


Рисунок 1.6 – Примеры конструкции фазы, расщепленной на два провода (ВЛ330 кВ) и на три провода (ВЛ 500 кВ)

Одним из методов выбора сечения сталеалюминиевых проводов является метод экономической плотности тока. В соответствии с этим методом площадь поперечного сечения провода определяется по формуле

$$F_{\text{эк}} \approx \frac{I_{\text{max}}}{j_{\text{эк}}} \quad (1.1)$$

где  $j_{\text{эк}}$  – значение экономической плотности тока;

$I_{\text{рабmax}}$  – значение максимального рабочего тока в линии, определяемое из выражения

$$I_{\text{max пр}} \approx \frac{S_{\text{max}} \cdot 10^3}{U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{3} \cdot n} \quad (1.2)$$

При определении площади поперечного сечения алюминиевой части необходимо учитывать требования ПУЭ, регламентирующие значения их минимальных значений по условиям короны.

Механические (прочностные) характеристики сталеалюминиевого провода определяются соотношением суммарного поперечного сечения алюминиевых проволок к суммарному сечению проволок стального сердечника (рисунок 1.2 – 1.5).

К области применения проводов с различными соотношениями А/С ПУЭ дают следующие рекомендации:

- Провода с отношением А/С≈8 сечением 240мм<sup>2</sup> и более применяются при толщине стенки гололеда до 20мм
- Провода с соотношением А/С≈6 сечением не более 185мм<sup>2</sup>

применяются при толщине стенки гололеда до 20мм

– Провода с соотношением  $A/C \approx 4$  применяются при толщине стенки гололеда 20мм и более.

– Провода с соотношением  $A/C \approx 1,46$  применяются на больших переходах через водные пространства и пролетами 600м и более.

Таблица 1.1 – Варианты исполнения сталеалюминиевых проводов

| Исполнение сталеалюминиевых проводов | $F_{ал}/F_{ст}$ | Номенклатура                               |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Специальное облегченное              | 12,2 – 18,1     | 330/27; 400/22; 500/27; 1000/56            |
| Облегчённое                          | 7,71—8,04       | 150/19 - 800/105 (15 марок)                |
| Нормальное                           | 6,00—6,25       | 35/6,2-400/64 (10 марок)                   |
| Усиленное                            | 4,29-4,39       | 120/27 - 400/93 (6 марок)                  |
| Специальное усиленное                | 0,65—1,46       | 70/72; 95/41; 185/128; 300/204;<br>500/336 |

Грозозащитные тросы выполняют из стальных оцинкованных многопроволочных канатов марки ТК сечением 35, 50 и 70 мм<sup>2</sup>. На ЛЭП напряжением до 110 кВ тросы применяют только на подходах к подстанциям, чтобы уменьшить вероятность грозовых перенапряжений в непосредственной близости от подстанционного оборудования. На ЛЭП с номинальным напряжением 110 кВ и выше, сооружаемых на стальных и железобетонных опорах, тросы подвешивают вдоль всей линии. Их количество (один или два) определяется типом опоры и расположением на ней проводов.

Сооружение линий 110-330 кВ без тросов допускается лишь в районах с малой интенсивностью грозовой деятельности (менее 20 грозовых часов в году), а также в особо гололёдных районах.

Существуют три способа подвески троса. По первому способу трос подвешивается без изоляторов и заземляется на каждой промежуточной опоре. Лишь на металлических и железобетонных анкерных опорах он крепится на изоляторах. Согласно ПУЭ этот способ должен применяться на всех ВЛ напряжением 150 кВ и ниже. На линиях 220 кВ и выше используется второй

способ, согласно которому трос крепится на изоляторах, шунтируемых искровыми промежутками, на всех опорах. При этом трос делится на участки, совпадающие с анкерными пролётами, и каждый такой участок заземляется в одной точке. В случае использования троса для отбора мощности или высокочастотной связи применяется третий способ, когда трос полностью изолируется по всей длине линии и изоляторы шунтируются искровыми промежутками.

## **1.2 Опоры ВЛ**

Многообразие применяемых в электросетевом строительстве типов опор определяет необходимость их классификации по целому ряду признаков.

Первый - по количеству трёхфазных цепей различают опоры:

1. Одноцепные, которые применяются при сооружении ВЛ любых номинальных напряжений;
2. Двухцепные, которые в России применяются для ВЛ 35-330 кВ, а за рубежом и на линиях 380-500 кВ;

Многоцепные, которые применяются за рубежом в густонаселённых районах с высокой стоимостью земли для экономии территории, отчуждаемой под трассу ВЛ. Например, металлическая шестицепная опора комбинированной ВЛ, где на верхних двух ярусах расположены фазы двух цепей 380 кВ, под ними размещены две цепи 220 кВ, а на нижней траверсе подвешены две цепи 110 кВ. Вертикальный размер этой опоры составляет 63,4 м, зато горизонтальный габарит – только 34 м.

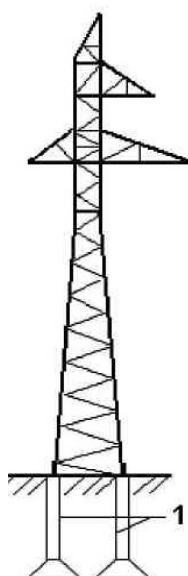


Рисунок 1.7 – Одноцепная унифицированная промежуточная металлическая опора 110 кВ

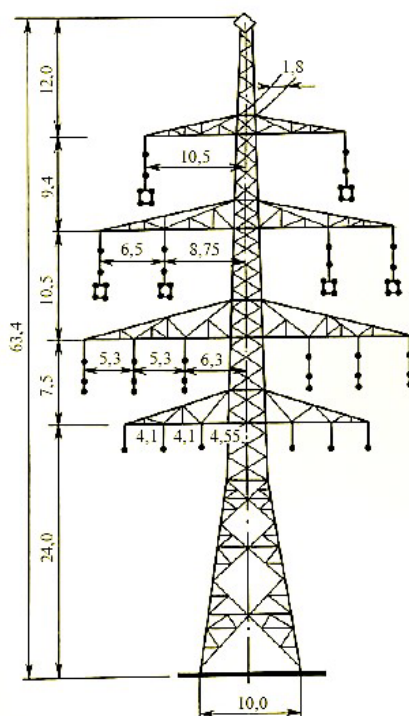


Рисунок 1.8 – Опора многоцепной комбинированной ВЛ 380-220-110 кВ

Основанием второго признака служит способ крепления проводов. Здесь в первую очередь выделяются промежуточные опоры, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах. Это основной тип опор,

составляющий около 90 % их общего числа. Кроме них выделяются анкерные опоры, на которых провода закрепляются в натяжных зажимах. Эти опоры расположены по концам анкерного пролёта (анкерowanego участка).

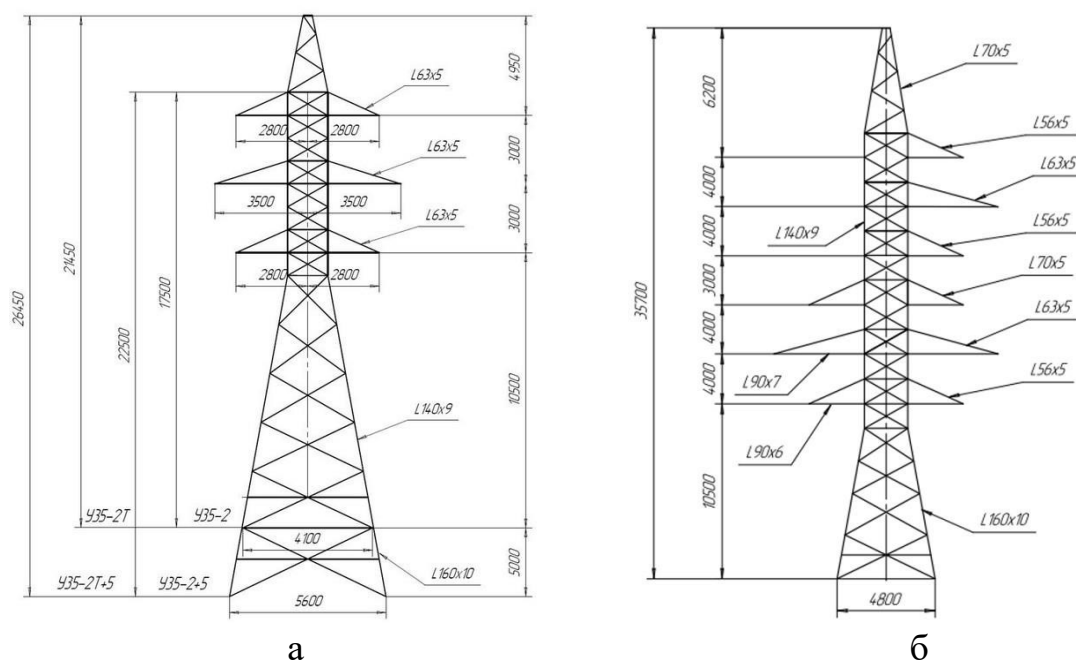


Рисунок 1.9 – Анкерные угловые опоры ВЛ: а– У35-2; б– УС110-8

Третьим признаком является положение на трассе. Здесь различают опоры, расположенные на прямых ее участках, и угловые (или анкерные угловые), расположенные в точках изменения направления (поворота) трассы линии. В этих точках на опору действует сила тяжения проводов и тросов, направленная по биссектрисе внутреннего угла. Поэтому в отличие от обычной промежуточной опоры угловая должна иметь раскосы, противодействующие опрокидывающему моменту в направлении действия этой силы. При углах поворота, превышающих  $20^\circ$ , устанавливают анкерные угловые опоры.

Четвертый признак – конструктивное выполнение, по которому опоры делятся на свободностоящие и на оттяжках. Применение металлических

тросовых оттяжек, которые крепятся с одной стороны к верхним частям опоры, а с другой стороны к анкерным плитам, заглублённым в грунт на 2-3 м, обеспечивает устойчивость опоры и по сравнению со свободностоящими опорами позволяет значительно сократить расход материала, из которого изготавливаются элементы опоры, а следовательно, и ее стоимость.

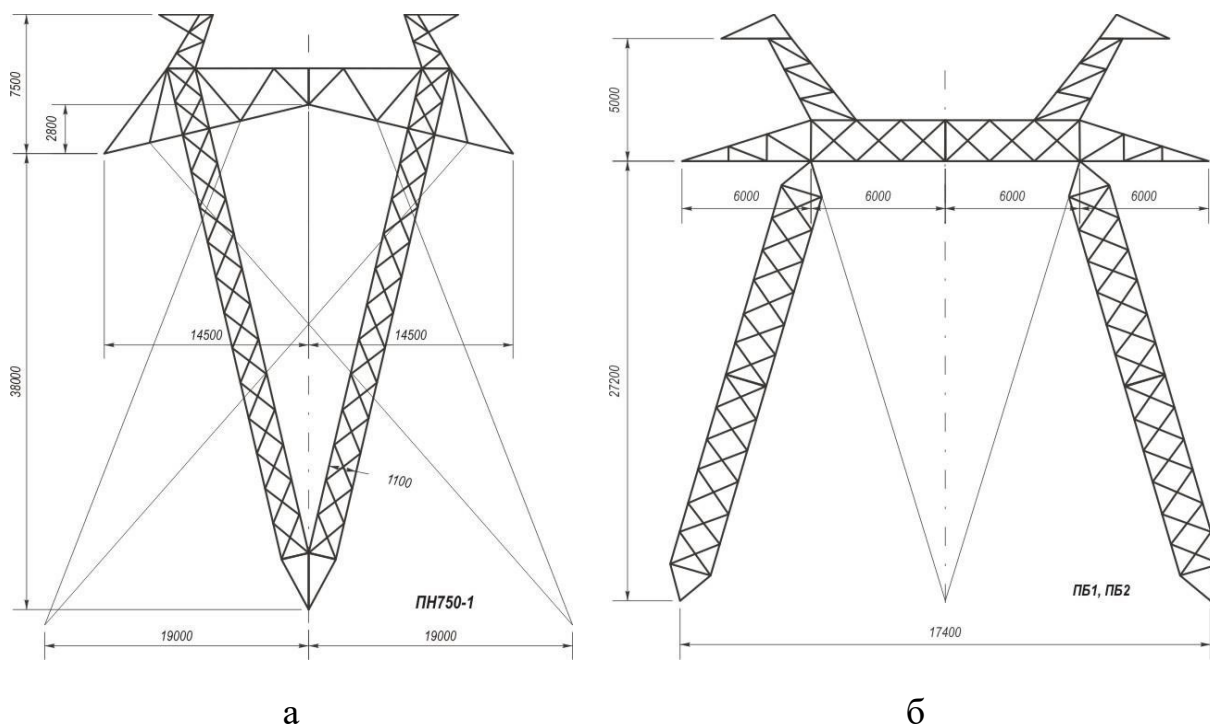


Рисунок 1.9 – Эскиз опор на оттяжках: а – ПН 750-1; б – ПБ 1

Выделяется группа опор специального назначения. К ним относятся транспозиционные, ответвительные и переходные опоры. Транспозиционные опоры устанавливаются по концам участков цикла. Под транспозицией понимается циклическая перестановка фаз с целью снижения несимметрии систем векторов токов и напряжений в конце линии (при симметричных системах этих векторов в ее начале), вызываемой различием реактивных параметров фаз (индуктивностей и ёмкостей) вследствие несимметричного расположения проводов на опорах. На линиях длиной до 100 км обычно осуществляется один цикл транспозиции, если это допустимо по условиям

влияния на проводные линии связи, прокладываемые параллельно ВЛ. Ответвительные опоры служат для выполнения ответвлений от основной линии, а переходные – для осуществления переходов через реки и другие водные пространства. Высота последних в ряде случаев достигает 100 м.

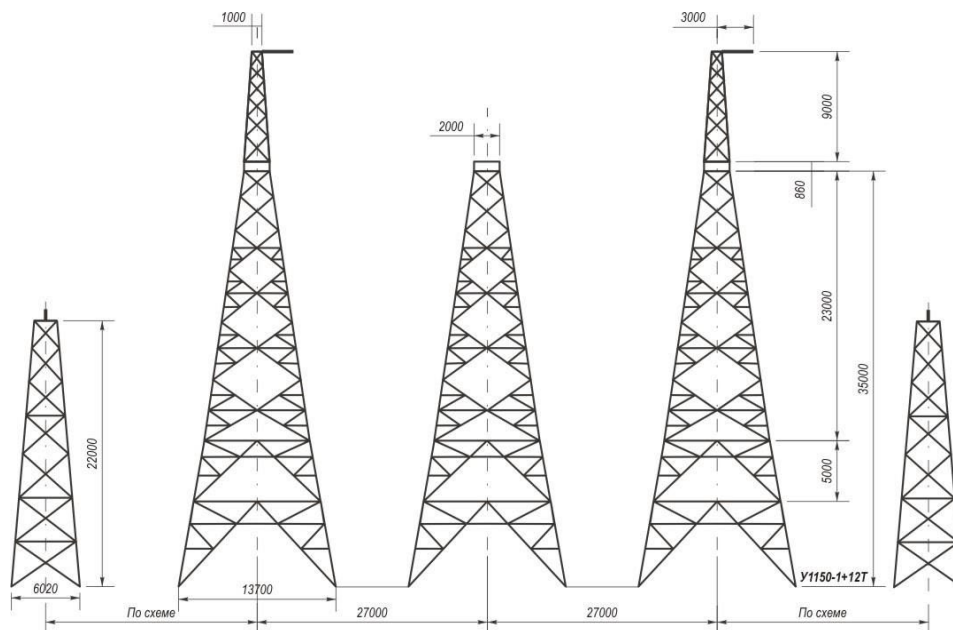


Рисунок 1.10 – Анкерно-угловые транспозиционные свободстоящие опоры UC750-1+5T, UC750-1+10T, UC750-1+15T

### 1.3 Изоляция ВЛ

Изоляторы ВЛ изготавливают в основном из фарфора или закалённого стекла. Вместе с тем, в последние два десятилетия все шире начинают применяться и полимерные изоляторы. Фарфор и стекло обладают высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, достаточно высокой механической и электрической прочностью. Стекланные изоляторы легче фарфоровых, лучше противостоят ударным нагрузкам и не растрескиваются, а рассыпаются при пробое, что облегчает визуальное нахождение места повреждения при осмотрах линии.

Конструктивно различаются два вида стекланных и фарфоровых изоляторов – штыревые и подвесные.

Штыревые применяются на ВЛ до 35 кВ включительно. Корпус изолятора имеет внутреннюю резьбу и навинчивается на металлический штырь или крюк. Провод укладывается в углубление на головке изолятора и закрепляется проволоочной вязкой. В марке изолятора присутствует обозначение типа (Ш), материала (С или Ф), номинального напряжения (в киловольтах) и исполнения (А, Г и др.). Так, например, изолятор ШС10-Г (грязестойкого исполнения, т.е. для районов с загрязненной атмосферой) имеет высоту 145 мм, диаметр корпуса 160 мм и массу 2,1 кг.

Подвесные изоляторы применяются на ВЛ напряжением 35 кВ и выше. Марка изолятора содержит буквы П (подвесной), С (стеклянный) или Ф (фарфоровый), Г (грязестойкий) и А, Б, В, Д (обозначение модификации). Цифрой обозначается максимальная (разрушающая) механическая нагрузка в килоньютонах (кН), например ПФ70-В, ПСГ120-А, ПС400-А и т. п.

## **2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы.**

Выбор основных конструктивных параметров ВЛ может быть выполнен с использованием программы «Расчет механических характеристик провода LEP МЕСН». В этих целях после ввода исходных данных используется блок программы «Выбор конструктивных элементов ВЛ».

Главное окно программы предоставляет пользователю возможность выбора исходных данных в группе элементов «Исходные данные» (рисунок 1.11).

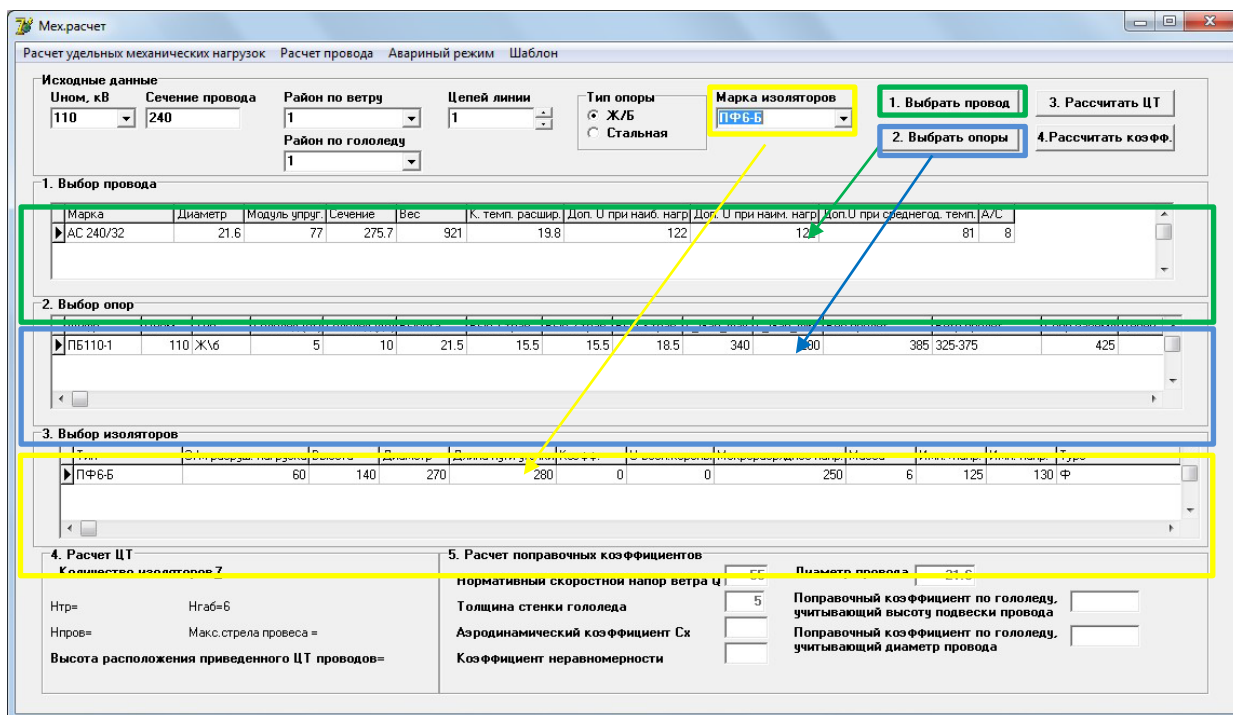


Рисунок 1.11 – Главное окно программы

После ввода исходных данных необходимо выполнить следующие действия:

1. Нажать на кнопку «1.Выбрать провод». В результате будет определен провод, подходящий заданным условиям, в группе «1.Выбор провода»;
2. Нажать на кнопку «2. Выбрать опоры». В результате будет определен тип опор, подходящий заданным условиям, в группе «2. Выбор опор»;
3. Выбор изоляторов в группе «3. Выбор изоляторов» и расчет количества изоляторов осуществляется автоматически при выборе марки изолятора.

### Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для

чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15”. Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

### **Указания по технике безопасности**

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### **Задание**

Исходные данные для выполнения задания на лабораторную работу приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Исходные данные для расчёта

| Номера вариантов | P, МВт | Q, Мвар | U, кВ | n, цепей | j <sub>эк</sub> | Район прохождения трассы ЛЭП    |
|------------------|--------|---------|-------|----------|-----------------|---------------------------------|
| 1                | 25     | 18      | 110   | 1        | 1               | Архангельская область           |
| 2                | 100    | 51      | 220   | 1        | 1               | Московская область              |
| 3                | 150    | 72      | 330   | 1        | 0,9             | Кемеровская область             |
| 4                | 36     | 24      | 110   | 2        | 1,1             | Ленинградская область           |
| 5                | 165    | 70      | 220   | 2        | 1               | Волгоградская область           |
| 6                | 350    | 207     | 330   | 2        | 1,1             | Ставропольский край             |
| 7                | 15     | 8       | 110   | 1        | 0,9             | Красноярский край               |
| 8                | 80     | 43      | 220   | 1        | 1               | Чеченская Республика            |
| 9                | 180    | 87      | 330   | 1        | 1               | Республика Дагестан             |
| 10               | 23     | 11      | 110   | 2        | 1               | Карачаево-Черкесская Республика |
| 11               | 115    | 86      | 220   | 2        | 1               | Тюменская область               |
| 12               | 280    | 70      | 330   | 2        | 1               | Ханты-Мансийский округ          |
| 13               | 10     | 6       | 110   | 1        | 1               | Краснодарский край              |
| 14               | 90     | 65      | 220   | 1        | 0,9             | Свердловская область            |
| 15               | 120    | 58      | 330   | 1        | 1,1             | Ростовская область              |
| 16               | 38     | 27      | 110   | 2        | 1               | Камчатский край                 |
| 17               | 180    | 82      | 220   | 2        | 1               | Магаданская область             |
| 18               | 260    | 52      | 330   | 2        | 1               | Хабаровский край                |
| 19               | 37     | 23      | 110   | 1        | 1               | Амурская область                |
| 20               | 135    | 97      | 220   | 2        | 1,1             | Забайкальский край              |
| 21               | 20     | 9       | 110   | 1        | 0,9             | Приморский край                 |
| 22               | 190    | 142     | 330   | 2        | 1,1             | Республика Татарстан            |
| 23               | 30     | 12      | 110   | 2        | 1               | Челябинская область             |
| 24               | 29     | 19      | 110   | 1        | 1               | Республика Адыгея               |
| 25               | 23     | 10      | 110   | 1        | 1               | Красноярский край               |

### Расчетная часть работы.

В соответствии с исходными данными для указанных в задании районов проектирования трассы ЛЭП следует выполнить ряд расчетов:

1. Определить значения нормативных величин толщины стенки гололеда, скоростного напора ветра, а также, максимальных, минимальных и среднегодовых температур (Приложения 1,2). Полученный результат следует представить в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Климатические характеристики района проектирования трассы ЛЭП

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Район проектирования      |  |
| Район по гололеду         |  |
| Район по ветру            |  |
| Максимальная температура  |  |
| Минимальная температура   |  |
| Среднегодовая температура |  |

2. Определить площадь поперечного сечения алюминиевой части сталеалюминиевого провода в соответствии с заданными в задании значениями номинального напряжения, числа цепей линии и нагрузкой, передаваемой по ней. При определении площади поперечного сечения алюминиевой части принять экономическую плотность тока, равной  $1 \text{ А/мм}^2$  и учесть требования ПУЭ, регламентирующие значения их минимальных значений по условиям короны.

3. Определить площадь поперечного сечения стальной части сталеалюминиевого провода в соответствии с рекомендациями ПУЭ (Приложение 3).

Таким образом, на основании результатов, полученных при выполнении п.п. 2 и 3, будет определена марка сталеалюминиевого провода, удовлетворяющая требованиям ПУЭ. [5]

4. Произвести выбор промежуточной и анкерной опор ЛЭП в соответствии с заданными в задании значениями номинального напряжения и числа цепей с учетом определенных в п.1 номера района по гололеду и марки сталеалюминиевого провода, определенного в п.3. Технические характеристики опор представлены в [6].

5. Произвести выбор марки и числа изоляторов ЛЭП в соответствии с заданным в задании номинальным напряжением ВЛ. Технические характеристики изоляторов представлены в [6].

6. Определить для выбранной марки провода воздушной линии его физико-механические характеристики (Приложение 3) и привести их в таблице 1.3 «Физико-механические характеристики провода»

7. Определить для выбранного типа опоры ее геометрические характеристики и представить их в таблице 1.4 «Конструктивные размеры и характеристики опоры»

8. Определить для выбранной марки изолятора и числа их в гирлянде физико-механические характеристики гирлянды и привести их в таблице 1.5 «Физико-механические характеристики гирлянды изоляторов»

Таблица 1.3 – Физико-механические характеристики провода

| Марка провода                                                                                  | Значение |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Диаметр провода , мм                                                                           |          |
| Полное сечение провода , мм <sup>2</sup>                                                       |          |
| Удельная масса провода , кг/км                                                                 |          |
| Модуль упругости провода , $E \cdot 10^{-3}$ даН/мм <sup>2</sup>                               |          |
| Температурный коэффициент линейного расширения , $\alpha \cdot 10^6$ К <sup>-1</sup>           |          |
| Нормативное допускаемое напряжения провода при наибольшей нагрузке даН/м*мм <sup>2</sup>       |          |
| Нормативное допускаемое напряжения провода при минимальной температуре даН/м*мм <sup>2</sup>   |          |
| Нормативное допускаемое напряжения провода при среднегодовой температуре даН/м*мм <sup>2</sup> |          |

Таблица 1.4 – Конструктивные размеры и характеристики опоры

| Параметры                           | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Тип опоры                           |          |
| Полная высота опоры, м              |          |
| Высота крепления траверсы фазы А, м |          |
| Высота крепления траверсы фазы В, м |          |
| Высота крепления траверсы фазы С, м |          |

|                                        |  |
|----------------------------------------|--|
| Расчетная длина габаритного пролета, м |  |
| Расчетная длина весового пролета, м    |  |
| Расчетная длина ветрового пролета, м   |  |

Таблица 1.5 – Физико-механические характеристики гирлянды изоляторов

| Наименование показателя                       | Значение |
|-----------------------------------------------|----------|
| Марка изолятора                               |          |
| Количество изоляторов в гирлянде, шт          |          |
| Электромеханическая разрушающая нагрузка, даН |          |
| Масса гирлянды                                |          |
| Строительная высота гирлянды                  |          |

### **Работа с программой**

После ввода исходных данных необходимо выполнить следующие действия:

1. Выбрать провод.
2. Выбрать опоры.
3. Выбрать изоляторы.

Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen»

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 1.2-1.5, а также «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные конструктивные элементы ВЛ?
2. Перечислите основные материалы, применяемые при изготовлении проводов ВЛ и требования, предъявляемые к ним?
3. Какую информацию о конструкции провода содержит в себе марка провода?
4. Назовите области применения сталеалюминиевых проводов с различным соотношением алюминиевой и стальной части?
5. Как учитывается значение толщины стенки гололеда при выборе сечения стальной части сталеалюминиевого провода? Подтвердите обоснованность выбора марки провода, произведенного при выполнении лабораторной работы.
6. Расшифруйте следующие марки провода: А, АС, АСК, АСКС, АСКП?
7. Дайте численную оценку расчетному сечению провода марки АС400/56?
8. Укажите назначение и области применения проводов с расщепленной фазой?
9. При каких условиях допускается сооружение линий без грозозащитных тросов?
10. Перечислите назначение и способы подвески грозозащитного троса?
11. Поясните назначение промежуточной, анкерной, угловой, переходной опор на трассе ВЛ?

12. Поясните назначения транспозиционных и ответвительных опор на трассе ВЛ?
13. Какими критериями вы руководствовались при определении марок промежуточной и анкерной опоры при выполнении лабораторной работы?
14. Дайте определение габаритному, весовому и ветровому пролетам промежуточной опоры
15. Дайте определение анкерному и промежуточному пролетам ВЛ?
16. Расшифруйте марку опоры: П-2Ц-Ст-С?
17. Назовите основные материалы, применяемые при изготовлении опор и перечислите достоинства и недостатки этих материалов?
18. Каковы критерии выбора марки и числа изоляторов в подвесной гирлянде?
19. Поясните буквенно-цифровое обозначение изоляторов. Дайте расшифровку следующих марок изоляторов: ПС 60-Б; ШСС; ПФ70-В, ПСГ20-А, ПС400-А; ЛК 70/110?
20. Как классифицируются опоры по числу цепей и конструктивному исполнению?
21. Укажите назначение линейных изоляторов?
22. Назовите области применения штыревых и тарельчатых линейных изоляторов?

**Литература:** 1, 2, 3,4,5,6

## **Лабораторная работа № 2 «Определение геометрических параметров линии, расчетных значений толщины стенки гололеда и скоростного напора ветра»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний о геометрических размерах ЛЭП и навыков определения расчетных климатических условий при проектировании, сооружении и эксплуатации ВЛ.

### **Теоретическая часть**

#### **1 Расположение проводов на опоре**

В зависимости от конструкции опоры провода могут быть расположены в один, два и три яруса, что сильно влияет на ее геометрические размеры. Расположение проводов в один ярус принято называть «горизонтальным», расположение в два или три яруса без смещения по горизонтали находящихся друг под другом проводов называется «вертикальным». Расположение проводов в два или три яруса, при котором провода, находящиеся друг под другом, имеют горизонтальное смещение, называется «смешанным».

На рисунке 2.1 приведен эскиз стальной промежуточной одноцепной опоры 500 кВ на оттяжках с горизонтальным расположением проводов. При таком расположении схлестывание проводов при неравномерной гололедной нагрузке и ветре маловероятно. Поэтому ПУЭ рекомендует в районах с толщиной стенки гололеда 15 мм и 20 мм отдавать предпочтение горизонтальному расположению проводов, а в особых гололедных районах применение опор с горизонтальным расположением проводов обязательно. Также, горизонтальному расположению проводов следует отдавать предпочтение в районах, где наблюдается частая и интенсивная пляска проводов.

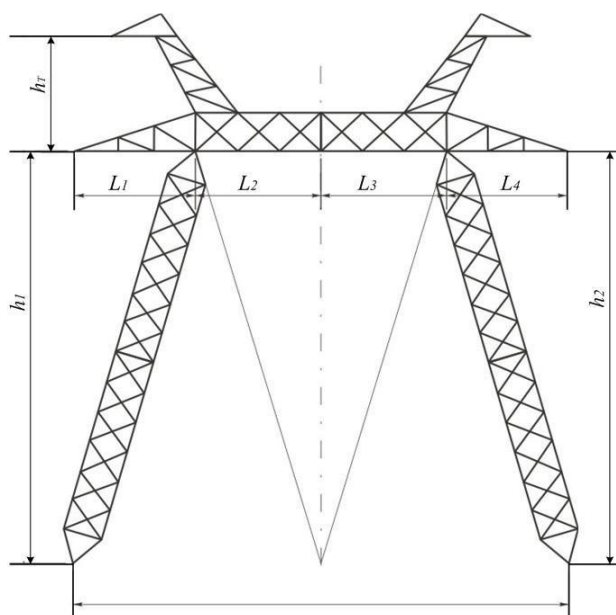


Рисунок 2.1 – ПБ-2 Стальная промежуточная одноцепная опора на  
оттяжках 500 кВ

Двухцепные линии с горизонтальным расположением проводов могут быть выполнены на порталных опорах или на одностоечных опорах.

Для одноцепной опоры с горизонтальным расположением проводов

$$H_{on} \approx h_{1m} \quad (2.1)$$

где  $h_1 = h_2 = h_3$  – высота подвески проводов фазы А, В и С по отношению к уровню земли в месте установки опоры, м.

$h_{тр}$  – высота тросостойки, м

Опоры с вертикальным расположением проводов без горизонтального смещения в соседних ярусах согласно ПУЭ рекомендуется применять на ВЛ напряжением не более 35 кВ, выполненных с использованием штыревых изоляторов. Новая редакция ПУЭ допускает в отдельных случаях применение вертикального расположения проводов в районах с отсутствием гололеда при достаточном расстоянии между соседними ярусами на линиях всех напряжений

При смешанном расположении проводов в отечественной практике применяются одноцепные опоры с расположением траверс в двух ярусах, которые более экономичны и позволяют использовать одинаковые траверсы как для одноцепных, так и для двухцепных опор. На рисунке 2.2. приведен эскиз одноцепной железобетонной опоры ПБ-220-1 со смешанным расположением проводов по типу «треугольник»

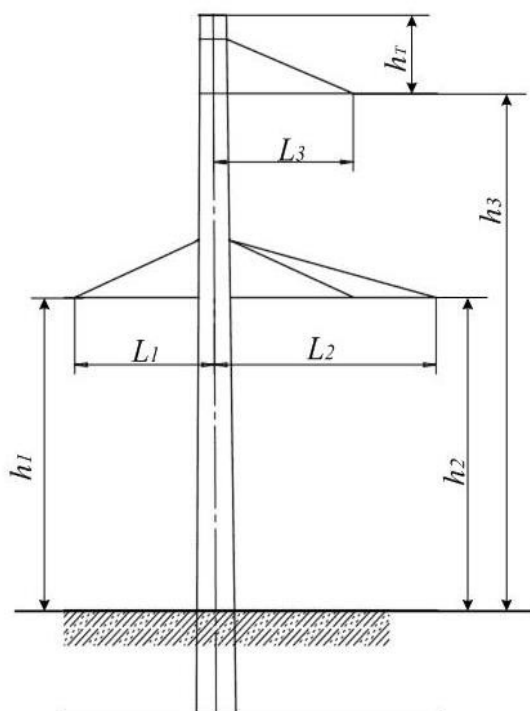


Рисунок 2.2 – ПБ-220-1 Железобетонная промежуточная одноцепная опора 220 кВ

Для одноцепной опоры с расположением проводов «треугольником» вертикальный габарит можно определить как:

$$H_{on} = h_1 + h_2 + h_{tr} \quad (2.2)$$

где  $h_1 = h_2$  – высота подвески проводов фазы А и В по отношению к уровню земли, м;

$\Delta h_{23}$  – расстояние по вертикали между высотой подвески провода фазы В(или А ) и провода фазы С<sub>м</sub>;  $h_{mp}$  – высота тросостойки, м

Двухцепные опоры со смешанным расположением проводов могут быть выполнены с их размещением по двум наклонным прямым, сходящимся кверху(тип «елка»). по двум наклонным прямым, сходящимся книзу(тип «обратная елка»), а также, с расположением проводов по вершине шестиугольника (тип «бочка») или по вершинам двух треугольников. На рисунке 2.3 приведен эскиз стальной промежуточной двухцепной опоры П110-4 со смешанным расположением проводов по типу «бочка».

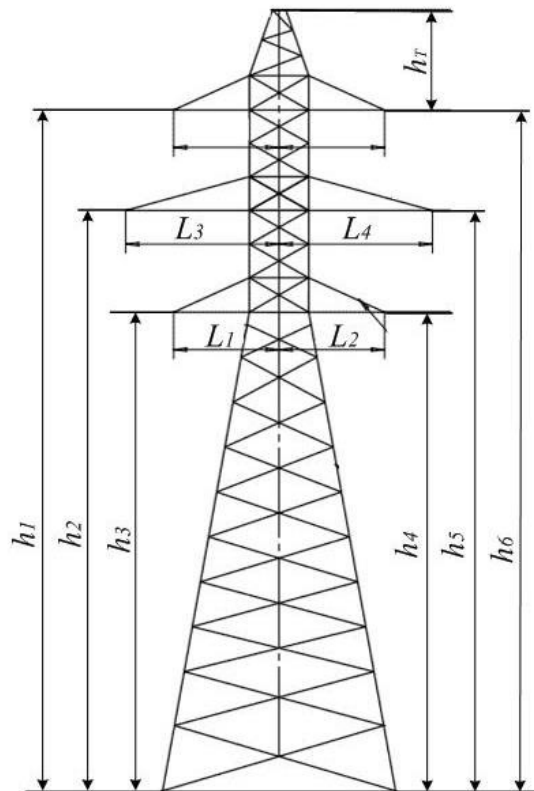


Рисунок 2.3 – П-110-4 Стальная промежуточная двухцепная 110 кВ

Таким образом, вертикальный габарит линии, т.е. высота опоры  $H_{оп}$ , для двухцепной ВЛ с расположением проводов «бочкой» определяется выражением

$$H_{оп} = h_1 + h_{12} + h_{23} + h_{mp}, \quad (2.3)$$

где  $h_1$  – высота подвески 1 цепи провода фазы А относительно уровня земли,

м;

$\Delta h_{12}$  – расстояние по вертикали между высотой подвески 1 цепи провода фазы А и 1 цепи провода фазы В, м;

$\Delta h_{23}$  – расстояние по вертикали между высотой подвески 1 цепи провода фазы В и 1 цепи провода фазы С, м;  $h_{тр}$  – высота тросостойки, м

Положение грозозащитного троса, т.е. высота тросостойки  $h_T$ , определяется по условиям защиты проводов от прямых ударов молнии. Для обеспечения такой защиты защитный угол  $\alpha_z$  должен быть не более установленных ПУЭ его допустимых значений  $\alpha_{доп}$ .

## **2 Основные конструктивные параметры воздушной линии (ВЛ)**

К основным конструктивным параметрам ВЛ относятся

- длина пролета;
- стрела провеса проводов;
- расстояние от проводов до земли, пересекаемых линией дорог и других инженерных сооружений (габарит).

**Длиной промежуточного пролета** называют расстояние вдоль линии, между двумя смежными промежуточными опорами.

**Стрелой провеса проводов** называют расстояние по вертикали между воображаемой прямой линией, соединяющей точки крепления проводов на двух смежных опорах и низшей точкой их провеса в пролете.

**Габаритом ВЛ** называют наименьшее расстояние по вертикали от проводов до поверхности земли, рек, озер, линий связи, шоссейных и железных дорог и т.п. Габарит ВЛ регламентируется ПУЭ и зависит от напряжения и посещения местности людьми.

### 3 Определение вертикального габарита линии

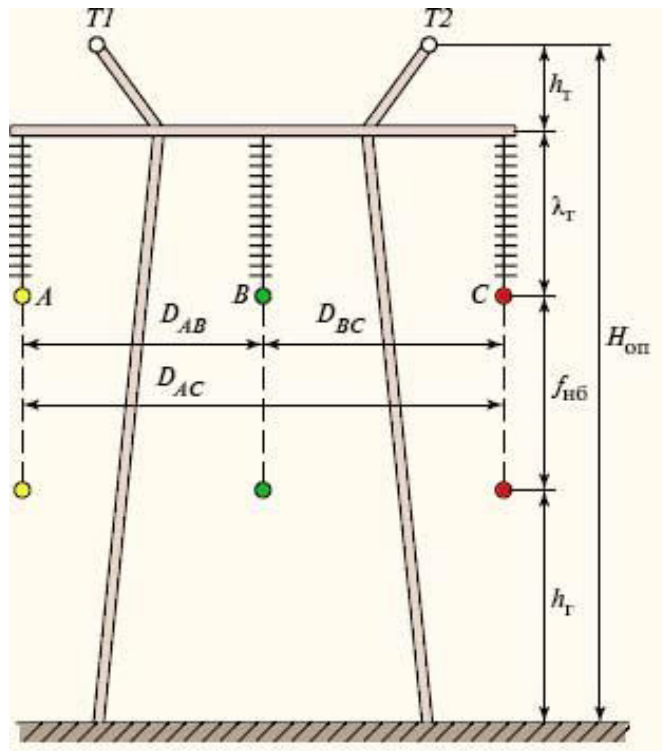


Рисунок 2.4 – Геометрические параметры воздушной линии

На рисунке 2.4 схематически показано определение вертикального габарита линии, выполненной на одноцепных порталных свободностоящих металлических опорах с двумя тросами.

Высота опоры  $H_{оп}$ , как это видно из рисунка 2.4, определяется выражением:

$$H_{оп} = h_Г + f_{нб} + \lambda_Г + h_T \quad (2.4)$$

где  $h_Г$  – нормированный габарит линии до земли, м;  $f_{нб}$  – наибольшая стрела провеса провода, м;  $\lambda_Г$  – длина гирлянды изоляторов с арматурой, м;  $h_T$  – высота крепления троса над траверсой (высота тросостойки), м.

Как уже говорилось, **габарит линии**, т.е. величина  $h_Г$ , определяется условиями безопасности передвижения под проводами линии транспортных средств и механизмов. Она нормируется в зависимости от характера местности

(населенная, ненаселенная, труднодоступная) и номинального напряжения ВЛ.

**Величина стрелы провеса**  $f_{нб}$  в промежуточном пролете длиной  $L$  определяется допустимым механическим напряжением в низшей точке провода  $\sigma_{доп}$  при конкретных климатических условиях и соответствующей удельной нагрузке  $\gamma$ :

$$(2.5) \quad f_{нб} = \frac{\gamma L^2}{8\sigma_{доп}}.$$

Наибольшая стрела провеса имеет место либо при высшей расчётной температуре воздуха  $\Theta_{нб}$  за счёт термического удлинения провода, либо при наибольшей вертикальной механической нагрузке от массы провода, окрытого гололёдом при соответствующей температуре  $\Theta_{доп} = -5^\circ\text{C}$  и отсутствии ветра.

Длина гирлянды изоляторов с арматурой  $\lambda_{г}$  определяется типом используемых изоляторов и их количеством в зависимости от номинального напряжения ВЛ.

Положение грозозащитного троса, т.е. высота тросостойки  $h_T$ , определяется по условиям защиты проводов от прямых ударов молнии. Для обеспечения такой защиты защитный угол  $\alpha_z$  должен быть не более установленных ПУЭ его допустимых значений  $\alpha_{доп}$ . Для опор с одним тросом  $\alpha_{доп} = 30^\circ$ , с двумя тросами –  $20^\circ$ .

При  $\alpha_z = \alpha_{доп}$ , как следует из рисунка 2.5, расстояние по вертикали между проводом и тросом  $h_{п-т}$  равно :  $(0,5 D^{BC} \tan^2 \alpha_{доп})$

$$h_{п-т} = h_T - \frac{D^{BC}}{2 \tan^2 \alpha_{доп}} \quad (2.6)$$

#### 4 Определение расстояния между фазами линии

Горизонтальный габарит линии зависит также от конструкции опоры и требуемого ПУЭ расстояния между фазами.

Наименьшее допустимое изоляционное расстояние по воздуху от токоведущих до заземленных частей ВЛ определяется условиями исключения пробоя воздушного промежутка при рабочем напряжении, при грозовых и внутренних перенапряжениях, а также условием безопасного подъема ремонтного персонала на опору, когда линия находится под напряжением.

Последнему условию соответствует наибольшее значение которое для ВЛ 35–500 кВ составляет от 1,5 до 4,5 м.

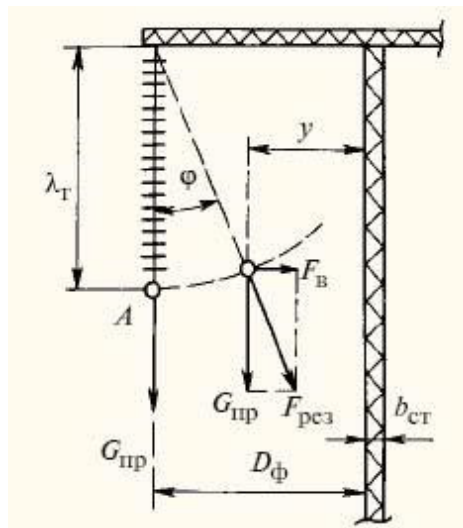


Рисунок 2.5 – К определению расстояния между фазами ВЛ

При использовании на ВЛ как подвесных гирлянд стеклянных и фарфоровых изоляторов, так и стержневых полимерных изоляторов расстояние от провода до стойки опоры  $y$  определяется с учетом возможного отклонения провода под давлением ветра (рисунок 2.5) на угол  $\varphi$ , зависящий от соотношения удельных нагрузок – вертикальной от собственной массы провода без гололеда  $G_{пр}$  и горизонтальной от действия ветра  $F_{в}$ , которые формируют результирующий вектор силы  $F_{рез}$ , действующей на провод.

При этом минимально допустимое расстояние между фазой линии и стойкой опоры :

$$D_{\phi \min} \geq D_{\text{доп}} \geq D_{\Gamma} \sin \varphi, \quad (2.7)$$

где  $\sin \varphi = F_{\text{в}}/F_{\text{рез}}$ .

Значение  $D_{\phi \min}$  служит для определения *расстояния между фазами*  $D_{\text{мф}}$ .  
При их горизонтальном расположении :

$$D_{\text{мф}} \geq D_{AB} \geq D_{BC} \geq 2 \geq D_{\phi \min} \geq b_{\text{ст}}, \quad (2.8)$$

где  $b_{\text{ст}}$  – ширина стойки опоры.

## 5 Расчетные климатические условия

Элементы ВЛ работают в сложных и разнообразных географических и климатических условиях, различающихся сезонными изменениями температуры и влажности воздуха, наличием в нем природных и промышленных загрязнений. Кроме того, они должны противостоять воздействию сил, основными из которых являются:

- вес всех элементов линии;
- вес гололёдо-изморозевых отложений на проводах, тросах и опорах;
- давление ветра на провода, тросы и опоры;
- тяжения по проводам и тросам.

Обусловленные массой конструктивных элементов линии силы, действующие на одну опору, могут достигать сотен тысяч ньютонов (1 Н = 0,102 кгс), и провода, тросы и опоры должны быть рассчитаны на такие нагрузки. При определённых погодных условиях (обычно при температуре воздуха от - 3 до - 5 °С и скорости ветра до 10 м/с) происходит образование ледяного покрова на проводах, тросах и опорах ВЛ с массой 900 кг/м³. Вес такого покрова, приходящийся на одну опору, может достигать тысяч ньютонов. Интенсивность гололёдообразования неодинакова в различных

регионах страны. Вся территория России делится на восемь районов, различающихся возможной максимальной толщиной стенки гололёда.

Значения максимальных толщин стенок гололёда и максимальных ветровых давлений для ВЛ определяются на высоте 10 м над поверхностью земли (нормативные значения) Карты районирования страны по гололёдным условиям приводятся в ПУЭ.

Аналогичным образом территория России делится на восемь районов с различной максимальной скоростью ветра. Ветровые нагрузки (скоростной напор ветра) также должны восприниматься всеми конструктивными элементами ВЛ. Обычно считается, что давление ветра направлено параллельно поверхности земли и перпендикулярно продольной оси линии. Силы, обусловленные действием ветра, в расчёте на одну опору могут достигать сотен тысяч ньютонов и обязательно учитываются при проектировании механической части ВЛ. Максимальная расчётная скорость ветра может быть выше 49 м/с (Особый район), это соответствует по давлению более 1500 Па ( $1 \text{ Па} = 0,102 \text{ кгс/м}^2$ ).

Отложения гололёда увеличивают площади поверхностей проводов и тросов, на которые оказывает давление ветер, что приводит к возрастанию горизонтальных нагрузок. Территория европейской части России в основном относится к II–III районам по гололёду и к I–II районам по ветру.

Действие ветра обуславливает и два нежелательных явления, отрицательно влияющих на конструктивную часть ВЛ.

Во-первых, это вибрация проводов и тросов, возникающая при равномерном движении воздуха со скоростью 4–8 м/с. Она характеризуется частотой колебаний в десятки герц и амплитудами до десятков миллиметров. Вибрация вызывает многократные перегибы проволок проводов и тросов, что

в конечном счёте приводит к их излому, ослаблению прочности провода или троса и к возможности их обрыва, т.е. к аварийной ситуации.

Во-вторых, при скоростях ветра 15–30 м/с может возникать так называемая пляска проводов и тросов. Обычно это явление наблюдается в период, когда провода и тросы покрыты гололёдом. Эти колебания характеризуются частотой в единицы герц, однако их амплитуда может достигать величины, равной стреле провеса провода или троса. Возникающие при этом динамические воздействия на узлы крепления проводов к гирляндам изоляторов и последних к опорам настолько значительны, что могут приводить к поломкам арматуры и деталей опор. Кроме того, при пляске возможны касания и схлестывания проводов между собой и с тросами, что вызывает короткие замыкания и аварийное отключение линии. Для борьбы с вибрацией воздушные линии оснащаются виброгасителями. Единственным средством демпфирования колебаний при пляске является плавка гололёда, осуществляемая с помощью специального оборудования, обеспечивающего прохождение по линии больших токов и такой нагрев проводов, при котором происходят таяние и сброс ледяной корки.

Согласно ПУЭ расчет проводов производится по методу допускаемых напряжений. В расчетах по этому методу принимаются механические нагрузки, соответствующие условиям эксплуатации линии, называемые нормативными.

Для определения нормативных нагрузок следует принимать наиболее неблагоприятные сочетания климатических условий, наблюдаемые не реже 1 раза в пять лет для линий напряжением 35 кВ и ниже, 1 раза в 10 лет для линий 110–330 кВ и 1 раза в 15 лет для линий 500 кВ.

Скоростной напор ветра и толщина стенки гололеда на провода ВЛ определяется с учетом высоты расположения приведенного центра тяжести (ЦТ) всех проводов.

Толщина стенки гололеда определяется путем умножения значения толщины стенки гололеда, указанного в ПУЭ, на поправочные коэффициенты учитывающие возрастание толщины стенки гололеда по высоте, и диаметр провода.

При определении ветровых нагрузок в расчетах принимается величина  $q=v^2/16$  даН/м<sup>2</sup>, называемая **скоростным напором ветра**. Значения скоростных напоров ветра указаны в ПУЭ для семи ветровых районов на высоте над поверхностью земли до 15 м. Значение скоростного напора ветра на высоте более 15 метров от поверхности земли определяется путем умножения значения скоростного напора, указанного в ПУЭ, на поправочный коэффициент, учитывающий возрастание скорости ветра по высоте (аэродинамический коэффициент). Кроме того, распределение ветрового давления по длине пролета неравномерно. Эта неравномерность, возрастающая при увеличении скорости ветра, учитывается коэффициентом неравномерности, значение которого принимается в зависимости от скоростного напора ветра.

## **6 Определение приведенного центра тяжести трехфазной системы проводов**

Для получения расчетных климатических условий, т.е., расчетных значений толщины стенки гололеда и скоростного напора ветра, следует определить значения указанных коэффициентов, для чего необходимо знание высоты приведенного центра масс системы проводов (тросов).

Высота расположения приведенного ЦТ проводов  $h_{пр.цт}$  определяется по формуле:

$$h_{np\text{ м.} \dots} \leq h_{пров} \leq \frac{2}{3} f_{\max}, \quad (2.9)$$

где:  $h_{пров}$  – высота крепления проводов к изоляторам, отсчитываемая от отметки земли в местах установки опор, м.

$f_{\max}$  – значение стрелы провеса провода, условно принимаемое наибольшим (при высшей температуре или гололеде без ветра), м.

Высота подвеса провода к гирлянде определяется исходя из высоты расположения траверсы относительно земли и длины гирлянды изоляторов.

$$h_{пров} \leq h_{из}, \quad (2.10)$$

где:  $h_{из}$  – высота подвеса гирлянды изоляторов к траверсе, которая равна высоте расположения траверсы, отсчитываемой от отметки земли в месте установки опоры, м;  $\lambda$  – длина гирлянды изоляторов, м, определяющаяся как:

$$\lambda_{из} \leq n, \quad (2.11)$$

где:  $\lambda_{из}$  – конструктивная высота одного изолятора, м;  $n$

– число изоляторов в гирлянде, шт.

При горизонтальном расположении проводов высота подвеса гирлянд изоляторов одинакова для всех проводов.

При негоризонтальном расположении проводов высота подвеса гирлянд изоляторов для всех проводов принимается одинаковой и равной их среднеарифметическому значению. В таком случае выражение 2.10 примет вид:

$$h_{iиз} h_{np} \leq \frac{1}{m} \quad (2.12)$$

где:  $h_{iиз}$  – высота крепления  $i$ -ой гирлянды изоляторов на опоре, м;  $m$

– общее число гирлянд изоляторов (проводов) на опоре.

Максимальное значение стрелы провеса провода определяется по формуле

$$f \leq h_{cp} - H_{габ} \leq H_{габ}, \quad (2.13)$$

где:  $h_{пров}$  – высота крепления провода на опоре, м;

$h_{габ}$  – габаритное расстояние до отметки земли, м;

$\Delta h_{габ}$  – запас габарита или поправка на неточность подвеса провода, м.

Габаритное расстояние до отметки земли (габарит линии) регламентируется ПУЭ и определяется в зависимости от номинального напряжения ВЛ.

Запас габарита или поправка на неточность подвеса провода принимается равной 0,3 м при спокойном рельефе и при пролетах длиной менее 300 м, и равной 0,5 м в остальных случаях.

## **7 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы**

Выбор основных конструктивных параметров ВЛ может быть выполнен с использованием программы расчета механических характеристик провода LEP MECH. В этих целях после ввода исходных данных используется блок программы «Выбор конструктивных элементов ВЛ».

После определения исходных данных и выбора конструктивных элементов (в соответствии с Лабораторной работой №1) необходимо выполнить следующие действия:

1. Нажать на кнопку «3. Рассчитать ЦТ». В результате будет рассчитана высота расположения приведенного ЦТ проводов в группе «4.

Расчет ЦТ».

2. Нажать на кнопку «4. Рассчитать коэфф». В результате будут рассчитаны поправочные коэффициенты в группе «5. Расчет поправочных коэффициентов».

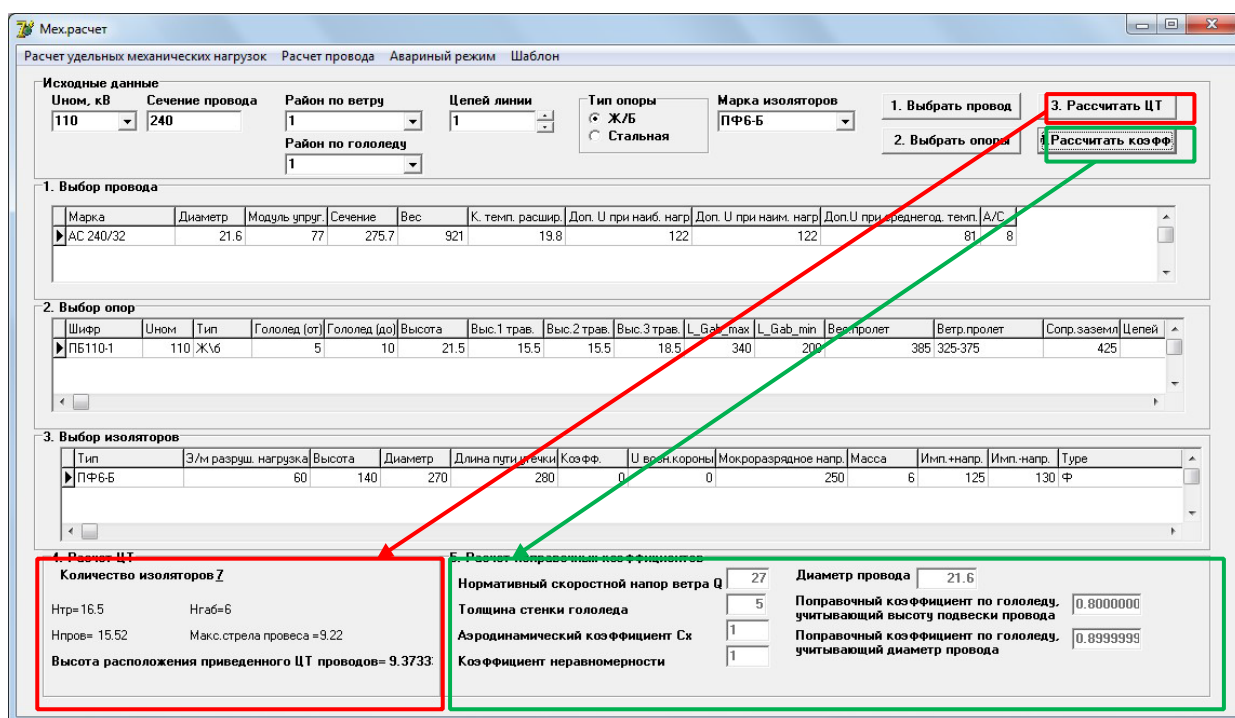


Рисунок 2.6 – Выбор конструктивных элементов ВЛ и расчет поправочных коэффициентов

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности

персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### **Задание**

Исходными данными для выполнения задания на лабораторную работу являются результаты, полученные при выполнении лабораторной работы 1.

#### **Расчетная часть работы**

1. Привести эскиз выбранной при выполнении лабораторной работы №1 промежуточной опоры с указанием ее геометрических размеров  
Результаты представить в таблице 2.1

Таблица 2.1 –Геометрические параметры линии

| Наименование показателя                              | Значение |
|------------------------------------------------------|----------|
| Высота гирлянды, м                                   |          |
| Высота подвески гирлянды изоляторов 1 цепи фазы А, м |          |
| Высота подвески гирлянды изоляторов 2 цепи фазы А, м |          |

|                                                      |  |
|------------------------------------------------------|--|
| Высота подвески гирлянды изоляторов 1 цепи фазы В, м |  |
| Высота подвески гирлянды изоляторов 2 цепи фазы В, м |  |
| Высота подвески гирлянды изоляторов 1 цепи фазы С, м |  |
| Высота подвески гирлянды изоляторов 2 цепи фазы С, м |  |

2. Произвести расчет высоты приведенного центра тяжести на основании формул (2.9–2.13), приведенных в теоретической части. Сведения для определения значений габаритных расстояний до отметки земли приведены в [6]. Результаты расчета представить в таблице 2.2 .

Таблица 2.2 – Определение высоты приведенного центра тяжести трехфазной системы проводов.

| Наименование показателя                                        | Значение |
|----------------------------------------------------------------|----------|
| Средняя высота подвески гирлянды изоляторов, м                 |          |
| Конструктивная высота гирлянды изоляторов, м                   |          |
| Средняя высота подвески проводов трехфазной системы, м         |          |
| Габарит до земли, м                                            |          |
| Запас габарита, м                                              |          |
| Стрела провеса провода, м                                      |          |
| Высота приведенного центра масс трехфазной системы проводов, м |          |

3. Определить коэффициенты, учитывающие изменение нормативного значения толщины стенки гололеда и скоростного напора ветра в соответствии с Приложением 2. Значения поправочных коэффициентов привести в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Выбор поправочных коэффициентов

| Наименование показателя                                                                                                                | Значение |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Высота приведенного центра масс, м                                                                                                     |          |
| Нормативный скоростной напор ветра $q=v^2/16$ даН/м <sup>2</sup>                                                                       |          |
| Диаметр провода, мм                                                                                                                    |          |
| Аэродинамический коэффициент $C_x$ , учитывающий изменение скоростного напора на высоте                                                |          |
| Коэффициент неравномерности $\alpha$ , учитывающий неравномерность скоростного напора ветра в зависимости от его нормативного значения |          |
| Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода                                                               |          |
| Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода                                                                       |          |

4. Рассчитать значение толщины стенки гололеда и скоростного напора ветра ЛЭП и привести их в таблице 2.4

Таблица 2.4 – Расчетные значения ветрового давления и толщины стенки гололеда на высоте приведенного центра масс

| Нормативное значение толщины стенки гололеда/ | Нормативное значение скоростного напора ветра | Обобщенный коэффициент | Расчетная толщина стенки гололеда, мм | Расчетный скоростной напор ветра |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
|                                               |                                               |                        |                                       |                                  |
|                                               |                                               |                        |                                       |                                  |

### Работа с программой

После ввода исходных данных (исходные данные те же, что и в лабораторной работе №1) необходимо выполнить следующие действия:

1. Выбрать провод.
2. Выбрать опоры.
3. Выбрать изоляторы
4. Рассчитать ЦТ
5. Рассчитать коэффициенты. В результате будут рассчитаны поправочные коэффициенты в группе «5. Расчет поправочных коэффициентов».

Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen»

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 2.1-2.4, а также «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные способы расположения проводов на опоре и укажите рекомендации ПУЭ по условиям их применения?
2. . Опишите явление вибрации и пляски проводов в пролетах ВЛ?
3. Назовите способ расположения проводов на опорах, который рекомендован ПУЭ при прохождении трассы ВЛ в особых гололедных районах?
4. Укажите климатические условия, при которых применение опор с горизонтальным расположением проводов является обязательным требованием ПУЭ?
5. Укажите рекомендации ПУЭ по расположению проводов на опорах ВЛ в районах с интенсивной пляской?
6. Опишите смешанной расположение проводов на опорах ВЛ?

7. Поясните на рисунке расположение проводов «елкой», «обратной елкой», «бочкой»?
8. Дайте определение вертикальному и горизонтальному габаритам ВЛ?
9. Поясните на приведенном в лабораторной работе эскизу промежуточной опоры как определяется вертикальный габарит опоры?
10. Перечислите основные конструктивные параметры ВЛ?
11. Дайте определение стрелы провеса провода и габарита ВЛ?
12. Какими требованиями регламентируется минимально допустимое расстояние между фазой линии и стойкой опоры?
13. Каким требованиями регламентируется габарит линии?
14. Приведите алгоритм расчета значения максимальной стрелы провеса провода?
15. Приведите алгоритм расчета центра масс трехфазной системы проводов?
16. Какое значение толщины стенки гололеда соответствует указанному варианту задания номеру гололедного района?
17. Приведите алгоритм определения расчетного значения толщины стенки гололеда?
18. Назовите коэффициенты, учитываемые при определении расчетного значения толщины стенки гололеда, и поясните их физический смысл?
19. Назовите коэффициенты, учитываемые при определении расчетного значения скоростного напора ветра, и поясните их физический смысл?
20. Какое значение скоростного напора ветра соответствует указанному в варианте задания номеру ветрового района?

21. Перечислите климатические параметры, которые учитываются при проектировании ВЛ. Поясните понятия «толщина стенки гололеда» и «скоростной напор ветра»
22. Что называется расчетными климатическими условиями?

**Литература:** 1, 2, 3,4,5,6

### **Лабораторная работа №3 «Расчет удельных механических нагрузок на провода»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний основ расчета механических нагрузок на провода при проектировании, сооружении и эксплуатации ЛЭП

#### **Теоретическая часть**

##### **1 Удельные механические нагрузки на провода и тросы**

На провода и тросы ВЛ действуют механические нагрузки, направленные по вертикали (от собственного веса и гололеда) и по горизонтали (от ветра). В результате в металле проводов возникают напряжения от растяжения. При расчетах на механическую прочность в качестве исходных данных используются удельные механические нагрузки на провода.

Под удельной нагрузкой понимают равномерно распределенную вдоль пролета провода механическую нагрузку, отнесенную к единице длины и поперечного сечения. Удельные нагрузки на провода учитывают механические силы от веса проводов и гололедных образований, а также давление ветра на провода без гололеда или с гололедом и рассчитывают исходя из условия, что нагрузка по длине провода в пролете распределяется равномерно и порывы ветра отсутствуют.

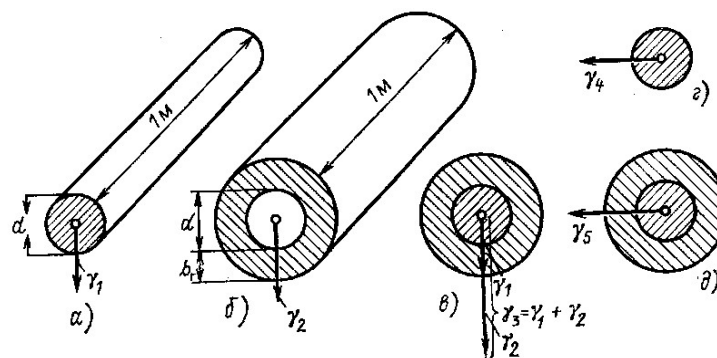


Рисунок 3.1 – Удельные нагрузки: *а* – от веса провода; *б* – от веса гололеда; *в* – от веса провода и гололеда; *г* – от давления ветра на провод; *д* – от давления ветра на провод с гололедом

В расчетах используются следующие удельные нагрузки:

**1). Удельная нагрузка от собственного веса провода (рисунок 3.1,а)**

зависит от его материала и определяется как:

$$\sigma_1 = \frac{G_0}{F_p} \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

где:  $G_0$  – масса 1м провода, кг/м;

**2). Удельная нагрузка от веса гололеда (рисунок 3.1,б).** Под действием ветра, направленного поперек линии, при температуре, близкой к нулю, в начальной стадии образования гололеда происходит одностороннее налипание осадков (рисунок 3.2, а). Силой тяжести этих осадков в средней части пролета провод скручивается, и налипание продолжается на других его сторонах. В результате почти со всех сторон большая часть провода покрывается гололедными образованиями (рисунок 3.2, б) разной толщины и плотности. Толщина этой корки может достигать нескольких сантиметров, а плотность льда изменяется в широких пределах.

При определении нагрузки от веса гололеда все виды обледенения приводят к чистому гололеду цилиндрической формы с плотностью

$g_o=900 \text{ кг/м}^3$ ; считают, что стенка гололеда вокруг провода диаметром  $d$  имеет повсюду одинаковую толщину  $b_o$ .

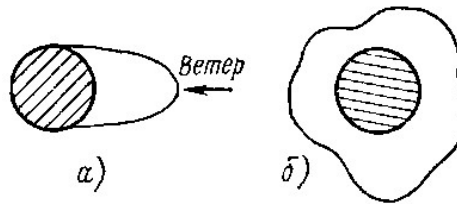


Рисунок 3.2 – Гололедные образования на проводе ВЛ:  $a$  – одностороннее налипание в начальной стадии;  $b$  – гололедное образование со всех сторон провода

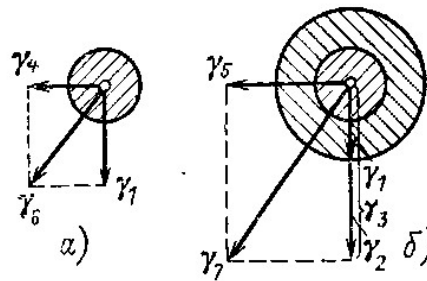


Рисунок 3.3 – Результирующие удельные нагрузки:  $a$  – на провод без гололеда от его веса и давления ветра;  $b$  – от веса провода и гололеда и от давления ветра

$$\gamma_2 = \frac{0,9 \gamma_1 b (d + b)}{(3.2) F_p} \approx 10$$

где:  $b$  – расчетная толщина стенки гололеда, определенная с учетом поправочных коэффициентов;  $d$  – диаметр провода, м.

**3). Удельная нагрузка от собственного веса провода и веса гололеда** (рисунок 3.1,  $b$ ). Обе нагрузки  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  действуют вертикально, т. е. в одном направлении, и складываются арифметически:

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3.3)$$

**4). Удельная нагрузка от давления ветра на провод без гололеда**

(рисунок 3.1, з) :

$$\sigma_4 = \frac{q_{\max \text{ расч}} \cdot d}{F_P} \cdot 10 \quad (3.4)$$

где:  $q_{\max \text{ расч}}$  – расчетное значение скоростного напора ветра, определенное с учетом поправочных коэффициентов.

**5). Удельная нагрузка от давления ветра на провод и гололед** рассчитывается при условиях наличия на проводах гололедных образований и ветровой нагрузке, равной 0,25 максимальной и определяется как:

$$\sigma_5 = \frac{0,25 \cdot q_{\max \text{ расч}} \cdot (d + 2 \cdot b)}{F_P} \cdot 10 \quad (3.5)$$

**6). Суммарная удельная нагрузка на провод от его массы и давления ветра на провод** рассчитывается путем геометрического сложения значений удельной вертикальной нагрузки от собственного веса и удельной горизонтальной нагрузки от давления ветра на провод, свободный от гололеда и определяется как (рисунок 3.2,а)

$$\sigma_6 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_4^2} \quad (3.6)$$

**7). Суммарная удельная нагрузка на провод от массы провода** рассчитывается путем геометрического сложения значений удельной вертикальной нагрузки от веса провода с гололедом и удельной горизонтальной нагрузки от давления ветра на провод с гололедом и определяется как (рисунок 3.2а)

$$\sigma_7 = \sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_5^2} \quad (3.7)$$

## 2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы.

Выбор основных конструктивных параметров ВЛ может быть выполнен с использованием программы расчета механических характеристик провода LEP MECH. В этих целях после ввода исходных данных используется блок программы «Выбор конструктивных элементов ВЛ»

После определения исходных данных необходимо выбрать основные конструктивные элементы (в соответствии с Лабораторной работой №1), рассчитать высоту приведенного ЦТ и поправочные коэффициенты (в соответствии с Лабораторной работой №2).

После определения основных конструктивных элементов ВЛ и расчета поправочных коэффициентов следует выбрать пункт меню «Расчет удельных механических нагрузок» (рисунок 3.4), после чего будет открыта таблица, содержащая значения основных механических нагрузок (рисунок 3.5)

Мех.расчет

Расчет удельных механических нагрузок    Расчет провода    Аварийный режим    Шаблон

Исходные данные

Уном, кВ: 110    Сечение провода: 240    Район по ветру: 1    Цепи линии: 1    Тип опоры: Ж/Б    Марка изоляторов: ПФ6-Б

1. Выберите провод    3. Рассчитать ЦТ

2. Выберите опоры    4. Рассчитать коэфф

1. Выбор провода

| Марка     | Диаметр | Модуль упруг. | Сечение | Вес | К. темп. расшир. | Доп. U при наиб. нагр. | Доп. U при наим. нагр. | Доп. U при средн. темп. | A/C |
|-----------|---------|---------------|---------|-----|------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-----|
| АС 240/32 | 21.6    | 77            | 275.7   | 921 | 19.8             | 122                    | 122                    | 81                      | 8   |

2. Выбор опор

| Шифр    | Уном. | Тип | Гололед (от) | Гололед (до) | Высота | Выс.1 трав. | Выс.2 трав. | Выс.3 трав. | L_Gab_max | L_Gab_min | Вес пролет. | Ветр. пролет. | Сопр. заземл. | Цепей |
|---------|-------|-----|--------------|--------------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------------|---------------|-------|
| ПБ110-1 | 110   | Ж/Б | 5            | 10           | 21.5   | 15.5        | 15.5        | 18.5        | 340       | 200       | 385         | 325-375       | 425           |       |

3. Выбор изоляторов

| Тип   | Э/м разрыв. нагрузка | Высота | Диаметр | Длина пути утечки | Козфф. | U возм. короны | Мокроразрядное напр. | Масса | Имп. напр. | Имп. напр. | Туре  |
|-------|----------------------|--------|---------|-------------------|--------|----------------|----------------------|-------|------------|------------|-------|
| ПФ6-Б |                      | 60     | 140     | 270               | 280    | 0              | 0                    | 250   | 6          | 125        | 130 Ф |

4. Расчет ЦТ

Количество изоляторов Z

Нтр= 16.5    Нгаб=6

Нпров= 15.52    Макс. стрела провеса = 9.22

Высота расположения приведенного ЦТ проводов= 9.3733

5. Расчет поправочных коэффициентов

Нормативный скоростной напор ветра Q: 27

Толщина стенки гололеда: 5

Аэродинамический коэффициент Cx: 1

Коэффициент неравномерности: 1

Диаметр провода: 21.6

Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000

Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999

Рисунок 3.4 – Главное окно программы

**Исходные данные**

Уном, кВ: 110    Сечение провода: 240    Район по ветру: 1    Цепей линии: 1    Тип опоры: Ж/Б    Марка изоляторов: ПФ6-Б

**Расчет удельных механических нагрузок**

| Наименование нагрузки                                                               | Единичная нагрузка, даН/м | Удельная нагрузка даН/(м <sup>2</sup> мм <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1. От собственного веса                                                             | 0.921                     | 0.0033                                                  |
| 2. От веса гололеда                                                                 | 0.3759                    | 0.0014                                                  |
| 3. Суммарная от собственного веса и веса гололеда                                   | 1.2969                    | 0.0047                                                  |
| 4. От давления ветра                                                                | 0.5832                    | 0.0021                                                  |
| 5. От давления ветра при гололеде                                                   | 0.2133                    | 0.0008                                                  |
| 6. Результирующая от собственного веса и давления ветра                             | 1.0901                    | 0.004                                                   |
| 7. Результирующая от собственного веса, веса гололеда и давления ветра при гололеде | 1.3143                    | 0.0048                                                  |

**4. Расчет ЦТ**  
Количество изоляторов Z: Нтр=16.5    Нгаб=6    Нпров=15.52    Макс.стрела провеса=9.22    Высота расположения приведенного ЦТ проводов=9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**  
Нормативный скоростной напор ветра Q: 27    Диаметр провода: 21.6  
Толщина стенки гололеда: 5    Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000  
Аэродинамический коэффициент Cx: 1    Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999  
Коэффициент неравномерности: 1

Рисунок 3.5 – Расчет удельных механических нагрузок

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических

розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### Задание

Исходные данные для выполнения задания на лабораторную работу определены при выполнении лабораторных работ № 1 и № 2.

### Расчетная часть

В соответствии с приведенными теоретической части расчетными формулами произвести расчет значений удельных механических нагрузок на провода для всех климатических режимов. Исходные данные и результаты расчета представить в таблицах 3.1–3.2.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета удельных механических нагрузок

| № | Наименование показателя                                              | Значение |
|---|----------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | Масса провода $G_0$ , кг                                             |          |
| 2 | Расчетное сечение провода $F$ , мм <sup>2</sup>                      |          |
| 3 | Диаметр провода $d$ , мм                                             |          |
| 4 | Расчетная толщина стенки гололеда $b$ , мм                           |          |
| 5 | Расчетное значение скоростного напора ветра $q$ , даН/м <sup>2</sup> |          |

Таблица 3.2 – Расчет удельных механических нагрузок

| № | Наименование показателя                                                         | Расчетная формула                        | Значение показателя |
|---|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| 1 | Удельная нагрузка от собственного веса провода $\gamma_1$ , даН/мм <sup>2</sup> | $\gamma_1 = \frac{G \cdot 10^{-3}}{F_p}$ |                     |

|   |                                                                                                                |                                                                           |  |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--|
| 2 | Удельная нагрузка от веса гололеда $\gamma_2$ , даН/мм <sup>2</sup>                                            | $\gamma_2 \frac{0,9 \pi d b (d + b)}{F_p} \cdot 10^3$                     |  |
| 3 | Удельная нагрузка от собственного веса провода и веса гололеда $\gamma_3$ , даН/мм <sup>2</sup>                | $\gamma_3 \pi d^2$                                                        |  |
| 4 | Удельная нагрузка от давления ветра на провод без гололеда $\gamma_4$ , даН/мм <sup>2</sup>                    | $\gamma_4 \frac{q_{\max \text{ расч}} d}{F_p} \cdot 10^3$                 |  |
| 5 | Удельная нагрузка от давления ветра на провод и гололед $\gamma_5$ , даН/мм <sup>2</sup>                       | $\gamma_5 \frac{0,25 q_{\max \text{ расч}} \pi (d + 2b)}{F_p} \cdot 10^3$ |  |
| 6 | Суммарная удельная нагрузка на провод от его массы и давления ветра на провод $\gamma_6$ , даН/мм <sup>2</sup> | $\gamma_6 \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{4} + \gamma_4^2}$                       |  |
| 7 | Суммарная удельная нагрузка на провод от массы провода $\gamma_7$ , даН/мм <sup>2</sup>                        | $\gamma_7 \sqrt{\frac{\gamma_3^2}{4} + \gamma_5^2}$                       |  |

## Работа с программой

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, №2 необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы»

Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen»

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 3.1 –3.2 а также «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте определение удельной механической нагрузки на провод (трос)?
2. Поясните, на основании каких данных рассчитывается удельная механическая нагрузка на провод(трос)?
3. Перечислите горизонтальные механические нагрузки, действующие на провод(трос)?
4. Перечислите вертикальные механические нагрузки, действующие на провод(трос)?
5. Как определяется удельная нагрузка на провод, покрытый гололедом при наличии ветра?
6. Опишите процесс образования гололеда на проводах ВЛ?
7. Назовите единицу измерения удельной механической нагрузки?

8. Назовите допущения, которые принимаются при расчете удельной нагрузки от веса гололеда?
9. Укажите, какое значение скоростного напора ветра принимается при расчете удельной механической нагрузки на провод, покрытый гололедом, при наличии ветра?
10. Назовите начальную температуру образования гололеда?
11. Как влияет величина площади поперечного сечения стальной части провода на значение удельной механической нагрузки от собственного веса?
12. Определите, у какого из сталеалюминиевых проводов с марками АС-240/32 и АС-240/56 удельная нагрузка от собственного веса больше?
13. Назовите климатические режимы, при которых нагрузка на провода(тросы) имеет наибольшее значение?
14. Какой вид сложения используется при определении суммарной нагрузки на провод, покрытый гололедом?
15. Какой вид сложения используется при определении суммарной нагрузки на провод в режиме максимальных ветровых нагрузок?
16. При расчете удельных нагрузок на провода используются:
  - а) расчетное значение толщины стенки гололеда?
  - б) нормативное значение толщины стенки гололеда?
17. Поясните физический смысл формулы для определения удельной нагрузки от веса гололеда на проводе при отсутствии ветра?
18. Поясните физический смысл формулы для определения удельной нагрузки давления ветра на провод при отсутствии гололеда?
19. Перечислите нагрузки, которые испытывает провод в процессе его эксплуатации?

20. Покажите графическую интерпретацию расчета суммарных удельных механических нагрузок?

**Литература:** 1, 2, 3

## Лабораторная работа 4 «Определение критических пролетов и критической температуры»

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний основ метода допустимых напряжений, а также, навыков расчета критических пролетов и критической температуры, необходимых для определения условий монтажа проводов при сооружении ВЛ.

### Теоретическая часть

#### 1 Длина провода в пролете

Провод в пролете, подвешенный в двух точках, можно рассматривать как идеальную гибкую нить или цепную линию. Представление провода в виде гибкой нити соответствует трем допущениям:

- провод обладает идеальной гибкостью, т.е. не растягивается;
- вес провода равномерно распределен по его длине;
- на провод в любой точке действует сила тяжения, направленная по касательной к кривой провисания провода.

При пролетах до 500 – 700 м стрелу провеса упрощенно определяют по уравнению параболы:

$$f \approx \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0} \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  – удельная нагрузка на провод при данных климатических условиях;

$\sigma_0$  – напряжение в низшей точке провода при удельной нагрузке  $\gamma$  и тех же климатических условиях;  $l$  – длина пролета, м.

Длина провода в пролете при  $l$  до 500 – 700 м определяется упрощенным выражением:

$$L \approx l \approx \frac{\rho_2 l_{3_2}}{24 \rho_0} \quad (4.2)$$

## 2 Напряжения провода при разных климатических условиях (уравнение состояния провода)

Расчет ВЛ по условиям механической прочности включает определение напряжений проводов при различных условиях их работы. При изменении климатических условий меняются удельные нагрузки  $\rho$ , температура провода  $t$  и напряжение в его материале  $\sigma$ . Для определения механического напряжения  $\sigma$  при разных климатических условиях используют уравнение состояния провода, которое связывает параметры  $\rho$ ,  $t$  и  $\sigma$  при двух разных климатических условиях.

Если обозначить первые из них индексом  $m$ , а вторые индексом  $n$ , то при помощи уравнения состояния можно по заданным исходным условиям  $\rho_m, t_m$  и  $\sigma_m$  определить напряжение в материале провода  $\sigma_n$  при новых изменившихся условиях  $\rho_n, t_n$ .

Пусть длина провода при условиях  $m$  равна  $L_m$ . При изменении температуры от  $t_m$  до  $t_n$  длина провода изменится на величину

$$\Delta L_1 \approx L_m \alpha (t_n - t_m) \quad (4.3)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала провода, град<sup>-1</sup>.

При изменении напряжения в материале провода от  $\sigma_m$  до  $\sigma_n$  длина провода в соответствии с законом Гука изменится на величину:

$$L^m$$

$$\Delta L_2 = \frac{\sigma_n^2}{E} (\Delta L_1 + \Delta L_m) \quad (4.4)$$

где  $E$  – модуль упругости провода, даН/мм<sup>2</sup>.

Новая длина провода  $L_n$  при условиях  $n$ :

$$L_n = L_m + \Delta L_1 + \Delta L_2. \quad (4.5)$$

Подставив в последнее уравнение длины провода  $L_n$  и  $L_m$ , с учетом (4.3) и (4.4) получим:

$$l = 24 \sigma_n^2 \overline{L_n} + \frac{\sigma_n^2}{E} \overline{L_m} + \frac{\sigma_n^2}{E} L_m + \sigma_n t_n + t_m + LE_m \sigma_n + \sigma_n. \quad (4.6)$$

В последнем уравнении, и в дальнейшем, подразумеваются напряжения провода в низшей точке. Учитывая, что длина провода  $L_m$  очень мало отличается от длины пролета  $l$ , заменив в последнем выражении  $L_m$  на  $l$ , получим уравнение состояния провода в пролете:

$$\sigma_n = \frac{E \sigma_n^2 l}{24 \sigma_n} + \frac{E 24 \sigma_n^2 l}{24 \sigma_n} + \sigma_n t_n + t_m. \quad (4.7)$$

При известных климатических условиях  $m$ , т. е. при известных  $\gamma_m, t_m, \sigma_m$ , уравнение состояния провода является кубическим относительно неизвестного  $\sigma_n$  для заданных новых климатических условий  $\gamma_n, t_n$ :

$$\sigma_n^3 + A \sigma_n^2 + B \sigma_n = 0 \quad (4.8)$$

где  $A$  и  $B$  – числовые коэффициенты, получающиеся при подстановке в (4.7) всех пяти указанных выше известных величин –  $\gamma_m, t_m, \sigma_m, \gamma_n, t_n$ .

Обычно в качестве известных климатических условий  $m$  в (4.7)

выбираются такие, при которых напряжение в материале провода  $\sigma_m$  является наибольшим. Это наибольшее напряжение принимается равным допустимому  $[\sigma]$ . Подставив в правую часть (4.7) допустимое напряжение  $[\sigma]$ , а также удельную нагрузку  $\gamma_{[\sigma]}$  и температуру  $t_{[\sigma]}$ , соответствующие условиям, при которых в проводе возникает наибольшее напряжение, можно из (4.7) найти напряжение провода в условиях монтажа ВЛ.

### 3 Критическая длина пролета

Наибольшие напряжения в однородном (монометаллическом) проводе могут возникнуть в следующих климатических условиях:

- 1) при наибольшей нагрузке;
- 2) при наименьшей температуре воздуха.

Наибольшая нагрузка обычно возникает при гололеде с ветром. Расчетная температура при гололеде равна - 5°C. Условия, соответствующие наибольшей нагрузке будут соответственно  $\gamma_{\text{нб}}$ ,  $t_{\text{нб}}$  и  $\sigma_{\text{нб}}$ .

При наименьшей температуре  $t_{\text{нм}}$  обычно нет гололеда и ветра, и на провод действует только удельная нагрузка от его веса  $\gamma_1$ .

При низкой температуре провод сжимается, и в нем возникают большие напряжения  $\sigma_{\text{нм}}$ .

Соотношение напряжений при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре зависит от длины пролета  $l$ . Для анализа влияния температуры и нагрузки на провод в зависимости от длины пролета следует воспользоваться уравнением состояния провода (4.7). Подставив в (4.7)  $l \rightarrow 0$  получим:

$$\sigma_n = \sigma_m - \alpha E(t_n - t_m) \quad (4.8)$$

Из последнего уравнения видно, что при малых длинах пролета наибольшее влияние на напряжение оказывает температура, а нагрузки не оказывают существенного влияния. При малых  $l$  наибольшее напряжение будет при наименьшей температуре:  $\sigma_{\text{нб}} = \sigma_{\text{нм}}$ .

Если подставить в (4.7)  $l \rightarrow \infty$ , то, разделив на  $l^2$ , получим:

$$\frac{E\sigma_{n2}}{24\sigma_n} - \frac{E\sigma_{m2}}{24\sigma_m} = 0 \quad (4.9)$$

При больших длинах пролета наибольшее влияние на напряжение оказывает нагрузка, а температура не оказывает существенного влияния.

При больших значениях  $l$  наибольшее напряжение будет при наибольшей нагрузке:  $\sigma_{нб} = \sigma_{\gamma нб}$

**Критическая длина пролета  $l_{кр}$**  – это такая длина, при которой напряжение при наибольшей нагрузке равно напряжению при наименьшей температуре.

Выражение для  $l_{кр}$  можно получить из уравнения (4.7), если принять наибольшее напряжение равным допустимому. Для монометаллического провода:

$$l_{кр} = \sqrt{\frac{24\sigma_{нб}^2 t_{нб}^2}{\sigma_{нб}^2 - \sigma_1^2}} \quad (4.9)$$

Если длина пролета меньше критической, то наибольшее напряжение будет равно допустимому при наименьшей температуре. Если длина пролета больше критической, то наибольшее напряжение будет равно допустимому при наибольшей нагрузке.

#### 4 Критическая температура

Расчет ВЛ по условиям механической прочности включает определение наибольшей стрелы провеса провода. При любых климатических условиях наибольшая стрела провеса не должна быть больше, чем  $f_{нб}$ , определенная по высоте опоры  $H$  и габариту линии  $h_{г}$ . Наибольшие стрелы провеса могут

возникнуть в следующих климатических условиях: 1) при наибольшей температуре воздуха; 2) при гололеде без ветра.

При наибольшей расчетной температуре  $t_{нб} = +40^{\circ}\text{C}$  нет ветра и провод испытывает нагрузку только от своего веса, но из-за температурного удлинения стрела провеса велика.

При гололеде без ветра на провод действует нагрузка от веса провода и гололеда при температуре образования гололеда  $-5^{\circ}\text{C}$  (в некоторых случаях – от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$ ).

Выяснить, при каком из двух условий будет наибольшая стрела провеса – при наибольшей температуре или при гололеде без ветра, можно с помощью так называемой критической температуры. При критической температуре провод при нагрузке собственным весом ( $\gamma_1$ ) будет иметь ту же стрелу провеса, что и при гололеде без ветра ( $\gamma_3$ ). При критической температуре:  $f_{\theta_{кр}} = f_3$ . При гололеде без ветра стрела провеса равна  $\Delta_3 l_2$

$$f_3 = \frac{\Delta_3 l_2^2}{8 \Delta_3} \quad (4.10)$$

При критической температуре стрела провеса равна  $\Delta_1 l_2$

$$f_{\theta_{кр}} = \frac{\Delta_1 l_2^2}{8 \Delta_1} \quad (4.11)$$

Из (4.10) и (4.11) следует, что при критической температуре:  $\sigma_1 = \sigma_3$ .

Подставив это выражение в уравнение состояния провода (4.7) и приняв в качестве условий  $n \gamma_1, t_1, \sigma_1$  а в качестве условий  $m \gamma_3, t_{кр}, \sigma_3$ , получим следующее выражение для критической температуры:

$$t_{кр} = t_c + \frac{E^3}{10^6} \left( \frac{\Delta_1}{\Delta_3} \right)^{1/3} \quad (4.12)$$

Если наибольшая температура воздуха в данной местности больше критической, то наибольшая стрела провеса будет при  $t_{нб}$ , а не при гололеде без ветра. Если наибольшая температура воздуха меньше критической, то наибольшая стрела провеса ВЛ в данной местности будет при гололеде без ветра, а не при наибольшей температуре.

## 5 Допустимые напряжения и расчет по среднегодовым условиям

Пределом прочности при растяжении  $\sigma_n$  называется наибольшее напряжение растяжения, которое провод выдерживает, не разрушаясь. Допустимое напряжение  $[\sigma]$  принимается значительно меньше, чем предел прочности провода при растяжении  $\sigma_n$ , т. е.

$$[\sigma] \leq \frac{\sigma_n}{n}, \quad (4.13)$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности.

При расчете ВЛ проверяется наибольшее напряжение провода, которое должно быть не больше, чем допустимое напряжение  $\sigma_{доп}$  при наибольшей нагрузке или наименьшей температуре. Кроме наибольшего напряжения рассчитывается напряжение в проводе при среднегодовых условиях  $\sigma_{сг}$ , т. е. при среднегодовой температуре  $t_{сг}$  и удельной нагрузке от веса  $\gamma_1$ . Напряжение  $\sigma_{сг}$  должно быть не больше, чем допустимое при среднегодовой температуре  $\sigma_{допсг}$ . Условие  $\sigma_{сг} \leq \sigma_{допсг}$  гарантирует предотвращение износа материала провода от усталости из-за вибраций в нем.

При обтекании провода воздушным потоком возникает составляющая давления ветра, направленная то вверх, то вниз. Происходит вибрация провода. На напряжение растяжения материала накладывается дополнительное знакопеременное напряжение изгиба. Это приводит к усталости материала. Предел усталости - это наибольшее напряжение, которое

выдерживает провод, не разрушаясь при знакопеременных нагрузках. Для того чтобы не происходили изломы проволок провода, результирующее напряжение, равное сумме напряжений тяжения и изгиба, должно быть меньше предела усталости. нормированное значение  $\sigma_{допст}$  меньше, чем предел усталости с учетом коэффициента запаса. Предел усталости меньше предела прочности при растяжении и  $\sigma_{допст}$  меньше, чем  $\sigma_{доп}$ .

Таким образом, напряжения провода рассчитывают для трех условий:

- 1) наибольшей удельной нагрузки  $\gamma_{нб}$ ; 2)
- наименьшей температуры воздуха  $t_{нм}$ ;
- 3) среднегодовых условий  $t_{сг}$  и  $\gamma_1$ .

Для предотвращения или снижения вибраций к проводам подвешиваются гасители вибрации или демпфирующие петли из провода той же марки. К проводам небольших сечений (марки А – F  $\leq 95 \text{ мм}^2$ , марки АС – F  $\leq 70 \text{ мм}^2$ ) вблизи от мест их крепления к изоляторам следует подвешивать демпфирующие петли, а к алюминиевым проводам с  $F > 95 \text{ мм}^2$ , талеалюминиевым с  $F > 70 \text{ мм}^2$  и к стальным тросам – гасители вибрации с грузами.

## 6 Три критических пролета

При расчете проводов в качестве исходного (начального) можно принимать любое состояние, характеризующееся любой нагрузкой и температурой. Однако при монтаже проводов напряжения в них не должны превышать соответствующих допустимых напряжений для режимов максимальной нагрузки, низшей и среднегодовой температур. Чтобы выполнить это условие, целесообразно при расчете в качестве исходного принять одно из состояний, в котором напряжение может быть равным допустимому. При этом достаточно выбрать правильно один из трех ограничивающих режимов.

. Граничный пролет, при котором влияние температуры и нагрузки на напряжение в проводе оказывается равноопасным, называется критическим.

**Первый критический пролет** – это пролет такой длины, при котором напряжение в проводе в режиме среднегодовой температуры равно допустимому при среднегодовой температуре  $\sigma_{сг}$ , а в режиме низшей температуры – допустимому напряжению при низшей температуре  $\sigma_{нм}$ .

**Второй критический пролет** – это пролет, при котором напряжение в проводе при наибольшей нагрузке равно допустимому напряжению при наибольшей нагрузке  $\sigma_{нб}$ , а в режиме низшей температуры – допустимому напряжению при низшей температуре  $\sigma_{нм}$ .

**Третий критический пролет** – это пролет, при котором напряжение в проводе при среднегодовой температуре достигает допустимого при среднегодовой температуре  $\sigma_{сг}$ , а в режиме максимальной нагрузки равно допустимому при максимальной нагрузке  $\sigma_{нб}$ .

Исходный режим определяется из соотношения критических пролетов и принятого в расчете габаритного пролета.

Для вычисления значений критического пролета между любыми двумя режимами необходимо подставить в уравнение (4.7) значение напряжений, нагрузок и температур, соответствующее этим режимам, и решить это уравнение относительно длины пролета  $l$ . Индексы (1,11) соответствуют любым двум рассматриваемым режимам:

$$l_{кр} = \sqrt{\frac{\sigma_{111} \sigma_{11} t_{11} t_{12}}{\sigma_{12} E (\sigma_{111} \sigma_{11} - \sigma_{12} \sigma_{11})}} \quad (4.14)$$

При ограничении напряжения в проводе по трем режимам в общем случае существуют три критических пролета.

$$l_{1кр} = \sqrt{\frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1} + \frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1} + \frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1}} \quad (4.15)$$

$$l_{2кр} = 4,9 \sqrt{\frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1}} \quad (4.16)$$

$$l_{3кр} = \sqrt{\frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1} + \frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1} + \frac{E t_{нм} (t_{сг} - t_{нм})}{\sigma_1}} \quad (4.17)$$

## 7 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы.

Для выполнения расчета критических пролетов необходимо определить основные конструктивные элементы ВЛ (Лабораторная работа №1), выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2) и расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3). Только после этого можно выполнить расчет критических пролетов. Для этого необходимо:

- 1) выбрать пункт меню «Расчет провода»;
- 2) занести данные по температурному режиму;
- 3) нажать кнопку «Рассчитать критические пролеты» (рисунок 4.3), после чего будут рассчитаны напряжение провода и стрела провеса в различных режимах.

**Мех.расчет**  
Расчет удельных механических нагрузок

Исходные данные:  
 Уном, кВ: 110  
 Сечение провода: 240  
 Район по ветру: 1  
 Район по гололеду: 1  
 Цепей линии: 1  
 Тип опоры: ☒ Ж/Б ☐ Стальная  
 Марка изоляторов: ПФ6-Б

1. Выбрать провод 3. Рассчитать ЦТ  
 2. Выбрать опоры 4. Рассчитать коэфф.

**Определение критических пролетов** (2)  
 Tmax: 40 Tгол: -5  
 Tmin: -40 Тср.год: 0

Рассчитать критические пролеты (3)  
 Первый критический пролет: 255.9078  
 Второй критический пролет: 462.7156  
 Третий критический пролет: 1.3 минимый  
 Режим: низких температур Исходный

Систематический расчет провода

| Расчетный режим | Сочетание климатических условий              | Напряжение пров. | Стрела провеса |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1               | Гололед, t=-5, скоростной напор ветра 0,25q  | 12.2             | 1.9538         |
| 2               | Гололед, t=-5, ветра нет                     | 9.2331           | 2.5474         |
| 3               | Гололеда нет, t=-5, скоростной напор ветра q | 8.6088           | 1.9402         |
| 4               | Гололеда нет, t среднегод.в, ветра нет       | 7.6114           | 2.1945         |
| 5               | Гололеда нет, t=+15, ветра нет               | 6.3755           | 2.6199         |
| 6               | Гололеда нет, t низшая, ветра нет            | 12.1999          | 1.3691         |
| 7               | Гололеда нет, t максимальная, ветра нет      | 4.9309           | 3.3874         |

Коэффициенты запаса: поддерживающих гирлянд изоляторов; натяжных гирлянд изоляторов  
 n1=10.948>=2,7 n1=1.777 >=2,7  
 n2=15.129>=5 n2=2.6739>=5

4. Расчет ЦТ  
 Количество изоляторов: 7  
 Нтр=16.5 Нгаб=6  
 Нпров= 15.52 Макс. стрела провеса =9.22  
 Высота расположения приведенного ЦТ проводов= 9.3733

5. Расчет поправочных коэффициентов  
 Нормативный скоростной напор ветра Q: 27 Диаметр провода: 21.6  
 Толщина стенки гололеда: 5 Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000  
 Аэродинамический коэффициент Сх: 1 Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999  
 Коэффициент неравномерности: 1

Граф. Закреть

Рисунок 4.3 – Расчет провода

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу

лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### Задание

Исходными данными для расчета критических пролетов и критической температуры являются результаты, полученные в лабораторных работах 1,2 и 3. Исходные данные следует представить в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета критических пролетов.

| №  | Наименование показателя                                                  | Обозначение   | Единица измерения     | Значение показателя |
|----|--------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|
| 1. | Нормативное допускаемое напряжения провода при наибольшей нагрузке       | $\sigma_{нб}$ | даН/м*мм <sup>2</sup> |                     |
| 2. | Нормативное допускаемое напряжения провода при минимальной температуре   | $\sigma_{нм}$ | даН/м*мм <sup>2</sup> |                     |
| 3. | Нормативное допускаемое напряжения провода при среднегодовой температуре | $\sigma_{сг}$ | даН/м*мм <sup>2</sup> |                     |
| 4. | Габаритный пролет                                                        | $L_{рас}$     | м                     |                     |
| 5. | Модуль упругости провода                                                 | $E$           | даН/мм <sup>2</sup>   |                     |
| 6. | Температурный коэффициент линейного расширения                           | $\alpha$      | град <sup>-1</sup>    |                     |
| 7. | Минимальная температура                                                  | $t_{нм}$      | град                  |                     |
| 8. | Температура образования гололеда                                         | $t_{гол}$     | град                  |                     |
| 9. | Среднегодовая(среднеэксплуатационная) температура                        | $t_{сг}$      | град                  |                     |

|     |                                                                                                                                                     |                       |                       |  |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 10. | Удельная нагрузка от собственного веса провода                                                                                                      | $\gamma_1$            | даН/м*мм <sup>2</sup> |  |
| 11. | Удельная нагрузка от веса провода с гололедом, находящимся под действием ветра (Удельная нагрузка от веса провода, находящимся под действием ветра) | $\gamma_7 (\gamma_6)$ | даН/м*мм <sup>2</sup> |  |

### Расчетная часть

1. Используя приведенные в разделе 6 расчетные выражения, рассчитать значения трех критических пролетов. Данные, полученные при выполнении п.1 задания привести в таблице 4.2

Таблица 4.2– Расчет критических пролетов

| №  | Наименование показателя      | Расчетная формула | Значение показателя |
|----|------------------------------|-------------------|---------------------|
| 1. | Первый критический пролет, м |                   |                     |
| 2. | Второй критический пролет, м |                   |                     |
| 3. | Третий критический пролет, м |                   |                     |

2. В соответствии с расчетным выражением, приведенным в разделе 3 рассчитать и привести в таблице 4.3 значение критической температуры.

Таблица 4.3– Расчет критической температуры

| №  | Наименование показателя | Расчетная формула | Значение показателя |
|----|-------------------------|-------------------|---------------------|
| 1. | Критическая температура |                   |                     |

3. Определить исходный режим на основании соотношений значений рассчитанных трех критических и габаритного пролета. Результаты представить в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчет исходного режима

| Случай | Соотношение расчетного и критического пролетов            | Исходные напряжения                      | Расчетный критический пролет |
|--------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| 1      | $L_{1кр} \leq L_{2кр} \leq L_{3кр}$                       | $\sigma_{нм} ; \sigma_{сг}; \sigma_{нб}$ | $L_{1к}$ И $L_{3кр}$         |
| 2      | $L_{1кр} \geq L_{2кр} \geq L_{3кр}$                       | $\sigma_{нм} ; \sigma_{нб}$              | $L_{2кр}$                    |
| 3      | $L_{1кр} \text{ мнимый } L_{2кр} \leq L_{3кр}$            | $\sigma_{сг}; \sigma_{нб}$               | $L_{3кр}$                    |
| 4      | $L_{3кр} \text{ мнимый или имеет очень большое значение}$ | $\sigma_{нм} ; \sigma_{сг}$              | $L_{1к}$                     |

### Работа с программой

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, №2, №3 необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «7 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen».

### Содержание отчёта

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 4.1 – 4.4, «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите допущения, принимаемые при представлении провода в виде идеальной гибкой нити?
2. Приведите уравнение стрелы провеса в пролетах обычной длины и поясните его физический смысл?
3. Приведите уравнение длины провода в пролете обычной длины и поясните его физический смысл?
4. Поясните, как влияет изменение параметров климатического режима на механическое напряжение в проводе?
5. Поясните физический смысл уравнения состояния провода и основные положения, лежащие в основе его получения?
6. Опишите процесс растяжения (сжатия) провода при изменении механической нагрузки, и покажите постоянную, которая учитывает это изменение?
7. Опишите процесс растяжения (сжатия) провода при изменении температуры и покажите постоянную, которая учитывает это изменение?
8. Дайте определение модуля упругости провода, назовите единицу его измерения и поясните его физический смысл?
9. Дайте определение коэффициента температурного расширения провода, назовите единицу его измерения и поясните его физический смысл?

10. Назовите переменные параметры режима, входящие в уравнение состояния провода?
11. Назовите постоянные параметры режима, входящие в уравнение состояния провода?
12. Какие климатические режимы представляют наибольшую опасность нарушения механической прочности провода? Назовите параметры каждого из них?
13. В каких климатических режимах стрела провеса достигает наибольших значений? Назовите параметры каждого из них.
14. Как влияет длина пролета на угрозу нарушения его механической прочности?
15. Поясните влияние температуры и нагрузок на механическую прочность провода?
16. Какое значение механического напряжения принимается в качестве исходного при расчете провода методом допустимых напряжений?
17. Какие параметры режима связывает уравнение состояния провода?
18. Опишите алгоритм определения механических напряжений в проводе с помощью уравнения состояния провода?
19. Поясните понятие «критический пролет» и «критическая температура»?
20. Сформулируйте суть метода трех критических пролетов?
21. Какие требования при эксплуатации провода необходимо соблюдать для предотвращения износа его материала от усталости вследствие вибрации?
22. Сформулируйте понятие «допустимое напряжение» для провода заданной марки и укажите требования к условиям его работы в режиме среднегодовых температур

**Литература:** 1, 2, 3

## **Лабораторная работа 5 «Исследование зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов основ метода критических пролетов и навыков выбора исходного режима, необходимого при определении механических характеристик провода для различных климатических режимов.

### **Теоретическая часть**

#### **1 Графическая интерпретация метода трех критических пролетов**

Для пояснения способа расчета сталеалюминиевых проводов методом трех критических пролетов предположим сначала, что расчет ведется в соответствии с уравнением состояния провода только для второго критического пролета.

В этом случае следует вести расчет для всех критических пролетов, значения длин которых меньше значения длины второго критического пролета, исходя из значения допускаемого напряжения при низшей температуре, а для всех пролетов, значения длин которых больше него, исходя из значений допускаемых напряжений при наибольшей нагрузке.

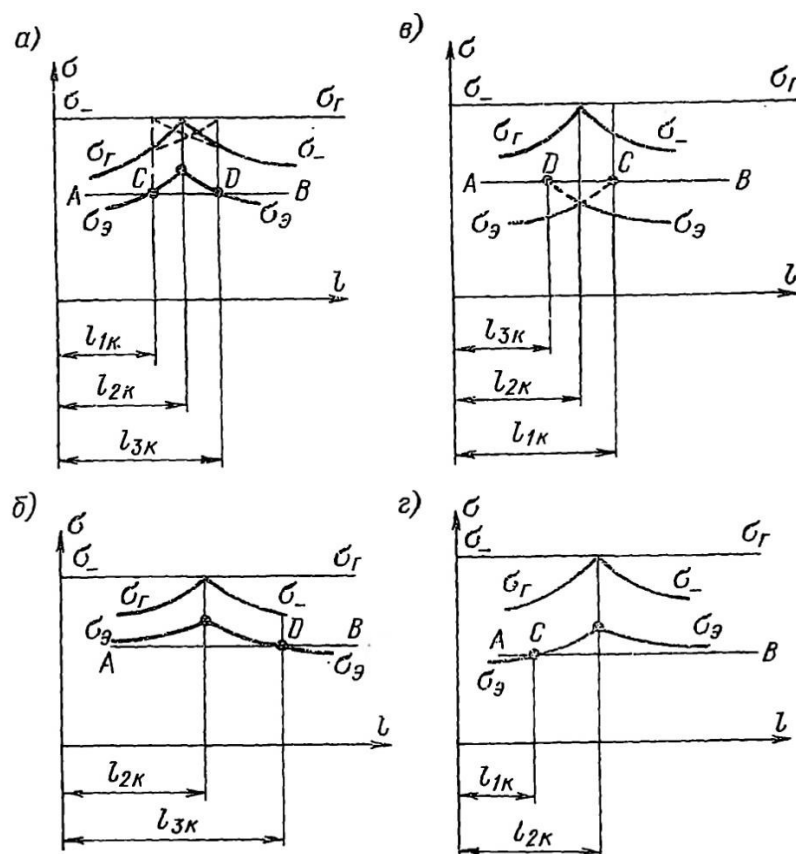


Рисунок 5.1 – Кривые зависимости напряжения в проводе от длины пролета

Для построения кривой зависимости напряжения в проводе от длины пролета на графике (рисунке 5.1 (а)) обозначается значение второго критического пролета  $l_{2кр}$ . Для пролетов, значение длин которых меньше значения  $l_{2кр}$ , на графике наносится горизонталь с ординатой  $\sigma_{нм} = \sigma_{допнм}$ , а для пролетов, значение длин которых больше значения  $l_{2кр}$ , горизонталь с ординатой  $\sigma_{нб} = \sigma_{доп нб}$ . Так как допустимые напряжения  $\sigma_{допнм} = \sigma_{нб}$  имеют одинаковые значения, эти ординаты одинаковы и являются исходными для соответствующих диапазонов длин пролетов. Далее для нескольких значений длин пролетов  $l < l_{2кр}$  по уравнению состояния провода вычисляются значения  $\sigma_{нб}$  и строится зависимость  $\sigma_{нб} = f(l)$ . Аналогичным образом для нескольких значений длин пролетов  $l > l_{2кр}$  по уравнению состояния провода вычисляются значения  $\sigma_{нм}$  и строится график  $\sigma_{нм} = f(l)$ . Если бы не существовало ограничений по  $\sigma_{сг}$ , то можно было продолжить расчет для всех требуемых режимов, исходя

из соответствующих диапазонов длин пролетов из напряжений  $\sigma_{\text{допнб}}$  или  $\sigma_{\text{допнм}}$ . Однако, согласно ПУЭ, эксплуатационное напряжение в проводе не должно превышать своего допустимого значения для всех диапазонов длин пролетов, поэтому следует проверить, выдерживается ли это условие.

Для этого вычисляются значения эксплуатационных напряжений  $\sigma_3$  для нескольких длин пролетов  $l < l_{2кр}$  и  $l > l_{2кр}$  и строится кривая  $\sigma_{сг} = f(l)$ . На графике проводится горизонталь АВ с ординатой  $\sigma_{сгдоп}$ . Если кривая  $\sigma_3 = f(l)$  пересекает горизонталь АВ, то точки пересечения С и D будут определять значения критических пролетов  $l_{1кр}$  и  $l_{3кр}$ . Действительно, в точке С напряжения в проводе достигают своих допустимых значений при среднегодовой температуре и наименьшей температуре (первый критический пролет), а в точке D – при среднегодовой температуре и гололеде (третий критический пролет). На участке графика левее точки С и правее точки D, значения  $\sigma_3$ , вычисленные на основании допустимых значений  $\sigma_-$  и  $\sigma_{гол}$ , не превышают допустимое значение  $\sigma_{доп}$ , что соответствует требованиям ПУЭ. Это означает, что для всех пролетов, длина которых соответствует этим диапазонам, т.е.  $l < l_{1кр}$  и  $l > l_{3кр}$  напряжения в проводе должны вычисляться по уравнению состояния провода, исходя из допустимых значений в режимах наименьших температур и гололедных нагрузок соответственно. На участке CD значения  $\sigma_3$ , вычисленные на основании допустимых значений  $\sigma_-$  и  $\sigma_{гол}$ , превышают допустимое значение эксплуатационного напряжения, что не соответствует требованиям ПУЭ. Это означает, что в этом диапазоне длин пролетов напряжения в проводе во всех требуемых режимах, в том числе режиме наименьших температур и режиме наибольших гололедных нагрузок, должны рассчитываться, исходя из допустимых значений эксплуатационных напряжений. На рисунке 5.1(а) штриховой линией показаны откорректированные графики  $\sigma_{нб} = f(l)$  и  $\sigma_{нм} = f(l)$ .

Таким образом, уравнение состояния провода для расчетов провода с учетом трех критических пролетов, расположенных так, как показано на рисунке 5.1 (а), т.е. при  $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$ , будет иметь вид:

1. Для пролетов  $l < l_{1кр}$

$$\frac{E \sigma_{допнм}^2 l^2}{24 \sigma_{допнм}^2} = \frac{E \sigma_{12}^2 l^2}{24 \sigma_{12}^2} + E t_{им}^2 \quad (5.1)$$

2. Для пролетов  $l_{1кр} < l < l_{3кр}$

$$\frac{E \sigma_{допнм}^2 l^2}{24 \sigma_{допнм}^2} = \frac{E \sigma_{допнб}^2 l^2}{24 \sigma_{допнб}^2} + \frac{E \sigma_{допнб}^2 l^2}{24 \sigma_{допнб}^2} + E t_{им}^2 + E t_{сг}^2 \quad (5.2)$$

3. Для пролетов  $l > l_{3кр}$

$$\frac{E \sigma_{допнм}^2 l^2}{24 \sigma_{допнм}^2} = \frac{E \sigma_{допнб}^2 l^2}{24 \sigma_{допнб}^2} + \frac{E \sigma_{допнб}^2 l^2}{24 \sigma_{допнб}^2} + E t_{им}^2 + E t_{сг}^2 + E t_{гол}^2 \quad (5.3)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_7$  – удельные единичные нагрузки от собственного веса провода и веса провода с гололедом при наличии ветра соответственно;

$t_{им}$  и  $t_{гол}$   $t_{сг}$  – наименьшая температура, температура при гололеде, среднегодовая температура соответственно;

$\sigma_{допнм}$ ,  $\sigma_{допнб}$ ,  $\sigma_{допнб}$  – допустимые напряжения в проводе для режимов наименьших температур, наибольших гололедных нагрузок и эксплуатации соответственно;  $\gamma$  и  $t$ ,  $\sigma$  – удельная единичная нагрузка, температура и напряжение в рассчитываемом режиме.

Второй критический пролет при таком расположении пролетов теряет свое значение и становится фиктивным.

Показанное на рисунке 5.1 (а) соотношение пролетов  $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$  является не единственно возможным, которые встречаются при расчете сталеалюминиевых проводов.

Рассмотрим **второй случай**, показанный на рисунке 5.1 (б), в котором левая ветвь кривой  $\sigma_{ст}=f(l)$  не пересекает прямую АВ. Этому случаю соответствует мнимое значение  $l_{1кр}$  и фиктивное значение  $l_{2кр}$ . То есть, если  $l_{1кр}$  – мнимый, а  $l_{2кр} < l_{3кр}$ , смысл имеет только третий критический пролет и расчет следует вести по (5.2) для  $l < l_{3кр}$  и по (5.3), если  $l > l_{3кр}$ .

В **третьем возможном случае**, показанном на рисунке 5.1 (в), при  $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$  кривая  $\sigma_{ст}=f(l)$  лежит ниже прямой АВ. При этом значения  $\sigma_3$ , вычисленные по уравнению состояния провода, исходя из  $\sigma_{нм}$  и  $\sigma_{нб}$  соответственно, на всем диапазоне длин пролетов не превышают допустимого значения эксплуатационного напряжения. Это означает, что для всех пролетов, длина которых соответствует диапазону  $l < l_{2кр}$  расчет следует вести, исходя из значения допустимого напряжения при наименьшей температуре, а для диапазона  $l > l_{2кр}$ , исходя из допустимых значений гололедных нагрузок. Значения  $l_{1кр}$  и  $l_{3кр}$  получаемые при расчете, соответствуют абсциссам точек С и D, лежащих на пересечениях продолжения ветвей кривой  $\sigma_3=f(l)$  с прямой АВ. Таким образом при соотношении пролетов  $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$  оба пролета  $l_{1кр}$  и  $l_{3кр}$  являются фиктивными, в расчете учитывается только второй критический пролет, а уравнение состояния провода будет иметь вид (5.1) для пролетов диапазона  $l < l_{2кр}$  и (5.3) для пролетов диапазона  $l > l_{2кр}$ .

В **четвертом случае**, показанном на рисунке 5.1 (г) правая ветвь кривой  $\sigma_3=f(l)$  не пересекает прямую АВ. При этом пролет  $l_{3кр}$  мнимый или лежит за пределами расчетного диапазона пролетов, если значение  $l_{3кр}$  очень велико. В этом случае при  $l_{3кр}$  мнимый или имеет очень большое значение и  $l_{1кр} < l_{2кр}$  смысл имеет первый критический пролет и расчет ведется по уравнению (5.1) для  $l < l_{1кр}$  и по уравнению (5.3) для  $l > l_{1кр}$ .

## 2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы

Перед построением графической зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета и проверкой соблюдения условия  $\sigma_{сг} \leq \sigma_{сгдоп}$  на всем диапазоне рекомендуемых пролетов необходимо предварительно:

- 1) Выполнить выбор основных конструктивных элементов (Лабораторная работа №1);
- 2) Выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2);
- 3) Выполнить расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3);
- 4) Выполнить расчет критических пролетов (Лабораторная работа №4).

После расчета критических пролетов необходимо нажать кнопку «Исходный» (рисунок 5.3), после чего откроется график зависимостей  $\sigma_{нм}=f(l)$ ,  $\sigma_{нб}=f(l)$ ,  $\sigma_{сг}=f(l)$ . На графике точки пересечения соответствующих кривых (или их отсутствие) показывают значения 1, 2 и 3 критических пролетов. Соотношения критических пролетов и расчетного габаритного пролета определит исходный режим.

**Исходные данные**

Ином. кВ: 110 Сечение провода: 240 Район по ветру: 1 Цепей линии: 1 Тип опоры: Ж/Б Марка изоляторов: ПФ6-Б

1. Выбрать провод 3. Рассчитать ЦТ

2. Выбрать опоры 4. Рассчитать коэфф.

**Определение критических пролетов**

Tmax: 40 Tгол: -5 Tmin: -40 Tср.год: 0

Рассчитать критические пролеты

Первый критический пролет: 255.9078  
Второй критический пролет: 462.7156  
Третий критический пролет: L3 минималь

Режим: низких температур **Исходный**

Коэффициенты запаса: поддерживающих гирлянд изоляторов; натяжных гирлянд изоляторов

n1 = 10.948 > 2.7 n1 = 1.777 > 2.7  
n2 = 15.129 > 5 n2 = 2.6739 > 5

Граф. Закреть

**4. Расчет ЦТ**

Количество изоляторов Z

Nтр = 16.5 Nгаб = 6  
Nпров = 15.52 Макс. стрела провеса = 9.22  
Высота расположения приведенного ЦТ проводов = 9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**

Нормативный скоростной напор ветра Q: 27 Диаметр провода: 21.6  
Толщина стенки гололеда: 5 Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000  
Аэродинамический коэффициент Cx: 1 Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999  
Коэффициент неравномерности: 1

Рисунок 5.3 – Определение исходного режима

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel, Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности

персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### Задание

Исходными данными для расчета критических пролетов и критической температуры являются результаты, полученные в лабораторной работе 4.

Исходные данные следует представить в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для выбора исходного режима

| №  | Наименование показателя        | Значение показателя |
|----|--------------------------------|---------------------|
| 1. | Первый критический пролет, м   |                     |
| 2. | Второй критический пролет, м   |                     |
| 3. | Третий критический пролет      |                     |
| 4. | Расчетный габаритный пролет, м |                     |

### Расчетная часть

1. Выполнить построение левой ветви графика зависимости механического напряжения в проводе в зависимости от длины пролета для режима наибольших нагрузок, приняв за исходный режим наименьших температур для диапазона пролетов, отвечающих условию  $l < l_{2кр}$ ;

2. Выполнить построение правой ветви графика зависимости механического напряжения в проводе в зависимости от длины пролета для

режима наименьших температур, приняв за исходный режим наибольших нагрузок для диапазона пролетов, отвечающих условию  $l < l_{2кр}$ ;

3. Показать на построенном графике проверку выполнения условия  $\sigma_{сг} < \sigma_{сгдоп}$  ;

4. Исходя из полученного соотношения критических и расчетного габаритного пролетов, определить исходный режим и записать его параметры. Построение графической зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета выполняется в следующей последовательности:

1. На графике горизонтальными линиями отмечаются значение допустимых напряжений в режимах максимальной нагрузки, минимальной температуры и среднегодовой температуры.

2. Выполняется расчет постоянных А и В для построения левой ветви графика  $\sigma_r = f(l)$  для различных диапазонов длин пролетов. Для этого для нескольких значений пролетов  $l < l_{2кр}$  рассчитываются постоянные А и В по следующим формулам:

$$A = \frac{\sigma_{72}^2 \sigma E l^2}{24} \quad (5.4)$$

$$B = \sigma_{допнм} - \frac{\sigma_{12} \sigma E l_{2допнм}^2}{24} - \sigma E (t_{сол} - t_{нм}) \quad (5.5)$$

Результаты расчета постоянных представляются в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Расчет постоянных для построения графика  $\sigma_r = f(l)$  для значений  $l < l_{2кр}$

|                  |                                             |                                                                                                |
|------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Длина пролета, м | $A = \frac{\sigma_{72}^2 \sigma E l^2}{24}$ | $B = \sigma_{нм} - \frac{\sigma_{12} \sigma E l_{2допнм}^2}{24} - \sigma E (t_{сол} - t_{нм})$ |
|------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| $l_{2кр}$ |  |  |
|-----------|--|--|

4. Выполняется расчет постоянных А и В для построения левой ветви графика  $\sigma_{\perp} = f(l)$  для различных диапазонов длин пролетов. Для этого для нескольких значений пролетов  $l > l_{2кр}$  рассчитываются постоянные А и В по следующим формулам:

$$A = \frac{\sigma_{12} E l_2}{24} \quad (5.6)$$

$$B = \frac{\sigma_{22} E l_2^2 - \sigma_{12} E (t_{1M} - t_2)}{24 \sigma_{допб}} \quad (5.7)$$

Результаты расчета постоянных представляются в таблице 5.3

Таблица 5.3 – Расчет постоянных для построения графика  $\sigma_{\perp} = f(l)$  для значений  $l > l_{2кр}$

| Длина пролета, м | $A = \frac{\sigma_{12} E l_2}{24}$ | $B = \frac{\sigma_{22} E l_2^2 - \sigma_{12} E (t_{1M} - t_2)}{24 \sigma_{допб}}$ |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{2кр}$        |                                    |                                                                                   |
|                  |                                    |                                                                                   |
|                  |                                    |                                                                                   |
|                  |                                    |                                                                                   |

5. Выполняется расчет постоянных А и В для построения левой ветви графика  $\sigma_3 = f(l)$  для различных диапазонов длин пролетов, исходя из значения допустимого напряжения в режиме наименьших температур. Для этого для нескольких значений пролетов  $l > l_{2кр}$  рассчитываются постоянные А и В по следующим формулам:

$$A = \frac{\sigma_{доп}^2}{24} \cdot E \cdot l \quad (5.8)$$

$$B = \sigma_{доп} - \frac{\sigma_{доп}^2}{24 \cdot l_{2доп}^2} \cdot E \cdot l_{2доп}^2 - E \cdot (t_{с2} - t_{нм}) \quad (5.9)$$

Результаты расчета постоянных представляются в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Расчет постоянных для построения графика  $\sigma_3 = f(l)$  для значений

$l < l_{кр}$

| Длина пролета, м | $A = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24}$ | $B = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{доп}} - \sigma_{доп} \cdot E \cdot (t_{сг} - t_{нм})$ |
|------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                                             |                                                                                                               |
|                  |                                             |                                                                                                               |
|                  |                                             |                                                                                                               |
| $l_{кр}$         |                                             |                                                                                                               |

6. Выполнить расчет постоянных А и В для построения левой ветви графика  $\sigma_3 = f(l)$  для различных диапазонов длин пролетов. Для этого для нескольких значений пролетов  $l > l_{кр}$  рассчитать постоянные А и В по следующим формулам:

$$A = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24} \quad (5.10)$$

24

$$B = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{доп}} - \sigma_{доп} \cdot E \cdot (t_{нм} - t_{сг}) \quad (5.11)$$

Результаты расчета постоянных представляются в таблице 5.5

Таблица 5.5 – Расчет постоянных для построения графика  $\sigma_3 = f(l)$  для значений

$l > l_{кр}$

| Длина пролета, м | $A = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24}$ | $B = \frac{\sigma_2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{доп}} - \sigma_{доп} \cdot E \cdot (t_{нм} - t_{сг})$ |
|------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{кр}$         |                                             |                                                                                                               |
|                  |                                             |                                                                                                               |
|                  |                                             |                                                                                                               |
|                  |                                             |                                                                                                               |

7. Далее любым возможным методом для всех значений рассматриваемых пролетов решается уравнение состояния провода вида:

$$\frac{A}{\sigma} = \frac{B}{\sigma} \quad (5.12)$$

Результаты расчета графика представляются в таблицах 5.6 и 5.7

Таблица 5.6 – Расчет графика для пролетов  $l < l_{2кр}$

| Длина пролета, м | $\sigma_{нб}$ | $\sigma_{сг}$ | $\sigma_{нбдоп}$ | $\sigma_{сгдоп}$ |
|------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |

Таблица 5.7 – Расчет графика для пролетов  $l > l_{2кр}$

| Длина пролета, м | $\sigma_{нм}$ | $\sigma_{сг}$ | $\sigma_{нмдоп}$ | $\sigma_{сгдоп}$ |
|------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |
|                  |               |               |                  |                  |

Результаты выбора исходного режима представить в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Результаты выбора исходного режима

| Вид пролета | Соотношение расчетного и критического пролетов | Параметры исходного режима |
|-------------|------------------------------------------------|----------------------------|
| $L_{рас=}$  |                                                |                            |
| $L_{кр1=}$  |                                                |                            |
| $L_{кр2}$   |                                                |                            |
| $L_{кр3}$   |                                                |                            |

## **Работа с программой**

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, №2, №3, №4 необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen».

## **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 5.1 – 5.8, «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

## **Контрольные вопросы**

1. Как определяется исходный режим, исходя из значений трех критических пролетов?
2. Какое значение механического напряжения в проводе принимается в качестве исходного при определении параметров исходного режима?

3. . Поясните физический смысл первого, второго и третьего критических пролетов?
4. Опишите алгоритм построения зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета  $\sigma_{нб}=f(l)$ ?
5. Опишите алгоритм построения зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета  $\sigma_{нм}=f(l)$ ?
6. Опишите алгоритм построения зависимости механического напряжения в проводе от длины пролета  $\sigma_{сг}=f(l)$ ?
7. Какой режим принимается в качестве исходного при построении зависимости  $\sigma_{нб}=f(l)$  для диапазонов длин пролетов  $l < l_{2кр}$ ?
8. Какой режим принимается в качестве исходного при построении зависимости  $\sigma_{нм}=f(l)$  для диапазонов длин пролетов  $l > l_{2кр}$ ?
9. Какой режим принимается в качестве исходного при построении зависимости  $\sigma_{сг}=f(l)$  для диапазонов длин пролетов  $l < l_{2кр}$ ?
10. Какой режим принимается в качестве исходного при построении зависимости  $\sigma_{сг}=f(l)$  для диапазонов длин пролетов  $l > l_{2кр}$ ?
11. Какое требование ПУЭ должно выполняться для всех пролетов, лежащих в диапазоне длин габаритного пролета?
12. Какие значения могут принимать расчетные длины первого, второго и третьего критических пролетов ? Поясните физический смысл и графическую интерпретацию мнимой или слишком большой величины критического пролета.
13. Какой режим следует принимать в качестве исходного при условии  $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$  для диапазона длин пролетов  $l_{габ} < l_{1кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия?
14. Какой режим следует принимать в качестве исходного при  $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$  и для диапазона длин пролетов  $l_{1кр} < l_{габ} < l_{3кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия?

15. Какой режим следует принимать в качестве исходного при  $I_{1кр} < I_{2кр} < I_{3кр}$  для диапазона длин пролетов  $I_{габ} > I_{3кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия?

16. Какой режим следует принимать в качестве исходного, если при первый критический пролет принимает мнимое значение для диапазона пролетов  $I_{габ} < I_{3кр}$  и  $I_{габ} > I_{3кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия

17. Какой режим принимается в качестве исходного при  $I_{1кр} > I_{2кр} > I_{3кр}$  для диапазонов длин пролетов  $I_{габ} < I_{2кр}$  и  $I_{габ} > I_{2кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия?

18. Какой режим принимается в качестве исходного, если третий критический пролет принимает мнимое или очень большое значение для диапазонов пролетов  $I_{1кр} < I_{габ}$  и  $I_{габ} < I_{1кр}$ ? Покажите графическую интерпретацию условия?

19. Поясните необходимость проверки условия  $\sigma_{сг} < \sigma_{сгдоп}$  для всех диапазонов длин пролетов?

20. Приведите общий вид уравнения состояния провода при известных параметрах исходного режима?

21. Каким методом решается уравнение состояния провода относительно неизвестного значения механического напряжения в расчетном режиме?

22. Опишите характер полученной зависимости  $\sigma_{нб} = f(l)$ ., полученной графическим построением, и поясните критерий выбора исходного режима

**Литература:** 1, 2, 3

## **Лабораторная работа 6 «Систематический расчет проводов и построение зависимостей $\sigma(l)$ и $f(l)$ для расчетных климатических режимов»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний основ проектирования механической части ВЛ в части расчета механических напряжений и стрел провеса проводов, а также, навыков анализа их зависимостей от длины пролета для расчетных климатических режимов.

### **Теоретическая часть**

Напряжения и стрелы провеса провода меняются в зависимости от температуры и нагрузки. При повышении температуры провод расширяется, напряжение в нем снижается и стрела провеса увеличивается. При понижении температуры происходит обратный процесс: провод сжимается, напряжение в нем увеличивается, а стрела провеса уменьшается. При отложении гололеда и отсутствии ветра на провод действует только вертикальная нагрузка и стрела провеса остается в вертикальной плоскости. Вес провода при наличии гололеда возрастает, вследствие чего увеличивается напряжение в проводе и стрела провеса. При воздействии ветровых нагрузок, действующих в горизонтальном направлении, провод отклоняется и стрела провеса располагается в наклонной плоскости, угол наклона которой определяется соотношением горизонтальных и вертикальных нагрузок. Например, сочетания климатических условий, соответствующие расчетным режимам гололедных нагрузок и максимальной температуры, необходимы для нахождения максимальной вертикальной стрелы провеса, значение которой используется для расчета и контроля габарита. Режим минимальных температур используется для проверки проводов по допустимому напряжению в этих условиях, а также для определения минимальной стрелы провеса, которая нужна для вычисления габаритов при пересечении с

инженерными сооружениями и для других целей. По расчетному среднеэксплуатационному режиму контролируют напряжение в средних эксплуатационных условиях, чтобы оно не превышало допустимого при среднегодовой температуре. Один из режимов гололедных нагрузок или ветровых давлений позволяет определить максимальную внешнюю нагрузку на провода. По выбранному режиму производится проверка на допустимое напряжение при максимальных нагрузках. Эти режимы используют также для нахождения косых (наклонных) стрел провеса провода и тросов (при воздействии ветра). Режим грозových перенапряжений используется для расчета стрелы провеса провода и троса, по которым определяется расстояние между тросом и проводом в точке их наибольшего провисания.

При расчете проводов и тросов имеют значение следующие удельные нагрузки:

1. Нагрузка от собственного веса при отсутствии ветра ( $\gamma_1$ );
2. Нагрузка от веса провода с гололедом при отсутствии ветра ( $\gamma_3$ );
3. Нагрузка от веса провода с гололедом при наличии ветра ( $\gamma_7$ );
4. Нагрузка от веса провода при максимальном давлении ветра ( $\gamma_6$ ).

Климатический режим характеризуется температурой. При расчете проводов и тросов учитываются следующие температуры:

1. Максимальная температура ( $t_{max}$ ), при которой провод может растягиваться больше всего и стрела провеса может иметь максимальное значение;
2. Минимальная температура ( $t_{min}$ ), при которой длина провода сокращается в наибольшей степени и механические напряжения в нем могут достигать наибольших значений;
3. Среднегодовая температура ( $t_{сг}$ ), соответствующая среднегодовым условиям эксплуатации, при которой определяется надежность работы при вибрации;

4. Температура при максимальной скорости ветра и гололеде, обычно принимается равной -5градусов Цельсия;

5. Температура +15 градусов Цельсия, при которой проверяется расстояние между проводом и тросом в режиме грозовых перенапряжений.

Таким образом, расчетные режимы, для которых определение механических напряжений и стрел провеса является обязательным, характеризуются следующими параметрами:

1. Максимальная температура, ветра и гололеда нет ( $t_{max}, \gamma_1$ );
2. Минимальная температура, ветра и гололеда нет ( $t_{min}, \gamma_1$ );
3. Среднегодовая температура, ветра и гололеда нет ( $t_{сз}, \gamma_1$ );
4. Режим грозовых перенапряжений, гололеда и ветра нет (=15 градусов,  $\gamma_1$ );
5. Провода покрыты гололедом. ветра нет (-5градусов,  $\gamma_3$ );
6. Скоростной напор ветра, гололеда нет (-5градусов,  $\gamma_6$ );
7. Провода покрыты гололедом, скоростной напор ветра  $q=0.25 \cdot q_{max}$  (-5градусов,  $\gamma_7$ ).

Систематический расчет проводов заключается в определении механического напряжения в проводе для всех расчетных режимов путем решения уравнения состояния провода, в котором за исходный режим принимается режим, определенный методом критических пролетов. В этом уравнении параметры исходного режима подставляются в правую часть уравнения, а в левую его часть последовательно подставляются параметры каждого из расчетных режимов.

$$\sigma_0 \left( 1 - \frac{24 \sigma_0}{E} \right) = \sigma_0 \left( 1 - \frac{24 \sigma_0}{E} \right) + \frac{q^2 l^2}{2E} \left( 1 - \frac{24 \sigma_0}{E} \right) \quad (6.1)$$

$$\sigma_0 = \frac{24 \sigma_0}{E}$$

где  $l$  – длина пролета;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного удлинения проводов;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_0, \gamma_0, t_0$  – соответственно напряжение в проводе, удельная нагрузка и температура в исходном режиме состояния провода;  $\sigma, \gamma, t$  – соответствующие значения для искомого режима провода.

Стрела провеса для каждого из сочетаний климатических условий провода определяется по формуле:

$$f = \frac{\sigma l^2}{8\gamma} \quad (6.2.)$$

где  $l$  – длина пролета;

$\gamma$  – удельная нагрузка в расчетном режиме, для которого производится определение стрелы провеса;  $\sigma$  – напряжение в материале провода в соответствующем режиме при расчетной длине габаритного пролета.

Для построения зависимостей требуется определение значение напряжений в проводе и их стрел провесов для каждого из принятых климатических режимов.

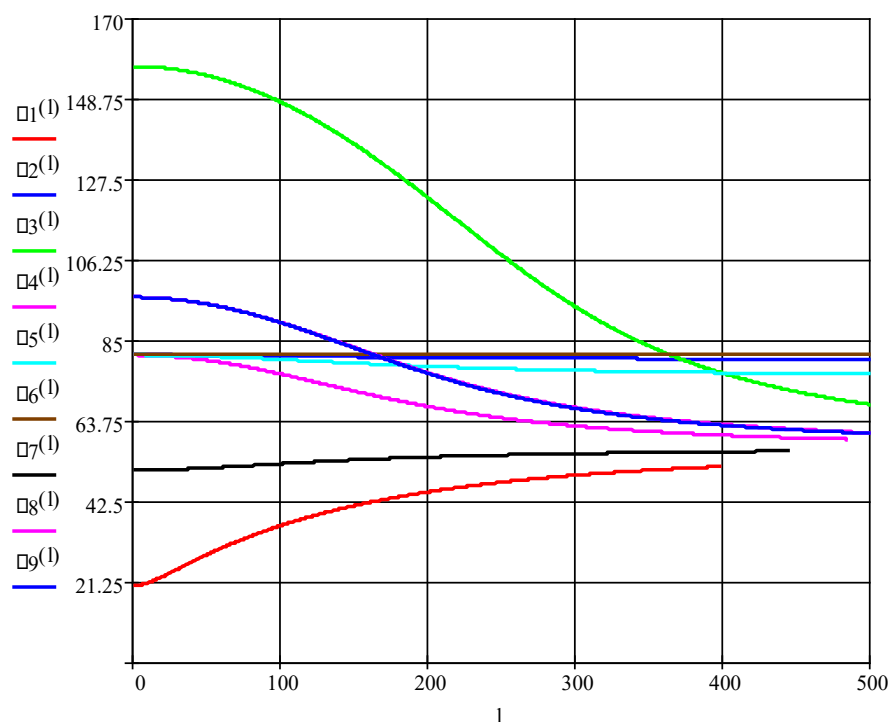


Рисунок 6.1 – Напряжение в проводе

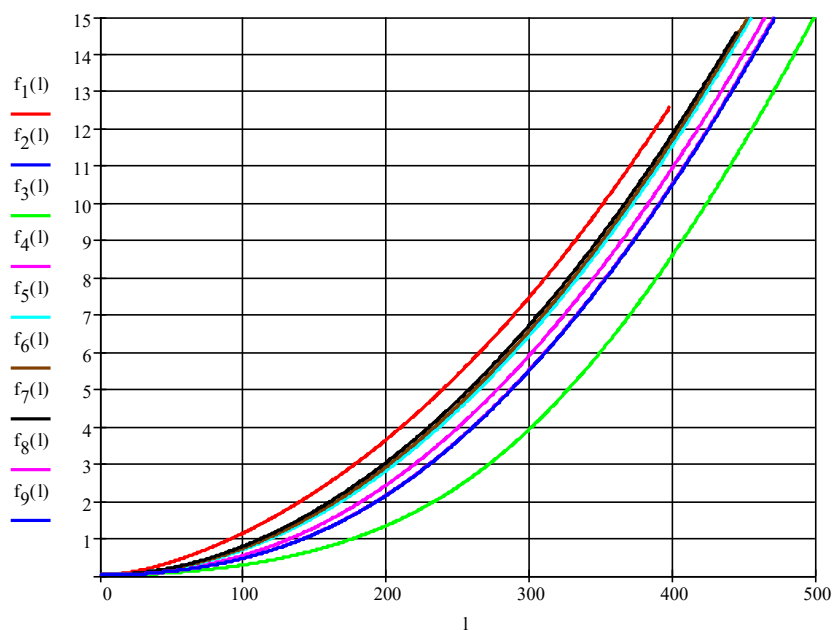


Рисунок 6.2 – Стрела провеса

## 2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы.

Перед выполнением систематического расчета провода необходимо предварительно:

1. Выполнить выбор основных конструктивных элементов (Лабораторная работа №1);
2. Выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2);
3. Выполнить расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3);
4. Выполнить расчет критических пролетов (Лабораторная работа №4).

Систематический расчет провода будет выполнен одновременно с расчетом критических пролетов (рисунок 6.3).

Для построения графиков зависимостей напряжения и стрел провеса от длины пролета необходимо нажать кнопку «Граф.».

Мех.расчет

Расчет удельных механических нагрузок | **Расчет провода** | Аварийный режим | Шаблон

---

**Исходные данные**

Уном. кВ: 110 | Сечение провода: 240 | Район по ветру: 1 | Цепей линии: 1 | Тип опоры: ☒ Ж/Б ☐ Стальная | Марка изоляторов: ПФ6-Б

1. Выбрать провод | 3. Рассчитать ЦТ

2. Выбрать опоры | 4. Рассчитать коэф.

---

**Определение критических пролетов**

Tmax: 40 | Tгол: -5 | Tmin: -40 | Tср.год: 0

**Рассчитать критические пролеты**

Первый критический пролет: 255.9078  
Второй критический пролет: 462.7156  
Третий критический пролет: 1.3 минимый

Режим: низких температур | Исходный

---

**Систематический расчет провода**

| Расчетный режим | Сочетание климатических условий              | Напряжение провол | Стрела провеса |
|-----------------|----------------------------------------------|-------------------|----------------|
| 1               | Гололед, t=-5, скоростной напор ветра 0,25q  | 12.2              | 1.9538         |
| 2               | Гололед, t=-5, ветра нет                     | 9.2331            | 2.5474         |
| 3               | Гололеда нет, t=-5, скоростной напор ветра q | 8.6088            | 1.9402         |
| 4               | Гололеда нет, t среднегодовая, ветра нет     | 7.6114            | 2.1945         |
| 5               | Гололеда нет, t=+15, ветра нет               | 6.3755            | 2.6199         |
| 6               | Гололеда нет, t низшая, ветра нет            | 12.1999           | 1.3691         |
| 7               | Гололеда нет, t максимальная, ветра нет      | 4.9309            | 3.3874         |

---

Коэффициенты запаса: поддерживающих гирлянд изоляторов: натяжных гирлянд изоляторов

n1=10.948>=2.7 | n1=1.777 >=2.7  
n2=15.129>=5 | n2=2.6739>=5

**Граф.** | **Закреть**

---

**4. Расчет ЦТ**

Количество изоляторов 7

Hтр=16.5 | Hгаб=6  
Hпров=15.52 | Макс.стрела провеса=9.22  
Высота расположения приведенного ЦТ проводов=9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**

Нормативный скоростной напор ветра Q: 27 | Диаметр провода: 21.6  
Толщина стенки гололеда: 5 | Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000  
Аэродинамический коэффициент Cx: 1 | Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999  
Коэффициент неравномерности: 1

Рисунок 6.3 – Систематический расчет проводов

## **Оборудование и материалы**

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## **Указания по технике безопасности**

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

## **Задание**

### **Расчетная часть**

1. Исходными данными для систематического расчета провода, являются:

- параметры режима, который выбран в качестве исходного в лабораторной работе № 4.

- физико-механические характеристики провода, определенные в лабораторной работе №1.

Представить исходные данные в таблицах 6.1 и 6.2

Таблица 6.1 –Параметры исходного режима

| Исходный режим | Параметры исходного режима |          |          |     |
|----------------|----------------------------|----------|----------|-----|
|                | Номер режима               | $\gamma$ | $\sigma$ | $t$ |
|                |                            |          |          |     |

Таблица 6.2 – Физико-механические характеристики провода

| Марка провода | Модуль упругости $E$ , даН/мм <sup>2</sup> | Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , град <sup>-1</sup> | Расчетная длина габаритного пролета, м |
|---------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|               |                                            |                                                                              |                                        |

2. Для каждого расчетного климатического режима на основании уравнения состояния провода (6.1) определить значения механических напряжений в проводе.

Результаты систематического расчета проводов показать в таблице 6.3

Таблица 6.3 – Систематический расчет напряжений проводов

| Режим | Климатические условия                             | Параметры режима          | Напряжение в проводе $\sigma$ , даН/мм <sup>2</sup> |
|-------|---------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1     | Высшая температура, без ветра и гололеда          | $\gamma_1; t_{\max}$      |                                                     |
| 2     | Низшая температура, без ветра и гололеда          | $\gamma_1; t_{\min}$      |                                                     |
| 3     | Средняя годовая температура, без ветра и гололеда | $\gamma_1; t_{\text{ср}}$ |                                                     |
| 4     | При гололеде без ветра                            | $\gamma_3; -5\text{град}$ |                                                     |
| 5     | При ветре без гололеда                            | $\gamma_6; t$             |                                                     |
| 6     | При ветре и гололеде                              | $\gamma_7; -5\text{град}$ |                                                     |

|   |                           |                      |  |
|---|---------------------------|----------------------|--|
| 7 | Во время грозы, без ветра | $\gamma_1 + 15$ град |  |
|---|---------------------------|----------------------|--|

3 Для каждого расчетного режима в соответствии с выражением (6.2) определить стрелу провеса провода. Результаты расчета стрел провеса представить в таблице 6.3

Таблица 6.4 – Стрелы провеса проводов

| Режим | Климатические условия                             | Параметры режима | Стрела провеса |
|-------|---------------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1     | Высшая температура, без ветра и гололеда          |                  |                |
| 2     | Низшая температура, без ветра и гололеда          |                  |                |
| 3     | Средняя годовая температура, без ветра и гололеда |                  |                |
| 4     | При гололеде без ветра                            |                  |                |
| 5     | При ветре без гололеда                            |                  |                |
| 6     | При ветре и гололеде                              |                  |                |
| 7     | Во время грозы, без ветра                         |                  |                |

4. Представить зависимости напряжений  $\sigma = f(l)$  и стрелы провеса от длины пролета  $f = f(l)$  в виде графиков. Расчетные данные для построения графиков отразить в таблице 6.5

Таблица 6.5 – Расчет графика зависимости  $\sigma = f(l)$

| Режим | Климатические условия                    | Длина пролета, м | Напряжение в проводе $\sigma$ , даН/мм <sup>2</sup> |
|-------|------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|
| 1     | Высшая температура, без ветра и гололеда |                  |                                                     |
|       |                                          |                  |                                                     |
|       |                                          |                  |                                                     |
|       |                                          |                  |                                                     |

|   |                                                   |  |  |
|---|---------------------------------------------------|--|--|
|   |                                                   |  |  |
| 2 | Низшая температура, без ветра и гололеда          |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
| 3 | Средняя годовая температура, без ветра и гололеда |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
| 4 | При гололеде без ветра                            |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |

Продолжение таблицы 6.5

| Режим | Климатические условия  | Длина пролета, м | Напряжение в проводе $\sigma$ , даН/мм <sup>2</sup> |
|-------|------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|
| 5     | При ветре без гололеда |                  |                                                     |

|   |                           |  |  |
|---|---------------------------|--|--|
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
| 6 | При ветре и гололеде      |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
| 7 | Во время грозы, без ветра |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |

Таблица 6.6 – Расчет графика зависимости  $f = f(l)$

| Режим | Климатические условия | Длина пролета, м | Стрела провеса, м |
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|

|   |                                                   |  |  |
|---|---------------------------------------------------|--|--|
| 1 | Высшая температура, без ветра и гололеда          |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
| 2 | Низшая температура, без ветра и гололеда          |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
| 3 | Средняя годовая температура, без ветра и гололеда |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
| 4 | При гололеде без ветра                            |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |
|   |                                                   |  |  |

Продолжение таблицы 6.6

|       |                       |                  |                   |
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|
| Режим | Климатические условия | Длина пролета, м | Стрела провеса, м |
|-------|-----------------------|------------------|-------------------|

|   |                           |  |  |
|---|---------------------------|--|--|
| 5 | При ветре без гололеда    |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
| 6 | При ветре и гололеде      |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
| 7 | Во время грозы, без ветра |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |
|   |                           |  |  |

### **Работа с программой**

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, №2, №3, №4 необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью

«PrintScreen».

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 6.1 – 6.6, «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите физический процесс изменения механического напряжения провода и стрелы его провеса при повышении температуры окружающего воздуха?
2. Опишите физический процесс изменения механического напряжения провода и стрелы его провеса при снижении температуры окружающего воздуха?
3. Опишите физический процесс изменения механического напряжения провода и стрелы его провеса при наличии гололедных отложений на проводе в отсутствии ветра?
4. Опишите физический процесс изменения механического напряжения провода и стрелы его провеса в условиях максимальных ветровых нагрузок при отсутствии на нем гололедных отложений?

5. Опишите физический процесс изменения механического напряжения провода и стрелы его провеса в условиях ветровых нагрузок при наличии на нем гололедных отложений?
6. Какой режимы являются определяющими для контроля габарита ВЛ?
7. Какой режим является определяющим для контроля габарита при пересечении с инженерными сооружениями?
8. Какие режимы являются определяющими для контроля обеспечения требуемой механической прочности проводов?
9. Какой режим используется для контроля соблюдения требований к механической прочности в среднеэксплуатационных условиях?
10. Укажите назначение расчета механических параметров провода в режиме грозových перенапряжений?
11. Перечислите удельные механические нагрузки, которые используются при систематическом расчете проводов и тросов?
12. Перечислите температуры, которые используются при систематическом расчете проводов и тросов?
13. Перечислите режимы, для которых определение механических напряжений и стрел провеса является обязательным?
14. Назовите параметры, характеризующие режим среднегодовых температур?
15. Назовите параметры, характеризующие режим наибольших температур?
16. Назовите параметры, характеризующие режим наименьших температур?
17. Назовите параметры, характеризующие режим гололедных нагрузок?
18. Назовите параметры, характеризующие режим максимальных ветровых нагрузок?

19. Назовите параметры, характеризующие режим гололедных нагрузок при наличии ветра?

20. Назовите параметры, характеризующие режим грозových перенапряжений?

21. Поясните суть и назначение систематического расчета проводов?

22. Какие механические параметры провода определяются в результате систематического проводов?

23. Какой режим, исходя из результата выполненного Вами систематического расчета, является режимом максимальной стрелы провеса провода?

24. Опишите характер полученных зависимостей напряжений провода и стрел их провеса от длины пролета?

**Литература:** 1, 2, 3

## Лабораторная работа 7 «Проверка изоляторов по условиям механической прочности и выбор линейной арматуры»

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний методики проверки изоляторов по механической прочности, а также, навыков выбора линейной арматуры для монтажа проводов и изоляторов на опоре.

### Теоретическая часть

#### 1 Виды изоляторов. Штыревые изоляторы

Изоляторы ВЛ изготавливают в основном из фарфора или закалённого стекла. Вместе с тем, в последние два десятилетия все шире начинают применяться и полимерные изоляторы. Фарфор и стекло обладают высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, достаточно высокой механической и электрической прочностью. Стекланные изоляторы легче фарфоровых, лучше противостоят ударным нагрузкам и не растрескиваются, а рассыпаются при пробое, что облегчает визуальное нахождение места повреждения при осмотрах линии.

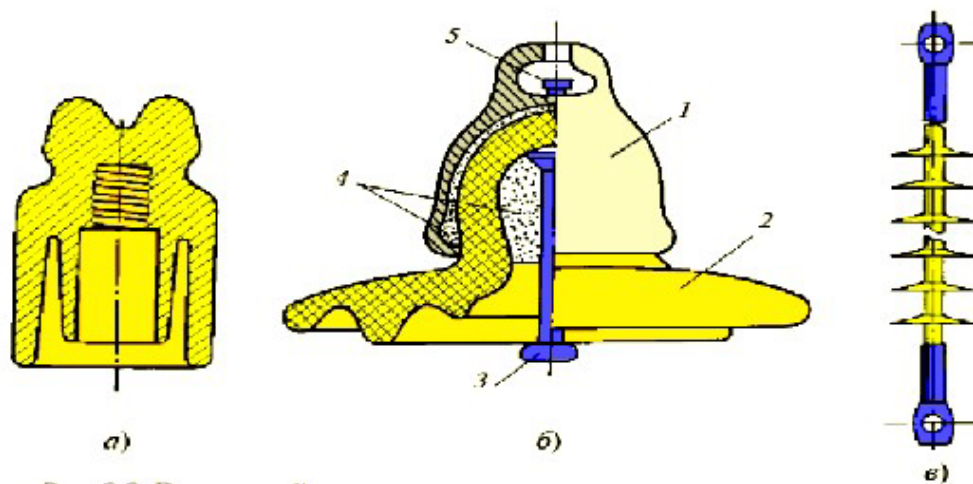


Рисунок 7.1 – Виды линейных изоляторов: а – штыревой; б – подвесной тарельчатого типа; в – полимерный. 1 – шапка; 2 – изолирующая деталь (тарелка); 3 – стержень; 4 – цементная заделка; 5 – замок изолятора.

Конструктивно различаются два вида стеклянных и фарфоровых изоляторов: штыревые и подвесные.

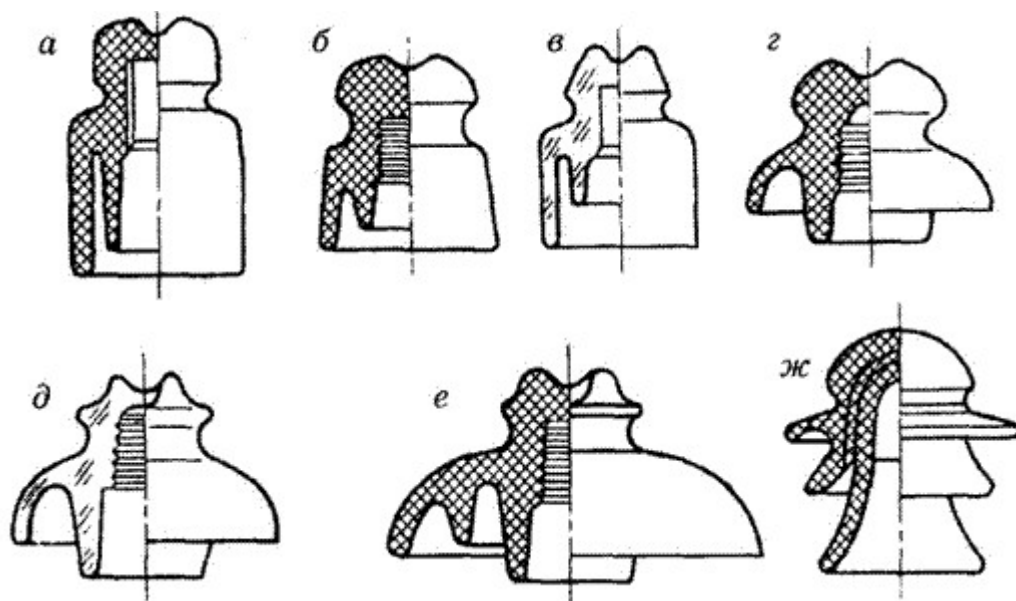


Рисунок 7.2 – Штыревые изоляторы: а - ТФ; б - ШЛН; в - ТСБ; г - ШС; д - ШСС; е - ШЖБ; ж - ШД

Штыревые применяются на ВЛ до 35 кВ включительно. Корпус изолятора имеет внутреннюю резьбу и навинчивается на металлический штырь или крюк. Провод укладывается в углубление на головке изолятора и закрепляется проволоочной вязкой. В марке изолятора присутствует обозначение типа (Ш), материала (С или Ф), номинального напряжения (в киловольтах) и исполнения (А, Г и др). Подвесные изоляторы применяются на ВЛ напряжением 35 кВ и выше. Марка изолятора содержит буквы П (подвесной), С (стеклянный) или Ф (фарфоровый), Г (грязестойкий) и А, Б, В, Д (обозначение модификации). Цифрой обозначается максимальная (разрушающая) механическая нагрузка в килоньютонах (кН), например ПФ70В, ПСГ120-А, ПС400-А и т. п.

## 2 Подвесные тарельчатые изоляторы

Конструкция подвесного тарельчатого изолятора состоит из трёх основных элементов:

- стеклянной или фарфоровой изолирующей детали в виде тела вращения с рёбрами на нижней поверхности и с внутренней полостью конической или цилиндрической формы;
- шапки из ковкого чугуна, в верхней части которой имеется сферическая полость (гнездо), предназначенная для шарнирного сопряжения с другим изолятором;
- стержня, нижняя головка которого имеет сферическую поверхность, сопрягаемую с соответствующей поверхностью в гнезде шапки.

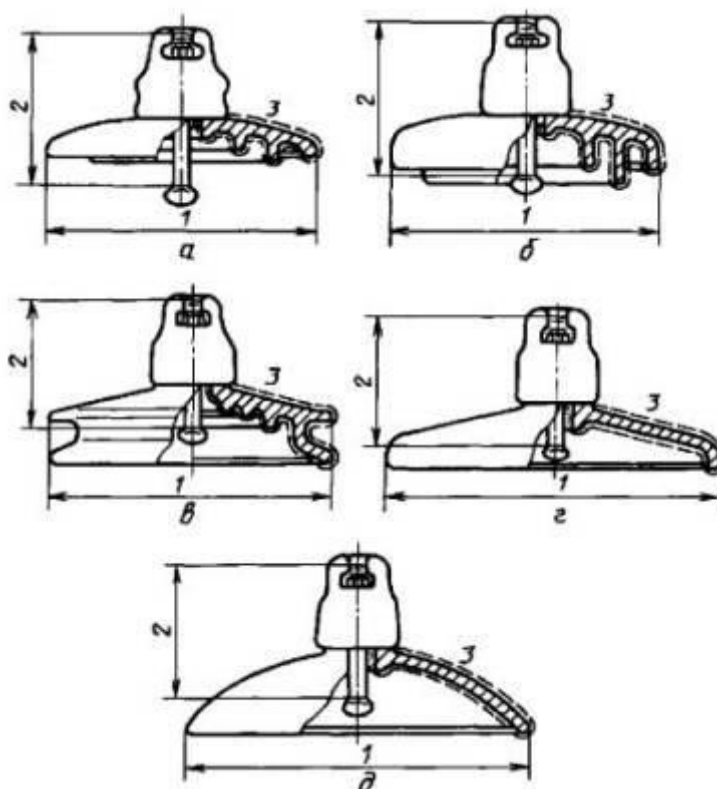


Рисунок 7.3 – Тарельчатые изоляторы: а - со слаборазвитой поверхностью изоляционной детали; б - с увеличенным вылетом ребра (В); в - двукрылая (Д); г - коническая (К); д - сферическая (С); 1 - диаметр; 2 - строительная высота; 3 - длина пути утечки

Прочное соединение металлических деталей подвешенного изолятора с изолирующей деталью достигается за счёт конической формы сопрягаемых частей шапки, изолирующей детали и верхней головки стержня, пространство между которыми заполняется цементным, обеспечивающим их прочное соединение. Подвесные изоляторы собираются в гирлянды путём введения в сферическое гнездо шапки головки стержня смежного изолятора. Для предотвращения расцепления сферический шарнир изоляторов запирается замком М-образной или шплинтообразной формы.

Количество изоляторов в поддерживающей гирлянде  $n_{из}$  определяется в основном значением номинального напряжения линии, а также степенью загрязнённости атмосферы, материалом опоры и типом изолятора.

Поддерживающие гирлянды ВЛ 500 кВ при использовании изоляторов марки ПФ120-А содержат 21 такой изолятор (при ПС 120-А 24 изолятора). При  $U_{ном} = 110-220$  кВ в число  $n_{из}$  входит по одному резервному изолятору, а при  $U_{ном} = 330-500$  кВ по два. Для ВЛ 35-220 кВ, сооружаемых на деревянных опорах, число изоляторов в гирлянде на один меньше указанного для ВЛ соответствующего напряжения.

### **3 Стержневые полимерные изоляторы**

Стержневые полимерные изоляторы (ПИ) представляют собой относительно новое поколение изоляции ВЛ. Их разработка и внедрение в практику сооружения ВЛ начались в СССР в 70-е годы XX в. В настоящее время в России в эксплуатации находятся более 400 тыс. ПИ. Основой их конструкции является стеклопластиковый стержень, воспринимающий всю механическую нагрузку. На концах стержня имеются металлические оконцеватели или фланцы для крепления к траверсе опоры и соединения с зажимом провода. Электрическую прочность изолятора и необходимую длину пути утечки тока обеспечивает ребристая оболочка из кремнийорганической

эластомерной композиции (резины) или силикона, защищающая стержень от атмосферных воздействий и закреплённая на нем с помощью клеевого герметика (герменила). Основными достоинствами ПИ являются, прежде всего, их высокая эксплуатационная надёжность, малая масса, устойчивость к ударным механическим нагрузкам и актам вандализма (в том числе к расстрелам), удобство транспортировки и простота монтажа, а также эстетичный внешний вид. Отечественные ПИ маркируются буквами ЛК, после которых указывается разрушающая нагрузка при растяжении (от 70 до 300 кН) и через дробь – значение  $U_{ном}$ . Так, например, изолятор ЛК 70/110 имеет габаритный размер 1278 мм, длину изоляционной части 1020 мм, диаметр рёбер оболочки 85 мм и массу 3,3 кг, т.е. на порядок меньшую по сравнению с гирляндой стеклянных или фарфоровых изоляторов таких же напряжения и прочности.

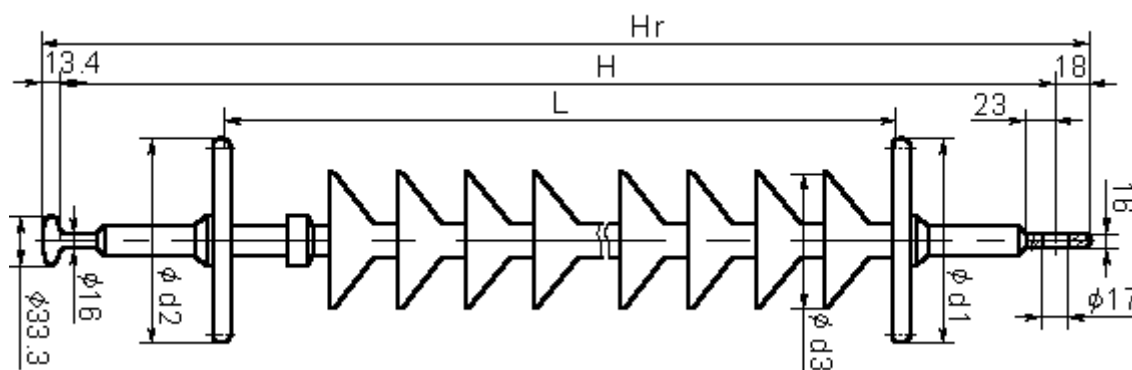


Рисунок 7.4 – Линейный подвесной полимерный изолятор для  
ВЛЭП 35-220 кВ

#### 4 Линейная арматура. Классификация линейной арматуры

Термин линейная арматура объединяет устройства, обеспечивающие, во-первых, надёжное сочленение отдельных элементов конструкции ВЛ, а также защиту гирлянд подвесных изоляторов (или ПИ) от повреждения электрической дугой при пробое и фиксацию взаимного расположения в

пространстве проводов расщепленных фаз и соседних фаз по отношению друг к другу. Классификация линейной арматуры приведена в таблице 7.1

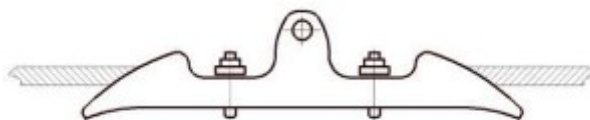
Таблица 7.1– Классификация линейной арматуры

| Категория      | Тип                  | Разновидности                                                                                   |
|----------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фиксирующая    | Зажим поддерживающий | Глухой Проскальзывающий                                                                         |
|                | Зажим натяжной       | Клиновой<br>Болтовой<br>Прессуемый                                                              |
| Сцепная        | Элемент сопряжения   | Скоба (гирлянда-опора)<br>Серьга (скоба-изолятор)                                               |
|                |                      | Ушко (изолятор-зажим)<br>Коромысло (п гирлянд)<br>Промежуточное звено Узел<br>крепления к опоре |
| Защитная       | Элемент защиты       | Защитное кольцо<br>Защитный овал<br>Разрядные рога                                              |
| Соединительная | Соединитель          | Овальный Прессуемый                                                                             |
| Дистанцирующая | Распорка             | Металлическая<br>Изолирующая                                                                    |

#### 4.1 Фиксирующая арматура

Фиксирующая арматура представлена двумя видами зажимов: поддерживающими и натяжными.

Поддерживающие зажимы служат для крепления проводов на промежуточных опорах. Они состоят из *лодочки*, в которую укладывается провод, зажимных *плашек* и *U-образных болтов*, закрепляющих провод в лодочке. В основном применяют два типа поддерживающих зажимов : глухие и с ограниченной прочностью заделки провода (проскальзывающие).



а)

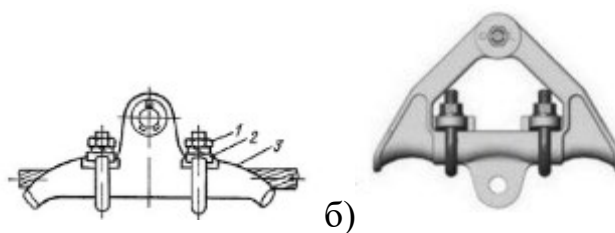


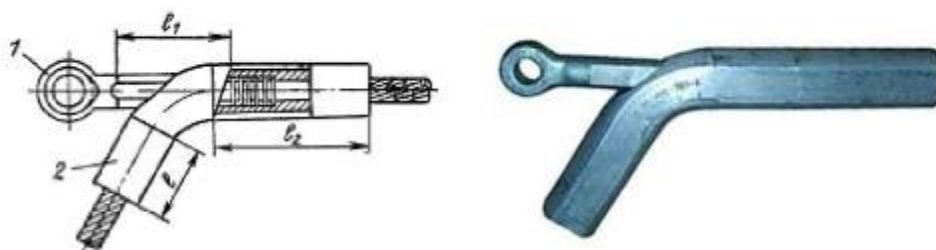
Рисунок 7.5 – Поддерживающий зажим: а- Общий вид; б-Глухие зажимы

Глухие зажимы обеспечивают закрепление провода без его проскальзывания в любом режиме работы линии. При этом тяжение по проводу полностью передаётся на опору. Лодочка шарнирно связана с ушком, а оно, в свою очередь, с нижним изолятором гирлянды.

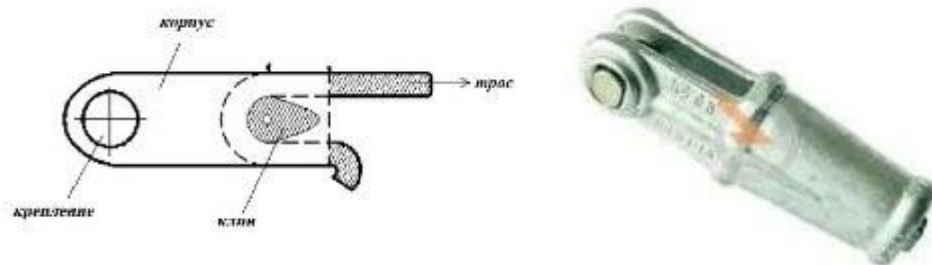
Ограничение усилий, действующих на опору, достигается применением зажимов с ограниченной прочностью заделки провода. Конструктивно эти зажимы не отличаются от глухих, но затяжка плашек у них осуществляется таким образом, что при усилиях, превышающих заданную величину (7- 9 кН), происходят проскальзывание провода в зажиме и соответствующая разгрузка опоры. Такие зажимы применяются на ВЛ напряжением 330 кВ и выше.



а) Болтовые натяжные зажимы



б) Прессуемые натяжные зажимы



### в) Клиновые натяжные зажимы

Рисунок 7.6 – Натяжные зажимы: а- Болтовые натяжные зажимы; б-

Прессуемые натяжные зажимы; в -Клиновые натяжные зажимы

Натяжные зажимы служат для крепления проводов на анкерных опорах. Они сопрягаются с натяжными гирляндами изоляторов и воспринимают полные тяжения по проводам во всех режимах работы линии. По способу закрепления провода они делятся на клиновые, болтовые и прессуемые. Наиболее простые по конструкции клиновые зажимы предназначены для крепления проводов (медных и алюминиевых) и стальных тросов сечением  $1695 \text{ мм}^2$ . Они состоят из чугунного или стального корпуса, в котором размещается провод (трос), и алюминиевого или латунного клина, который зажимает (самозаклинивает) провод (трос) под действием тяжения по нему.

Болтовые зажимы используются при монтаже проводов сечением  $70\text{--}240 \text{ мм}^2$ . Такой зажим состоит из чугунного корпуса, в котором при помощи U-образных болтов с плашками из алюминиевого сплава зажимается провод. На корпусе имеется проушина для крепления зажима к гирлянде. Как клиновые, так и болтовые зажимы не требуют разрезания провода в месте закрепления при монтаже. Они используются главным образом на ВЛ с номинальным напряжением до  $110 \text{ кВ}$  включительно.

Прессуемые зажимы предназначены для монтажа сталеалюминиевых проводов с сечениями алюминиевой части  $240 \text{ мм}^2$  и более, т.е. на ВЛ

напряжением 220 кВ и выше. Они состоят из стального анкера с проушиной, в который запрессовывается стальной сердечник провода со стороны пролёта, и алюминиевого корпуса, в котором закрепляется алюминиевая часть провода. При этом требуется предварительное разрезание провода, что усложняет монтаж.

## 4.2 Сцепная арматура

К категории сцепной арматуры относятся:

1. Скобы, служащие для соединения гирлянды изоляторов с траверсой опоры;
2. Серьги, предназначенные для соединения скобы с шапкой верхнего изолятора гирлянды;
3. Ушки, осуществляющие сопряжение нижнего изолятора гирлянды с зажимом;
4. Коромысла, служащие для образования сдвоенных и строенных гирлянд;
5. Промежуточные звенья, используемые для удлинения гирлянд;
6. Узлы крепления гирлянд изоляторов к опорам .

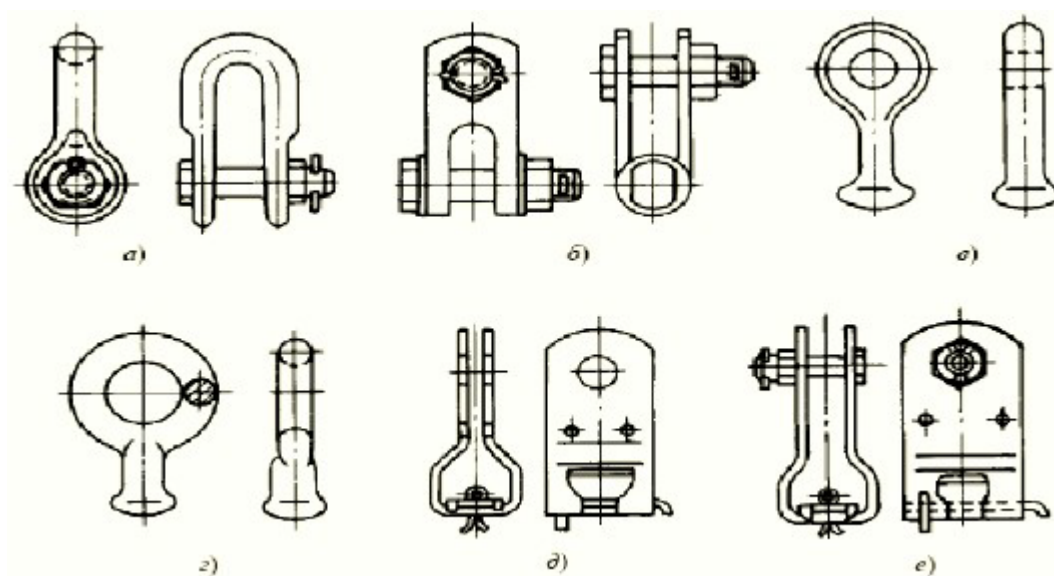


Рисунок 7.7 – Основные элементы цепной арматуры: а – одинарная скоба; б – двойная плоская скоба; в – серьга с целендрической проушиной; г – серьга со скруглённой проушиной д – однолапчатое ушко; е – двухлапчатое ушко

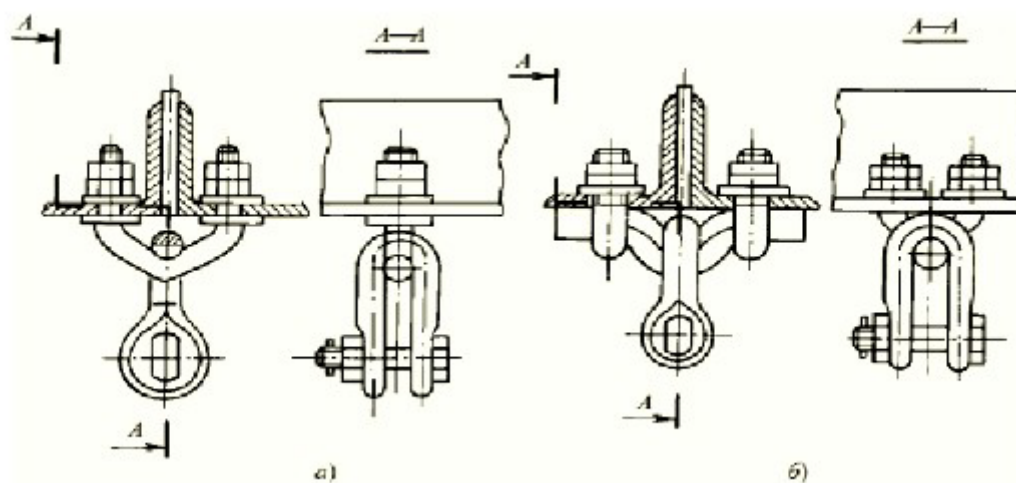


Рисунок 7.8 – Узлы крепления к траверсе опоры: а – поддерживающей гирлянды; б – натяжной гирлянды

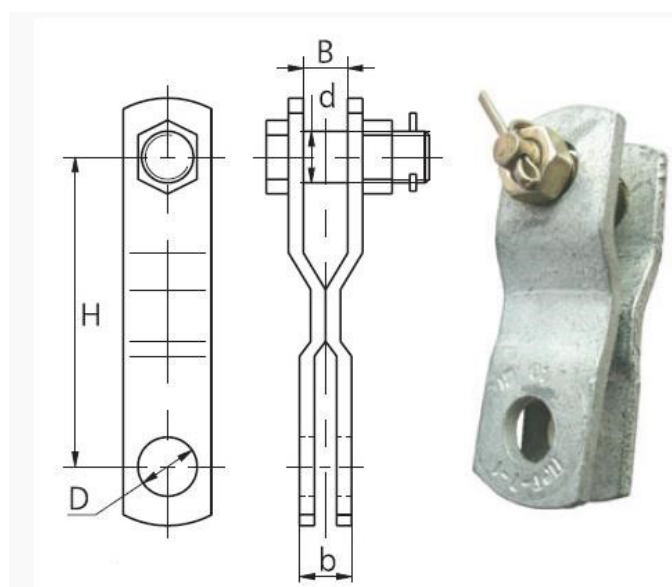


Рисунок 7.9 – Промежуточное звено трехлапчатого типа ПРТ-7-1

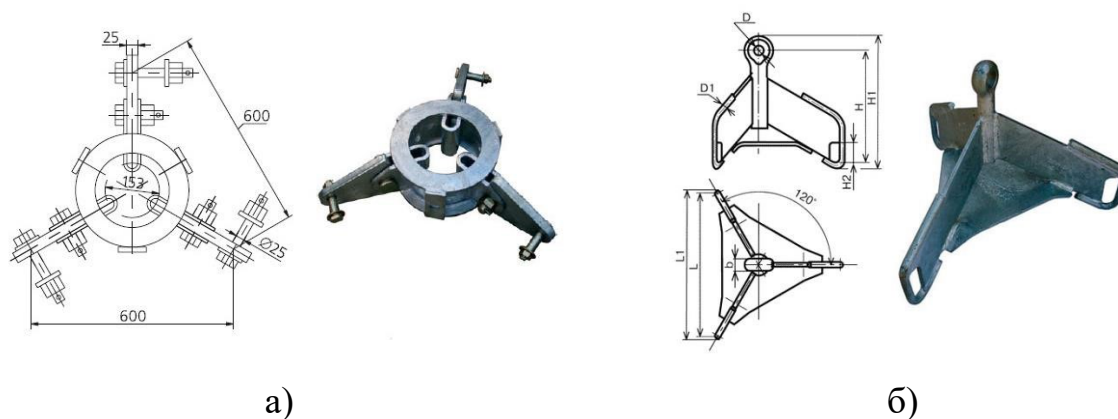


Рисунок 7.10 –Коромысло ЛЭП: а - Коромысло лучевое универсальное ЗКУ-21-3 предназначено для объединения трех цепей натяжной изолирующей подвески на линиях электропередачи после их монтажа; б - Коромысло трехлучевое универсальное ЗКУ-16-1 предназначено для крепления трех цепей изоляторов к одной точке

### 4.3 Защитная арматура

К категории защитной арматуры относятся защитные кольца (овалы) и разрядные рога.

Защитные кольца (овалы) устанавливаются в нижней части поддерживающих и натяжных гирлянд изоляторов и стержневых полимерных изоляторов ВЛ напряжением 330 кВ и выше. Они служат для отвода электрической дуги, возникающей при перекрытиях гирлянд, от поверхности последних, а также для улучшения равномерности распределения напряжения между изоляторами гирлянды.

Верхние и нижние разрядные рога служат для создания искрового промежутка при изолированном креплении грозозащитных тросов на опорах ВЛ 220-1150 кВ. Они устанавливаются на гирляндах, причём верхние рога закрепляются на серьгах, а нижние -на ушках.

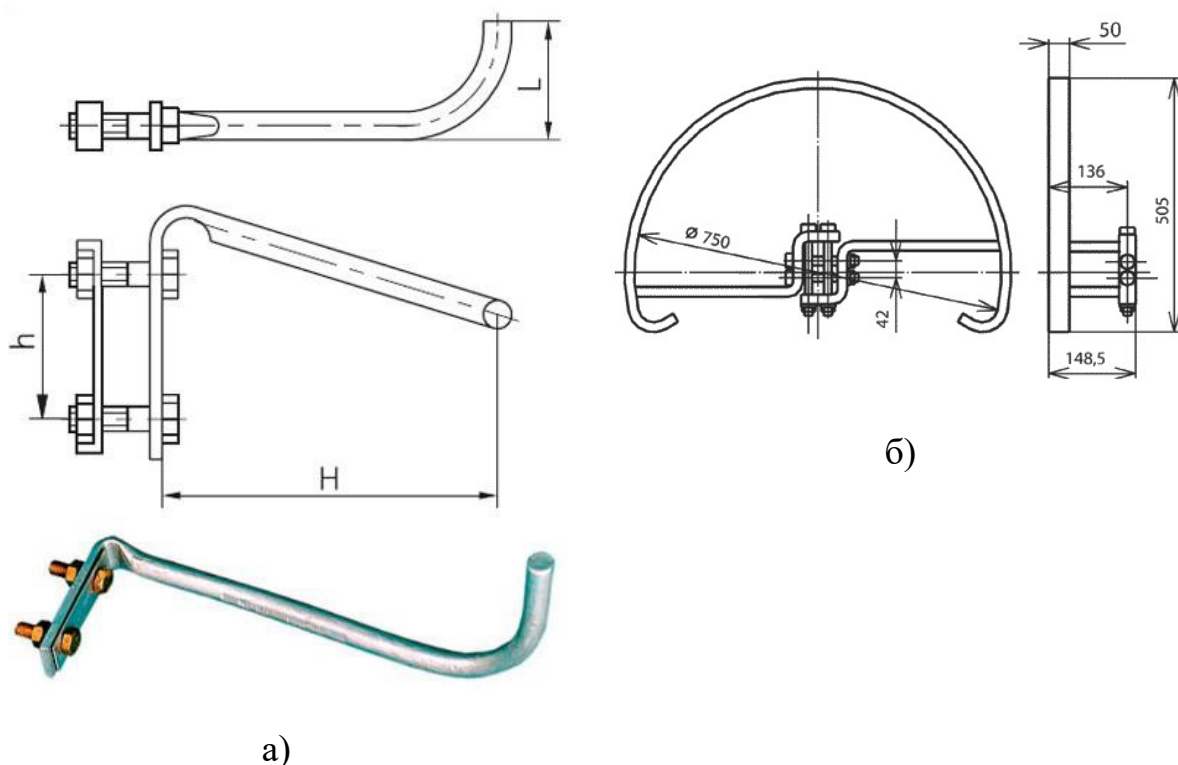


Рисунок 7.11 – Защитная арматура ЛЭП: а- Рог разрядный РРН-88; б- Кольцо защитное НКЗ-2/4-1

#### 4.4 Соединительная арматура

Соединительная арматура служит для соединения двух строительных длин провода, т.е. его отрезков, каждый из которых умещается на одном транспортном барабане.

Для проводов с сечениями до  $240 \text{ мм}^2$  включительно используют овальные соединители, которые представляют собой трубку с развальцованными краями из того же материала, что и провод, в которую с двух сторон вставляются соединяемые концы провода. Надёжный электрический контакт и достаточная механическая прочность места соединения обеспечиваются при монтаже путем обжатия соединителя специальными клещами или прессом, либо путем скручивания вместе с проводом специальным приспособлением.

Для соединения сталеалюминевых проводов с сечениями  $300 \text{ мм}^2$  и более, а также стальных тросов сечением  $50\text{-}150 \text{ мм}^2$  и более применяют

прессуемые соединители. Они состоят из двух элементов - алюминиевого корпуса, охватывающего внешнюю поверхность провода, и стальной трубки, в которую вставляются концы стального сердечника.

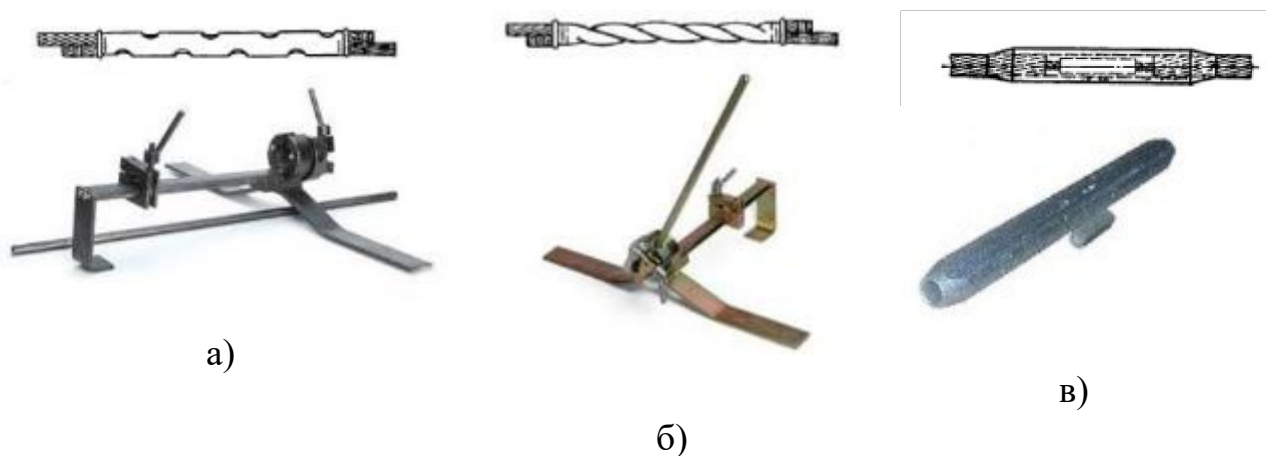


Рисунок 7.12 – Соединительная арматура: а - овалный соединитель (обжатие соединителя); б - овалный соединитель (соединение методом скручивания); в – прессуемый соединитель

#### 4.5 Дистанцирующая арматура

Дистанцирующая арматура представлена двумя видами распорок. Металлические распорки служат для фиксации взаимного расположения проводов расщепленных фаз ВЛ 330-1150 кВ. Наиболее простая парная распорка, соединяющая два провода, состоит из двух комплектов плашек, которые закрепляются на проводах болтами, и тяги, устанавливаемой между плашками и закрепляемой жестко (глухое крепление) или подвижно (шарнирное крепление). На ВЛ 500 кВ с расщеплением фазы на три провода такие распорки устанавливают группами по 3 штуки на расстоянии 40-50 м между соседними группами. При числе проводов в фазе более трех наряду с парными могут быть использованы многолучевые и рамные распорки, более экономичные с точки зрения расхода металла.

Изолирующие распорки служат для дистанцирования сближенных фаз компактных ВЛ на опорах охватывающего типа и опорах с вантовой

траверсой, а также для фиксации фаз многофазных ВЛ. С этой целью могут быть использованы полимерные изоляторы со стеклопластиковым стержнем, описанные выше, а также опорно-стержневые полимерные изоляторы.



Рисунок 7.13 – Распорки

## 5 Проверка изоляторов по условиям механической прочности

Выбор типа изоляторов производится на основании требований ПУЭ, определяющих их необходимую механическую и электрическую прочность.

Необходимыми исходными данными являются:

- напряжение линии;
- район прохождения трассы;
- материал и тип опор;
- нормативная механическая нагрузка на изоляторы.

Согласно ПУЭ коэффициенты запаса прочности изоляторов в нормальном режиме при наибольшей нагрузке должны быть не менее 2,7, а при среднегодовой температуре при отсутствии гололеда и ветра – не менее 5, в аварийном режиме для подвесных изоляторов не менее 1,8(для ВЛ 500 кВ и более – не мене 2).

Проверка изоляторов поддерживающих гирлянд по условиям механической прочности в нормальном режиме, производится по коэффициентам запаса  $n_1$  при наибольшей нагрузке и  $n_2$  при отсутствии ветра и гололеда.

$$n_1 \geq \frac{P}{\gamma_7 F_P l_{вес} + G_{\Gamma}} \geq 2,7 \quad (7.1)$$

$$n_2 \geq \frac{P}{\gamma_1 F_P l_{вес} + G_{\Gamma}} \geq 5 \quad (7.2)$$

где  $P$  – электромеханическая разрушающая нагрузка изолятора, кг;  $\gamma_1$  и  $\gamma_7$  – удельные нагрузки от собственного веса провода и от веса провода с гололедом при ветре, кг/м;

$l_{вес}$  – весовой пролет, м;  $G_{\Gamma}$

– вес гирлянды, кг.

Проверка изоляторов натяжных гирлянд по условию механической прочности производится по формулам:

$$\sigma_{\max} \geq \frac{P}{F_P \left( \gamma_7 \frac{l_{вес}}{2} + G_{\Gamma} \right)} \geq 2,7 \quad (7.3)$$

$$\sigma_{\min} \geq \frac{P}{F_P \left( \gamma_1 \frac{l_{вес}}{2} + G_{\Gamma} \right)} \geq 5 \quad (7.4)$$

где  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  – напряжение в проводе при наибольшей нагрузке и при среднегодовой температуре, даН/мм<sup>2</sup>;  $F_P$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>;  $G_{\Gamma}$  – вес гирлянды, даН.

## 6 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением проверки изоляторов необходимо предварительно:

- 1) Выполнить выбор основных конструктивных элементов (Лабораторная работа №1);

- 2) Выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2);
  - 3) Выполнить расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3);
  - 4) Выполнить расчет критических пролетов (Лабораторная работа №4).
- Проверка изоляторов будет выполнен одновременно с расчетом критических пролетов (рисунок 7.14).

**Исходные данные**

Уном. кВ: 110, Сечение провода: 240, Район по ветру: 1, Цепи линии: 1, Тип опоры: Ж/Б, Марка изоляторов: ПФ6-Б

**Определение критических пролетов**

Т<sub>max</sub>: 40, Т<sub>гол</sub>: -5, Т<sub>min</sub>: -40, Т<sub>ср.год</sub>: 0

**Расчитать критические пролеты**

Первый критический пролет: 255.9078  
Второй критический пролет: 462.7156  
Третий критический пролет: 1.3 миним

Режим: низких температур, Исходный

**Систематический расчет провода**

| Расчетный режим | Сочетание климатических условий              | Напряжение пров. | Стрела провеса |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1               | Гололед, t=-5, скоростной напор ветра 0,25q  | 12.2             | 1.9538         |
| 2               | Гололед, t=-5, ветра нет                     | 9.2331           | 2.5474         |
| 3               | Гололеда нет, t=-5, скоростной напор ветра q | 8.6088           | 1.9402         |
| 4               | Гололеда нет, t среднегодовая, ветра нет     | 7.6114           | 2.1945         |
| 5               | Гололеда нет, t=+15, ветра нет               | 6.3755           | 2.6199         |
| 6               | Гололеда нет, t низшая, ветра нет            | 12.1999          | 1.3691         |
| 7               | Гололеда нет, t максимальная, ветра нет      | 4.9309           | 3.3874         |

**Кoeffициенты запаса:** поддерживающих гирлянд изоляторов: натяжных гирлянд изоляторов  
n1=10.948>=2.7, n2=15.129>=5, n1=1.777 >=2.7, n2=2.6739>=5

**4. Расчет ЦТ**  
Количество изоляторов Z: Нтр=16.5, Нгаб=6, Нпров=15.52, Макс. стрела провеса=9.22, Высота расположения приведенного ЦТ проводов=9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**  
Нормативный скоростной напор ветра Q: 27, Диаметр провода: 21.6, Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000, Толщина стенки гололеда: 5, Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999, Аэродинамический коэффициент Cx: 1, Коэффициент неравномерности: 1

Рисунок 7.14 – Проверка изоляторов

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

## Задание

Исходные данными для выполнения проверки изоляторов по условию механической прочности определены в лабораторных работах № 1 и № 3.

### Расчетная часть

1. Представить исходные данные по физико-механическим характеристикам натяжной и подвесной гирлянд и расчетным нагрузкам провода в таблицах в таблице 7.2 и 7.3

Таблица 7.2 – Физико-механические данные по изоляции ВЛ

| Гирлянда изоляторов                  | Натяжная | Подвесная |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Марка изолятора                      |          |           |
| Количество изоляторов в гирлянде, шт |          |           |
| Вес гирлянды, даН                    |          |           |

|                                               |  |  |
|-----------------------------------------------|--|--|
| Электромеханическая разрушающая нагрузка, даН |  |  |
|-----------------------------------------------|--|--|

Таблица 7.3 – Расчетные данные по проводу ВЛ

| Марка провода | Расчетное сечение провода, мм <sup>2</sup> | Весовой пролет $l_{\text{вес}}$ , м | Наибольшая удельная нагрузка $\gamma_7$ , даН/м мм <sup>2</sup> | Удельная нагрузка от собственного веса $\gamma_1$ , даН/м мм <sup>2</sup> |
|---------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|               |                                            |                                     |                                                                 |                                                                           |

2. В соответствии с расчетными выражениями, приведенными в разделе 5, произвести расчет коэффициентов запаса для указанных режимов для подвесной и натяжной гирлянд и выполнить их проверку на соответствие требованиям ПУЭ.

Таблица 7.4 – Проверка выполнения соответствия изоляции условиям требуемой механической прочности

| Расчетные данные                           |                              |                    |                           |                    |
|--------------------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| Коэффициент запаса                         | Среднеэксплуатационный режим |                    | Режим наибольших нагрузок |                    |
|                                            | Натяжная гирлянда            | Подвесная гирлянда | Натяжная гирлянда         | Подвесная гирлянда |
| Коэффициент запаса нормативный             |                              |                    |                           |                    |
| Коэффициент запаса расчетный               |                              |                    |                           |                    |
| Выполнение условий по коэффициентам запаса |                              |                    |                           |                    |

3.Привести эскиз поддерживающей гирлянды с указанием технических размеров.

4.Привести перечень необходимой для монтажа линейной арматуры для поддерживающей и натяжной гирлянд

Таблица 7.5 –Линейная арматура

| Наименование |          |                  |                   |                         |
|--------------|----------|------------------|-------------------|-------------------------|
| Зажимы       |          | Сцепная арматура | Защитная арматура | Соединительная арматура |
| Подвесные    | Натяжные |                  |                   |                         |
|              |          |                  |                   |                         |
|              |          |                  |                   |                         |
|              |          |                  |                   |                         |

#### **Работа с программой**

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «6 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen».

#### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 7.2 – 7.5, «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите значение коэффициента запаса прочности изоляторов, который регламентируется ПУЭ для условий среднеэксплуатационного режима?
2. Назовите значение коэффициента запаса прочности изоляторов, который регламентируется ПУЭ для условий режима гололедно - ветровых нагрузок?
3. Поясните суть метода разрушающих нагрузок, применяемого при расчете изоляторов?
4. Перечислите основные достоинства и недостатки стеклянных и фарфоровых изоляторов?
5. Перечислите основные достоинства полимерных изоляторов?
6. Назовите основные элементы конструкции подвесного тарельчатого изолятора?
7. Поясните характер влияния номинального напряжения и загрязненности окружающей среды на количество изоляторов в гирлянде?
8. Объясните влияние материала опоры на требуемое количество изоляторов в гирлянде?
9. Опишите конструкцию полимерного изолятора?
10. Какие конструктивные особенности обеспечивают электрическую прочность и длину пути утечки полимерного изолятора?
11. Назовите назначение и виды фиксирующей арматуры?
12. Назовите виды подвесных зажимов и опишите их конструктивные особенности?

13. Назовите виды натяжных зажимов и опишите их конструктивные особенности?
14. Укажите назначение сцепной арматуры, назовите ее элементы и назначение каждого из них?
15. Назовите назначение и виды защитной арматуры?
16. Назовите назначение и виды соединительной арматуры?
17. Назовите назначение и виды дистанцирующей арматуры?
18. Какие удельные нагрузки учитываются при расчете коэффициентов запаса в среднеэксплуатационном и режиме гололедноветровой нагрузки?
19. Значение какого из приведенных в технических характеристиках опоры пролетов принимается при расчете коэффициентов запаса изоляторов?
20. Каковы различия при определении тяжения в расчете коэффициентов запаса подвесных и натяжных гирлянд
21. Дайте определение электромеханической разрушающей нагрузки изолятора
22. Назовите особенности требований по обеспечению механической прочности изоляторов ВЛ сверхвысокого напряжения

**Литература:** 1, 2, 3

**Лабораторная работа 8 «Расчет и проверка механических характеристик провода при обрыве его в соседнем пролёте»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний метода графического расчета тяжения провода при смещении его точки подвеса, а также, навыков анализа аварийных режимов работы ВЛ.

**Теоретическая часть**

## **1 Характеристика аварийных режимов ВЛ**

Под аварийным режимом воздушной линии понимают работу при полностью или частично оборванных проводах и тросах. Обрывы проводов и тросов возможны даже при правильно спроектированной линии, т.к. даже в этом случае все же возможны случаи повреждения, вызывающие выход линии из работы. Помимо основной причины повреждения изоляции перебои в работе линии обусловлены также обрывом проводов. Обрыв провода может произойти по одной из следующих причин:

1. Неблагоприятные метеорологические условия, при которых внешние нагрузки на провода и тросы от гололеда и ветра значительно превосходят расчетные. Такое явление наблюдается наиболее часто в районах с сильными и особо сильными гололедными образованиями, в которых в ряде случаев сознательно рассчитываются нагрузки от гололеда, меньше возможных.

2. Повреждение провода в зажимах при монтаже. Монтаж проводов производится в соответствии с тяжениями, меньшими, чем при неблагоприятных расчетных метеорологических условиях, поэтому повреждения могут быть не обнаружены при монтаже.

3. Плохой монтаж в соединительных и некоторых типах натяжных зажимов, не обеспечивающих хорошего контакта между концами соединительных проводов. Усиленный нагрев провода в зажиме приводит к нарушению механической прочности или даже к разрушению провода.

4. Электрическая дуга, возникающая между проводами или между проводом и опорой из-за перенапряжений и коротких замыканий (схлестывание проводов и тросов при пляске, соприкосновение между проводами при малых расстояниях между ними, перекрытие изоляторов, наброс и т.д.). При определенном уменьшении сечения провода обрыв

наступает немедленно. При небольшом уменьшении сечения провода обрыв его наступит при возрастании тяжения провода, обусловленного возрастанием гололедно-ветровых нагрузок или при понижении температуры.

5. Вибрация проводов, вызывающая излом части проволок, т.е., уменьшение поперечного сечения провода.

В некоторых случаях обрыв производят самолеты, падение деревьев на опоры и т.д.

Обрыв проводов в одном из пролетов резко меняет условия работы проводов и опор, которые можно охарактеризовать следующими изменениями:

1. До обрыва проводов на промежуточные и большинство анкерных опор действовали вертикальные силы веса опор, изоляторов, проводов и тросов (свободных или покрытых гололедом) и сила давления ветра на провода, тросы и опоры. Сил, действующих в направлении трассы линии, как правило, нет. но после обрыва провода из-за неуравновешенного тяжения по ним на опоры действуют силы, направленные вдоль трассы линии. Эти силы в ряде случаев могут достигать больших величин и должны быть обязательно учтены при проектировании на линиях с крупными сечениями проводов и глухими поддерживающими зажимами.

2. После обрыва провода в одном из пролетов анкерного участка тяжение по проводу уменьшается, в результате чего стрелы провеса значительно возрастают и габарит приближения провода к земле становится значительно меньшим, чем при нормальных режимах работы линии. В населенных местностях указанное обстоятельство заставляет принимать специальные меры, обеспечивающие поддержание хотя и сниженного по сравнению с нормальным режимом работы линии габарита над землей.

Согласно ПУЭ ВЛ рассчитываются для режимов работы, которые характеризуются двумя основными схемами:

1. Провода и тросы не оборваны
2. Оборвана часть проводов и тросов.

Число оборванных проводов и тросов принимается в зависимости от назначения и типа опоры. Исключением из этого правила являются линии со штыревыми изоляторами, которые не рассчитываются на обрыв проводов и тросов.

Для определения расстояний между проводами в районах с сильными и особо сильными гололедными образованиями следует учитывать неравномерную нагрузку провода гололедом в разных пролетах анкерного участка линии. При неравномерной нагрузке тяжения и стрелы провеса в различных пролетах становятся различными. В пролетах с большой нагрузкой провод получает большие стрелы провеса, чем при нормальных условиях работы линии, а в пролетах с меньшей нагрузкой - меньшие.

На опорах с проводами, расположенными друг над другом, при неблагоприятных условиях верхний провод может получить большую стрелу провеса, а нижний - меньшую. При этом провода сблизятся на недопустимо малое расстояние и возможно перекрытие воздушного промежутка с последующим отключением линии. Следовательно, при проектировании линии должны быть учтены факторы, приводящие к перекрытиям и отключениям линии при нарушении расстояний между проводами из-за внешних неблагоприятных факторов.

### **1.1 Расчет тяжения провода в результате смещения точки подвеса**

Если анкерный пролет состоит из одного пролета, то при обрыве провода в нем прикладывается усилие к анкерным опорам со стороны уцелевших проводов в смежных пролетах, равное полному тяжению провода до обрыва. Если же анкерный пролет состоит из нескольких пролетов, то при обрыве провода в одном из них, ограниченном промежуточными опорами, на

промежуточные опоры передаются горизонтальные силы, соответствующие тяжению в уцелевших проводах. Одностороннее тяжение вызывает отклонение гирлянды подвесных изоляторов, которое будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие всех внешних сил, приложенных к ней. Отклонение гирлянды изоляторов приводит к ослаблению тяжения по уцелевшим проводам. Ослабление тяжения также происходит из-за отклонения опор в сторону действия горизонтальной силы.

Изменение тяжения провода в результате смещения его точки подвеса называется редукцией, а установившееся новое тяжение – редуцированным. Отношение редуцированного и начального тяжений называется коэффициентом редукции. Уменьшение тяжения провода, или редукция зависят, от конструкции опоры, длины гирлянды, нагрузки и длины пролета до обрыва провода. Если считать опору абсолютно жесткой, то перемещение точки подвеса провода будет определяться только отклонением гирлянды. Гибкие опоры отклоняются в сторону уцелевшего провода под воздействием его тяжения, и к перемещению точки подвеса вследствие отклонения гирлянды добавляется прогиб опоры  $\delta$  в месте приложения силы  $F$ . Этот прогиб определяется по формуле:

$$F K m H \square \square \quad (8.1)$$

где  $K$ -коэффициент гибкости опоры.

Прогиб железобетонных и стальных опор в расчетах как правило не учитывается, т.к. их коэффициент гибкости очень мал.

Длина гирлянды оказывает большое влияние на редуцированное тяжение. Чем длиннее гирлянда, тем больше ее отклонение и тем меньше редуцированное тяжение провода. Однако такое тяжение возникает только при подвеске проводов в глухих зажимах; при выпадающих зажимах провод сбрасывается на землю, а при зажимах с ограниченной прочностью заделки он проскальзывает в зажимах и его тяжение уменьшается до 600-800 даН.

Длина пролета также влияет на редуцированное тяжение: чем больше пролет, тем меньше его изменения вследствие отклонения гирлянды. Поэтому при увеличении длины пролета значение редуцированного тяжения возрастает.

Для определения зависимости тяжения провода от перемещения одной из его точек подвеса рассмотрим провод, подвешенный в двух точках А и В, находящихся на одинаковой высоте (рисунок 8.1). Точку В будем перемещать влево на  $\Delta l$ , точку А считаем неподвижной.

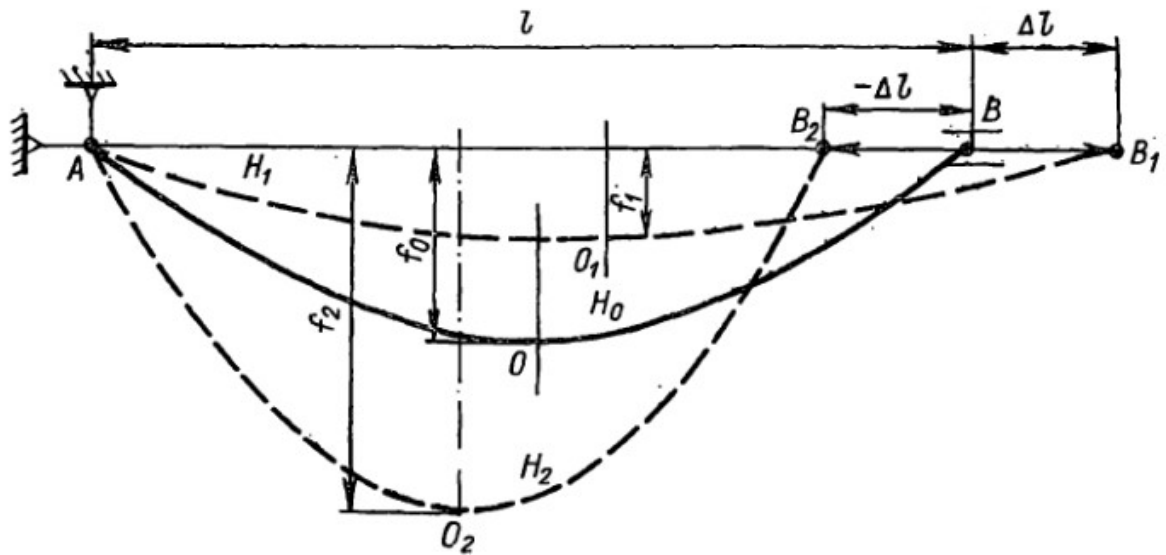


Рисунок 8.1 – Перемещение одной из точек подвеса провода

Обозначим начальные параметры провода при его подвеске в точке В с пролетом  $l$  через  $L_0, H_0, p_0$ , конечные при пролете  $l - \Delta l$  - через  $L, H, p$ . Нагрузку будем считать постоянной.

Длина провода в пролете в начальном состоянии:

$$L_0 \approx \frac{p l^2}{24 H_0} \quad (8.2.)$$

Длина провода в пролете в конечном состоянии:

$$L \approx \frac{p l^2}{24 H} \quad (8.3.)$$

$$24H \quad 24H \quad l$$

$$\Delta l$$

Пренебрегаем соотношением  $\Delta l$  —, которое очень мало по сравнению с  $l$  единицей, тогда:

$$L \approx l_0 \approx l \frac{p l_{23}}{24H^2} \quad (8.4)$$

Разность длин проводов в начальном и конечном состояниях:

$$\Delta L \approx L_0 - L \approx l \frac{p l_{23}}{24} (H_0^2 - H^2) \quad (8.5)$$

С другой стороны эту разность можно выразить как упругую деформацию:

$$\Delta L \approx \frac{1}{EF} (H_0 - H) \quad (8.6)$$

Приравнявая два последних выражения, получим уравнение

$$l \frac{p l_{23}}{24} (H_0^2 - H^2) \approx \frac{1}{EF} (H_0 - H) \quad (8.7)$$

Решая последнее уравнение относительно  $\Delta l$ , найдем

$$\Delta l \approx \frac{1}{p l_{23}} \frac{1}{24} (H_0^2 - H^2) \approx \frac{1}{24 p l_{23}} (H_0^2 - H^2) \quad (8.8)$$

Последняя формула выражает перемещения точки подвеса от тяжения, тогда как поставлена задача нахождения значения тяжения в проводе от величины перемещения.

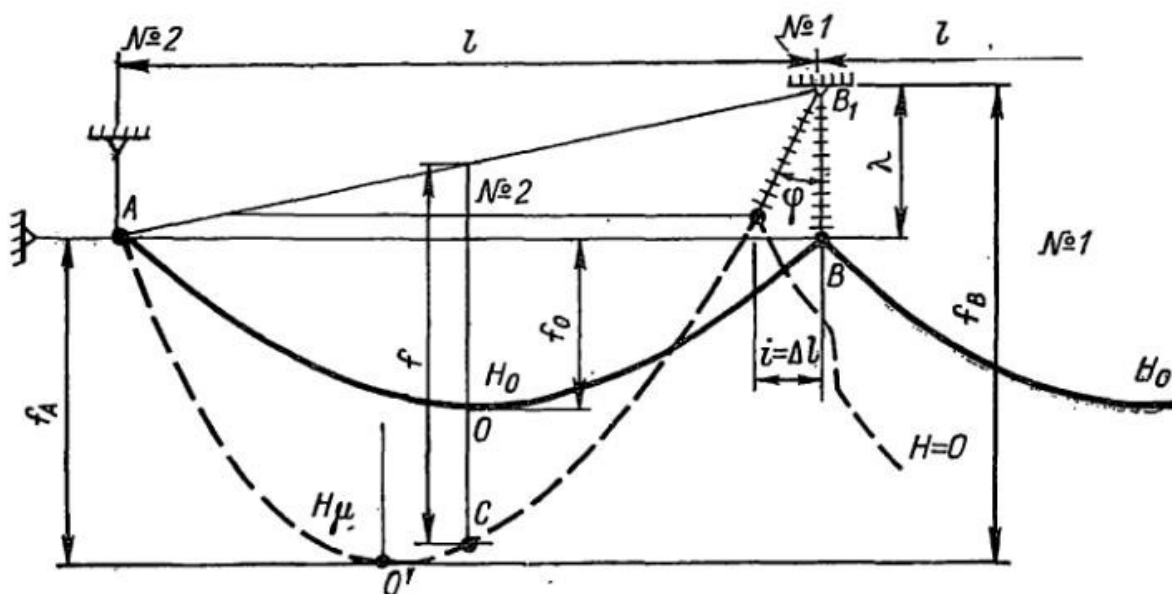


Рисунок 8.2 – Отклонение гирлянды изоляторов при обрыве в пролете, смежном с анкерным.

Рассмотрим изменение тяжения провода, подвешенного в точке А на анкерной опоре и точке В на промежуточной, в случае его обрыва в пролете №1, смежном с промежуточной опорой (рисунок 8.2). До обрыва поддерживающая гирлянда висит вертикально и провод занимает положение, показанное сплошной линией. После обрыва провода гирлянда отклоняется на угол  $\varphi$ , пролет уменьшается на величину  $\Delta l = i$ , а тяжение снижается до значения  $< H_0$ . Положение провода после обрыва показано штриховой линией.

Для определения отклонения гирлянды из условия ее статического равновесия запишем уравнение моментов сил относительно точки ее подвеса  $B_1$  (рисунок 8.3).

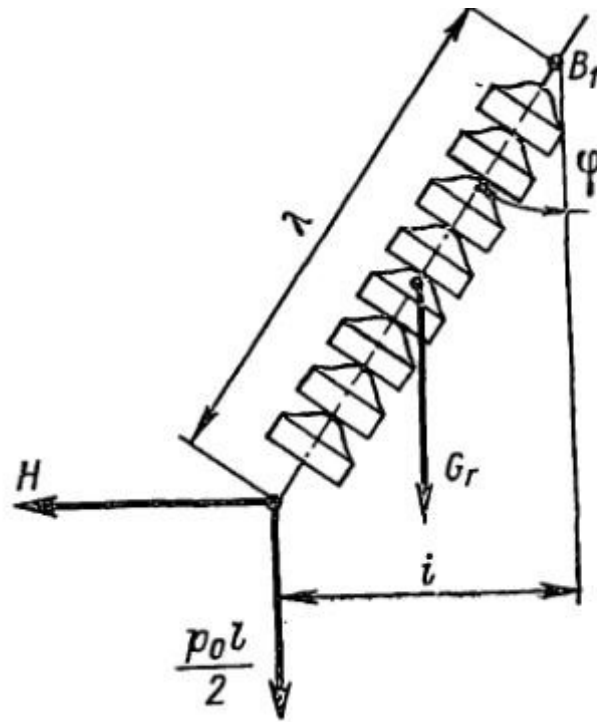


Рисунок 8.3 – Статическое равновесие гирлянды относительно точки ее подвеса.

$$H = \sqrt{p_0^2 l^2 + G_r^2 i^2} \quad (8.9)$$

$$M_1 = H \cdot i$$

Откуда, после преобразования получим:

$$i = \frac{H}{\sqrt{1 + \frac{p_0^2 l^2}{G_r^2}}}, \quad (8.10)$$

В рассматриваемом случае при неподвижной точке А  $\Delta l = i$ , следовательно:

$$EF_1 \cdot H - H + \frac{p_0 l^2}{2} = \frac{H_0^2}{1 + \frac{p_0^2 l^2}{G_r^2}}, \quad (8.11)$$

где  $H_0$  – начальное тяжение провода, даН;

$$H_0 = \sigma F, \quad (8.12)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение при растяжении в низшей точке, соответствующее условиям расчета, даН/мм<sup>2</sup>;

$F_p$  – фактическое сечение провода (расчетное), мм<sup>2</sup>.  $\lambda$  – длина гирлянды, м

Аналитическое решение уравнения (8.11) затруднительно, поэтому можно воспользоваться графическим методом решения уравнения, для чего выполняется графическое построение кривой 1 по уравнению (8.8) и кривой 2 по уравнению (8.10), после чего определяется точка их пересечения  $O_1$ , абсцисса которой определяет отклонение гирлянды, а ордината – искомое редуцированное тяжение в проводе.

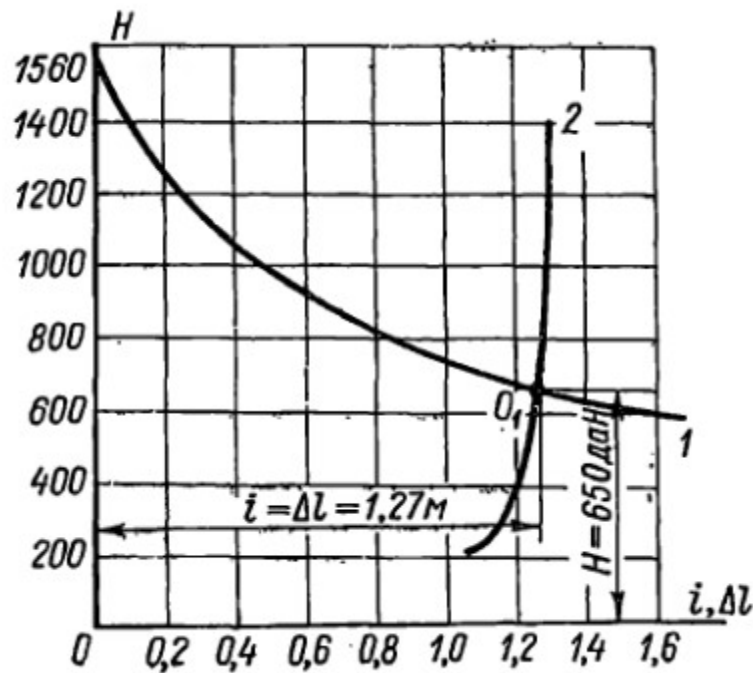


Рисунок 8.3 – Графическое решение уравнения 8.9

Значение стрелы провеса, соответствующее редуцированному тяжению провода и длине пролета, следует сравнивать с максимально допустимым. В случае превышения величины стрелы провеса допустимого значения следует говорить о нарушении габарита линии до земли в пролете.

## 2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением расчета и проверки механических характеристик провода при обрыве его в соседнем пролёте необходимо предварительно:

- 1) Выполнить выбор основных конструктивных элементов (Лабораторная работа №1);
- 2) Выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2);
- 3) Выполнить расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3);
- 4) Выполнить расчет критических пролетов и проверку изоляторов (Лабораторная работа №4).

После этого необходимо выбрать пункт меню «Аварийный режим» (рисунок 8. 4).

**Мех.расчет**

Расчет удельных механических нагрузок | Расчет провода | **Аварийный режим** | Шаблон

**Исходные данные**

Нап.м, кВ: 110 | Сечение провода: 240 | Район по ветру: 1 | Цепей линии: 1 | Тип опоры: ☒ Ж/Б ☐ Стальная | Марка изоляторов: ПФ6-Б

1. Выбрать провод | 3. Рассчитать ЦТ  
2. Выбрать опоры | 4. Рассчитать коэфф.

**Определение критических пролетов**

Tmax: 40 | Tгол: -5  
Tmin: -40 | Tсп.год: 0

Рассчитать критические пролеты

Первый критический пролет: 255.9078  
Второй критический пролет: 462.7156  
Третий критический пролет: L3 минималь

Режим: **низких температур** | Исходный

Коэффициенты запаса: поддерживающих гирлянд изоляторов; натяжных гирлянд изоляторов

n1= 10.948 >= 2.7 | n1= 1.777 >= 2.7  
n2= 15.129 >= 5 | n2= 2.6739 >= 5

**Систематический расчет провода**

| Расчетный режим | Сочетание климатических условий              | Напряжение пров. | Стрела провеса |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1               | Гололед, t=-5, скоростной напор ветра 0,25q  | 12.2             | 1.9538         |
| 2               | Гололед, t=-5, ветра нет                     | 9.2331           | 2.5474         |
| 3               | Гололеда нет, t=-5, скоростной напор ветра q | 8.6088           | 1.9402         |
| 4               | Гололеда нет, t среднегодовая, ветра нет     | 7.6114           | 2.1945         |
| 5               | Гололеда нет, t=-15, ветра нет               | 6.3755           | 2.6199         |
| 6               | Гололеда нет, t низшая, ветра нет            | 12.1999          | 1.3691         |
| 7               | Гололеда нет, t максимальная, ветра нет      | 4.9309           | 3.3874         |

Граф. | Закрыть

**4. Расчет ЦТ**

Количество изоляторов Z: 27 | Диаметр провода: 21.6

Нпр= 16.5 | Нгаб= 6 | Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000

Нпроев= 15.52 | Макс. стрела провеса = 9.22 | Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999995

Высота расположения приведенного ЦТ проводов= 9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**

Нормативный скоростной напор ветра Q: 27 | Толщина стенки гололеда: 5 | Аэродинамический коэффициент Cx: 1 | Коэффициент неравномерности: 1

Рисунок 8.4 – Главное окно программы

## **Оборудование и материалы**

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## **Указания по технике безопасности**

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

## **Задание Расчетная часть**

Исходные данные, необходимые для расчета редуцированного тяжения провода, представляются в таблице 8.1. Расчет редуцированного тяжения провода. длины пролета и стрелы провеса выполняется для режима, в котором

стрела провеса достигает своего наибольшего значения(т.е. режима максимальных температур или режима гололедных нагрузок).

1. Записать требуемые для расчета данные для всех перечисленных режимов, в таблицу 8.1.

Таблица 8.1.– Исходные данные для расчета тяжения по проводам в аварийном режиме

|                                                               |  |
|---------------------------------------------------------------|--|
| Режим                                                         |  |
| Единичная нагрузка $p_0$ , даН/м                              |  |
| Начальное напряжение провода $\sigma_0$ , даН/мм <sup>2</sup> |  |
| Расчетная стрела провеса, м                                   |  |
| Расчетный пролет, м                                           |  |
| Длина гирлянды, м                                             |  |
| Вес гирлянды, даН                                             |  |
| Расчетное сечение провода, мм <sup>2</sup>                    |  |
| Максимальная стрела провеса провода, м                        |  |

2. Расчет редуцированного тяжения провода при обрыве в соседнем пролете ведется графическим способом согласно расчетным формулам, приведенным в разделе 8.1. Для решения уравнения графическим способом рекомендуется рассчитать коэффициенты уравнений.

Расчетные данные представляются в таблице 8.2.

Таблица 8.2. –Расчетные данные для построения кривых (8.8) и (8.10.)

| Наименование показателя        | Значение показателя |  |  |  |
|--------------------------------|---------------------|--|--|--|
| Начальное тяжение, $H_0$ , даН |                     |  |  |  |
| Коэффициенты уравнения         |                     |  |  |  |
| $K_1=(l/EF)10^{-3}$            |                     |  |  |  |
| $K_2=(P_0 l^3/24)10^5$         |                     |  |  |  |
| $K_3=(p_0 l+G_r)/2$            |                     |  |  |  |

|                     |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|
| $K_4=10^5 / H_{02}$ |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|

3. Записать с учетом вычисленных коэффициентов уравнения (8.8.) и (8.10.)

$$\Delta l = K_1 \Delta H - H + K_0 \quad \Delta \quad {}_2 \Delta \Delta \Delta H_{12} - K_4 \Delta \Delta \Delta, \quad (8.13)$$

$$i = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \frac{\Delta \hat{E}_3 \Delta}{\Delta \Delta 2H \Delta \Delta}}}. \quad (8.14)$$

4. Рассчитать значения  $\Delta l$  в соответствии с 8.13, придавая значения  $H$  от значений начального тяжения  $H_0$  для 6-7 точек, последовательно снижая начальное тяжение на 100 даН.

Результаты представить в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Расчет графика  $\Delta l = f(H)$

| Н, даН      | $\Delta l = K_1 \Delta H - H + K_0 \quad \Delta \quad {}_2 \Delta \Delta \Delta H_{12} - K_4 \Delta \Delta \Delta, \text{м}$ |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $H_1$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_2$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_3$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_4$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_5$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_6$ , даН |                                                                                                                              |
| $H_7$ , даН |                                                                                                                              |

5. Построить кривую (8.8) для значений тяжений, определенных в п.4.

6. Рассчитать значения  $i$  в соответствии с 8.14, придавая значения  $H$  от значений начального тяжения  $H_0$  для 6-7 точек, последовательно снижая начальное тяжение на 100 даН.

Результаты расчета представить в таблице 8.4  
Таблица 8.4 – Расчет графика  $i=f(H)$

|                      |                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| H, даН               | $i = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \frac{E_3}{2H}}}, \text{ м}$ |
| H <sub>1</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>2</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>3</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>4</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>5</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>6</sub> , даН |                                                            |
| H <sub>7</sub> , даН |                                                            |

6. Построить кривую (8.10) для значений тяжений, определенных в п.4

7. Определить координаты точки пересечения кривых, построенных при выполнении п.п. 4 и 5.

8. Привести полученные редуцированных значений тяжения провода и длины пролета в аварийном режиме, а также стрелу провеса провода. Данные представить в таблице 8.5.

Таблица 8.5 – Расчет редуцированного напряжения в проводе и стрелы провеса в аварийном режиме

| № | Наименование показателя                                  | Значение показателя |  |  |  |  |
|---|----------------------------------------------------------|---------------------|--|--|--|--|
| 1 | Редуцированная длина пролета, м                          |                     |  |  |  |  |
| 2 | Редуцированное тяжение провода, даН                      |                     |  |  |  |  |
| 3 | Редуцированное напряжение в проводе, даН/мм <sup>2</sup> |                     |  |  |  |  |

|   |                                      |  |  |  |  |  |
|---|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| 4 | Стрела провеса в аварийном режиме, м |  |  |  |  |  |
| 5 | Отклонение габарита до земли         |  |  |  |  |  |

9. Сделать выводы о допустимости аварийного режима.

### **Работа с программой**

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen».

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 8.1 – 8.5, «PrintScreen» рабочего окна программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение аварийного режима работы воздушной линии?
2. Перечислите основные причины обрыва провода в пролете ВЛ?

3. Для каких районов прохождения трассы ВЛ наиболее частой причиной аварийного обрыва провода является несоответствие внешних нагрузок расчетным?
4. Назовите основную причину повреждения провода в поддерживающих зажимах?
5. Назовите причину недопустимого нагрева провода в натяжных зажимах, приводящего к его повреждению?
6. Опишите влияние обрыва провода в одном из пролетов на величину тяжений проводов в уцелевших пролетах?
7. Опишите влияние обрыва провода в одном из пролетов на величину стрел провеса проводов в уцелевших пролетах?
8. Приведите краткую характеристику аварийных схем ВЛ, в соответствии с которыми выполняются расчеты механических характеристик?
9. Для каких районов прохождения трассы ВЛ учет неравномерности гололедной нагрузки на провода является обязательным?
10. Дайте определение редукции и редуцированного тяжения провода?
11. Поясните физический смысл коэффициента редукции провода в аварийном режиме
12. Назовите главную причину появления редуцированного тяжения при обрыве провода в соседнем пролете?
13. Учитывается ли прогиб железобетонных и стальных опор вследствие одностороннего тяжения при обрыве провода?
14. . Какими факторами определяется отклонение гирлянды от вертикального положения?
15. Опишите влияние длины гирлянды на значение редуцированного тяжения при обрыве провода в соседнем пролете?

16. Опишите влияние длины пролета на значение редуцированного тяжения при обрыве провода в соседнем пролете?
17. Приведите алгоритм определения редуцированного тяжения провода при обрыве в соседнем пролете?
18. Из какого условия состояния гирлянды определяется величина ее отклонения от вертикального положения?
19. Назовите метод решения уравнения, связывающего редуцированное и доаварийное (начальное) тяжение провода ВЛ?
20. Назовите зависимости, графическое построение которых дает искомое значение редуцированного тяжения провода при его обрыве в соседнем пролете?
21. Приведите алгоритм построения кривых, определяющих редуцированное тяжение провода при его обрыве в соседнем пролете?
22. Какие параметры ВЛ определяют величину смещения точки подвеса провода при его обрыве в соседнем пролете

**Литература:** 1, 2, 3

## **Лабораторная работа 9 «Построение шаблона для расстановки опор по продольному профилю трассы и монтажных графиков»**

**Цель и содержание:** Развитие у студентов знаний основ метода определения места установки промежуточной опоры с помощью шаблона, а также, навыков работы с продольным профилем трассы.

### **Теоретическая часть**

#### **1 Требования к трассе ВЛ**

Выбор оптимальной трассы, обеспечивающей возможность экономичного сооружения воздушной линии, является важнейшей задачей, решаемой при проектировании и сооружении ВЛ. Наиболее дешевой была бы линия с самой короткой трассой, то есть проходящая по прямой линии и соединяющая пункты её начала и конца. Такой выбор в реальных условиях невозможен, так как на трассе могут находиться населенные пункты, промышленные сооружения, водные пространства, горы и другие препятствия, преодоление которых привело бы к увеличению стоимости линии. Поэтому выбор трассы для воздушной линии начинают с осмотра района прохождения по карте, на которую наносят ломаную линию, как можно более приближающуюся к прямой, но обходящую препятствия. После выбора трассы по карте производится осмотр района на местности. Самым удобным способом выбора трассы является аэрофотосъемка, позволяющая рассматривать ряд вариантов и определять наилучший из них.

При выборе трассы следует учитывать следующие факторы:

1. **Условия транспорта материалов на линию.** С этой точки зрения выгоднее строить трассы вдоль железных и шоссейных дорог, так как трассы, находящиеся на значительном расстоянии от транспортных путей, требуют

доставки материалов по бездорожью, что ведет к удорожанию строительства воздушной линии;

2. **Линии связи.** Вдоль шоссейных дорог обычно проходят линии связи, и при параллельном следовании линия электропередачи окажет влияние на линию связи, наводя мешающие электродвижущие силы. Поэтому трасса линии должна проходить на определенном расстоянии от линий связи, которое определяется в соответствии с указаниями по электромагнитной совместимости. Пересечения с линиями связи не представляют затруднений и не влияют на выбор трассы. В некоторых случаях производят переустройство линий связи или их замену на кабельные линии на участках пересечений;

3. **Переходы через водные преграды и инженерные сооружения.** Особое внимание обращают на выбор наиболее удобных мест переходов через реки, водные пространства и инженерные сооружения. Если переход через крупную судоходную реку неизбежен, то выбор трассы начинают именно с выбора места перехода. Наиболее удобным будет участок реки с высокими неразмываемыми берегами, так как при наличии такого участка установка опор нормальной высоты может обеспечить требуемый габарит проводов над водой.



Рисунок 9.1 – Переход воздушной линии 35 кВ через пролив Босфор-

## Восточный.

Если такого участка нет, то выбирают место, на котором река имеет меньшую ширину. Желательно, чтобы на пути перехода не было заливаемой поймы, в особенности поймы с ледоходом, так как потребуются установка специальных фундаментов, рассчитанных на давление льдин .



Рисунок 9.2 – Переход воздушной линии 500 кВ через реку Амур.

Согласно требованиям ПУЭ переход через водные преграды должен ограничиваться концевыми опорами, устанавливаемыми на расстоянии 300 – 700 м от переходных промежуточных опор. Переходы через железные и шоссейные дороги первой категории должны быть ограничены анкерными опорами, поэтому углы поворота трассы целесообразно совмещать с ними. Пересечения выбирают в тех местах, где пути проходят на уровне земли, или в выемках, чтобы не повышать опоры. При пересечении провода воздушной линии более высокого напряжения должны быть расположены над проводами линии более низкого класса напряжения. Встречающиеся на пути трассы линии электропередачи желательно пересекать ближе к середине пролёта, там, где провода и тросы находятся на меньшей высоте над землей и устанавливать

одну из опор пересекающей линии ближе к пересекаемой настолько, чтобы расстояние от пересекающей линии до проводов пересекаемой линии было не менее нормируемого. Нежелательно совмещение угла поворота трассы с точкой установки высокой переходной опоры, так как в этом случае необходимо будет установить высокую анкерную опору, масса которой значительно больше, чем масса промежуточной.

### **1.1 Продольный профиль трассы**

Одной из основных частей проекта воздушной линии электропередачи является продольный профиль трассы линии, на котором указаны места установки, типы и номера опор, длины отдельных пролетов и т. п. Наличие продольного профиля трассы с расставленными опорами позволяет определить необходимое количество опор, расход материалов для сооружения линии, составить план организации работ на линии и т. п. Продольный профиль трассы представляет собой очертания вертикального разреза вдоль трассы воздушной линии. Обычно рельеф трассы не бывает ровным, и профиль изображается ломаной линией.

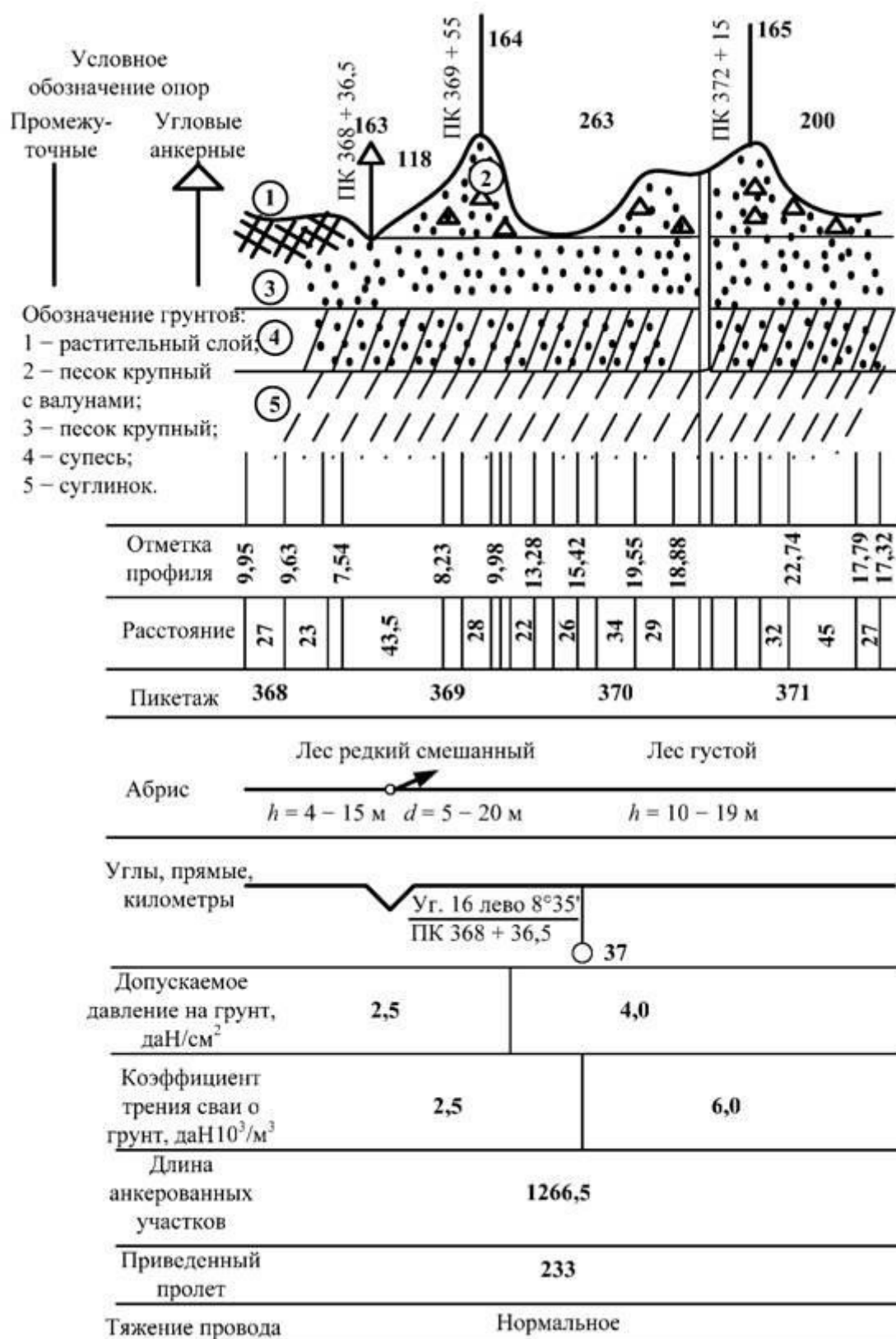


Рисунок 9.3 – Продольный профиль трассы.

Основное назначение профиля трассы - проверка вертикальных расстояний воздушных линий над землей. Чертеж профиля трассы выполняется в разных масштабах по вертикали и горизонтали. Как правило,

принимают масштаб по горизонтали - 1:5000, а вертикальный - 1:500, так как такой масштаб удовлетворяет требованию точности по определению точек установки опор и высоты провода над землей. На продольном профиле обозначают пересекаемые инженерные сооружения - железные и шоссейные дороги, линии электропередачи и связи, причем указывают отметки полотна дорог, а для линий - число проводов и их отметки. На чертеж профиля наносят геологический разрез, на котором указывают глубину залегания грунтов и их вид.

Под горизонтальной линией, ограничивающей чертеж профиля, наносят следующие данные:

- горизонтальные расстояния между точками, отметки которых были измерены;
- пикетаж - длина трассы в сотнях метров. Положение отдельных опор условно записывают в виде  $369 + 55$ , что обозначает расстояние 55 м от пикета 369 или расстояние  $36900 + 55 = 36955$  м от начала трассы;
- абрис (ситуация) - узкая полоса плана линии, где указываются границы пересекаемых трассой полей, лугов, болот, лесов, рек и инженерных сооружений;
- углы поворота - условные обозначения углов поворота линии с указанием их точных значений. Углы поворота влево обозначают зигзагообразной линией вниз от горизонтальной, углы поворота вправо - вверх от горизонтальной линии;
- допускаемое давление опоры на грунт;
- графы, относящиеся к длине анкерowanych участков, приведенному пролёту и тяжению провода заполняют после расстановки опор по профилю трассы.

### 1.3 Расстановка опор

Расстановка опор по продольному профилю трассы осуществляется с помощью шаблона, который строится на основании кривой провисания провода (кривая 1)

$$y = \frac{x^2}{200} + 0,4 \frac{x^4}{200^2} - K_{ш} \frac{x^2}{100} \quad (9.1)$$

где  $\frac{x^2}{200}$ ,  $\frac{x^4}{200^2}$  – принимают из систематического расчета провода как правило, для расчетного режима гололеда с ветром.

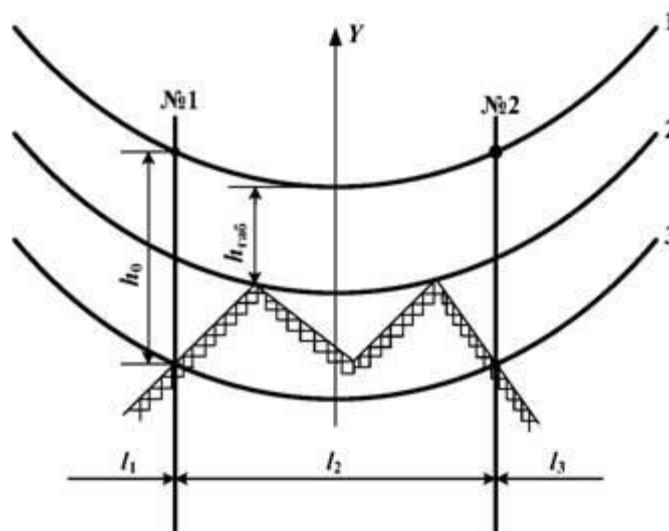


Рисунок 9.4 – Построение шаблона

Кривая 2 – называется габаритной кривой и служит для проверки габарита от проводов до земли и пересекаемых инженерных сооружений. При построении сдвигается вниз по вертикали от кривой 1 на расстояние, равное требуемому габариту:  $h_{габ} = \Gamma + (0,3 : 0,5)$ , где  $\Gamma$  - требуемый габарит (наименьшее расстояние от проводов до поверхности земли, или инженерных сооружений), м;  $(0,3 + 0,5)$  - запас габарита для учета неровностей профиля, м. Важным условием является то, что кривая 2 должна только касаться линии

профиля, как показано на рисунке 9.4, а не пересекать ее. Только в этом случае можно говорить о том, что требуемый габарит выдержан.

Кривая 3 – называется земляной кривой и служит для правильного наложения шаблона без измерения и обозначения высоты подвеса провода на опорах. Ее сдвигают вниз от кривой 1 на расстояние, равное высоте подвеса провода на опорах:

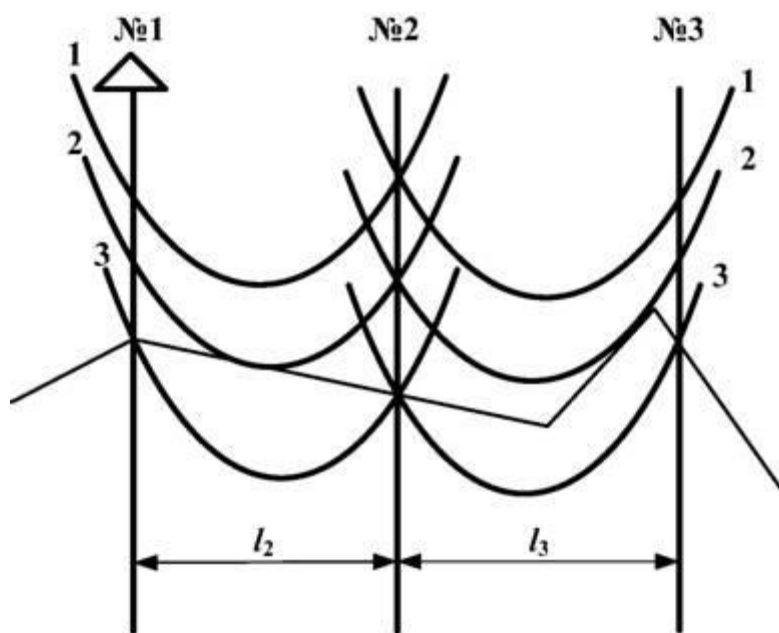


Рисунок 9.5 – Расстановка опор при помощи шаблона.

Расстановки опор по профилю начинают с концевой или с угловой опоры и продолжают в пределах участка до следующего угла или до анкерной опоры, положение которой может быть установлено заранее, например, до анкерной опоры перехода через инженерное сооружение или водную преграду. Положение концевой опоры зависит от выбранного положения подстанции, а положение угловой опоры должно совпадать с углами поворота линии, определенными соответствующими точками на профиле.

Предположим, что опора № 1 на рисунок 9.5 является концевой или угловой. Шаблон накладывается на профиль так, чтобы кривая 3 пересекала профиль в точке установки опоры № 1, ось шаблона была вертикальной, а кривая 2 только касалась профиля, тогда вторая точка пересечения кривой 3 с профилем определит местоположение опоры №2. Место установки опоры №2 отмечают на шаблоне и, повторяя операцию наложения шаблона, находят место установки всех последующих опор. Если последний пролёт окажется малым, то его следует увеличить за счет некоторого сокращения предыдущих, соблюдая условие, что смежные пролёты промежуточных опор не должны отличаться по длине друг от друга более чем в два раза.

При расстановке опор на пересеченной местности встречаются случаи, когда промежуточная опора № 3 (рисунок 9.6) устанавливается на более низкой отметке, чем соседние промежуточные опоры № 2 и № 4.

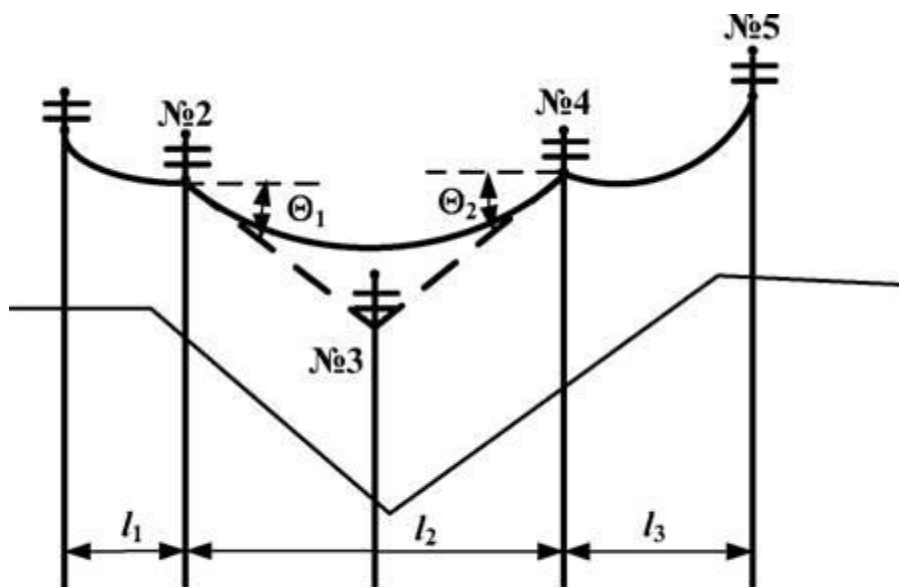


Рисунок 9.6 – Установка одной из опор на низкой отметке.

Установка такой опоры необходима, если при ее отсутствии значение пролёта сильно превышает значение пролёта, принятого в расчете. В этом случае необходимо проверить, не будет ли вертикальная сила, направленная

вверх поднимать поддерживающую гирлянду изоляторов, что может вызвать замыкание провода на землю через траверсу опоры.

Для предотвращения подъема поддерживающих гирлянд применяют следующие мероприятия:

1. подвеска грузов на гирляндах опоры № 3;
2. установка анкерной опоры вместо промежуточной;
3. ослабление тяжения провода.

Последнее мероприятие рекомендуется в исключительных случаях, так как при ослаблении тяжения увеличиваются стрелы провисания проводов, и как следствие, число опор на всем участке.

Вес груза можно найти по формуле:

$$G_{гр} = V \cdot (0,3 \div 0,5) \cdot p \cdot l_{габ}, \quad (9.2)$$

где  $p_l$  – нагрузка на провод без гололеда, даН/м;  $l_{габ}$

– габаритный пролёт, м;

$V$  – вырывающая сила, определяемая по формуле:

$$V = H \cdot (tg \Theta_1 + tg \Theta_2) \quad (9.3)$$

где  $H$  – тяжение в низшей точке кривой провисания провода, даН;

$\Theta_1$  и  $\Theta_2$  – углы наклона к горизонтали прямых, соединяющих точки подвеса на опорах № 2 и № 3, а также № 3 и № 4, град.

Установка переходных опор и монтаж проводов должны выполняться особенно точно, так как недостаточные габариты над пересекаемыми объектами недопустимы. Основной целью расчета переходов является определение высоты над пересекаемыми объектами. В первом приближении эту высоту определяют при помощи шаблона по расстоянию от кривой 1 до пересекаемого объекта. После выбора положения опор по шаблону необходимо проверить полученное расстояние расчетом. Проверку производят, исходя из отметок точек подвеса провода на опорах, а также расстояния до пересекаемого объекта  $x$  (рисунок 9.7) по формуле:

$$\Gamma \leq h_B - y \leq h \quad (9.4)$$

где  $h_B$  – отметка подвеса провода на опоре, м;  $h$

– отметка пересекаемого объекта, м.

Допуская, что продольный профиль трассы сохраняет равнинный характер, стрелу провисания провода над пересекаемым объектом можно найти по формуле:

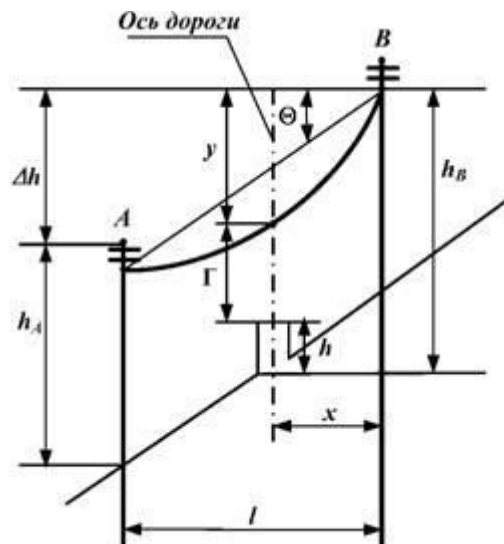
$$f_x = \frac{\sigma}{2\gamma} x(l-x) \quad (9.5)$$

Если продольный профиль имеет уклон (рис.9.7), то формула 9.5 примет вид:

$$y = \frac{\sigma}{2\gamma} x(l-x) + x \tan \Theta \quad (9.6)$$

где  $\Theta$  – угол уклона, град.

В общем случае значения  $\sigma$  и  $\gamma$  в формуле (9.5) принимаются из расчета провода для режима, в котором стрела провеса получается наибольшей. Исключения составляют переходы через железную дорогу, где эти величины определяются для температуры  $+70^\circ\text{C}$  (с учетом нагрева проводов электрическим током) и на пересечениях линий между собой - при температуре  $+15^\circ\text{C}$ .



### Рисунок 9.7 – Переход через автомобильную дорогу

Если переход ограничен с обеих сторон анкерными опорами, то расчет габарита производится только по нормальному режиму. Если одна или обе опоры промежуточные, то при пересечениях линий связи, железных и автомобильных дорог, трамвайных и троллейбусных линий, надземных трубопроводов и канатных дорог линиями с проводами сечением менее 185 мм требуется расчет габарита по аварийному режиму при обрыве провода в соседнем пролёте. Расчет габарита в аварийном режиме производится при среднегодовой температуре и отсутствии гололеда и ветра.

При пересечениях воздушных линий между собой расчет аварийного режима не требуется.

Алгоритм построение шаблона следующий

1. Рассчитывается коэффициента шаблона, при этом значения удельной нагрузки и напряжения соответствуют режиму, в котором стрела провеса достигает максимального значения.

2. Строится кривая провисания провода в соответствии с выражением

(9.1.):

- 2.1 Центр координатной плоскости соответствует положению максимального провисания провода в середине пролета

- 2.2 Последовательно вправо и влево от центра откладываются по оси абсцисс значения длин пролетов, находящиеся в пределах половины значения габаритного пролета.

- 2.3 Для каждого значения  $x$  определяется значение  $y$  в соответствии с расчетным выражением

3. Габаритная кривая располагается на шаблоне на расстоянии, равном габаритному расстоянию до земли, относительно кривой провисания провода

4. Земляная кривая на шаблоне расположена на расстоянии, равном величине максимальной стрелы провеса.

При расстановке опор по профилю необходимо следить, чтобы фактическое значение ветрового пролета не превышало принятого в

$$\text{расчете значения, т. е. } l_{\text{вет расч.}} \leq l_{\text{вет}} \quad (9.7)$$

$$l_{\text{вет расч.}} \leq l_1 + l_2 \quad (9.8)$$

Весовой пролет опоры соответствует значению, принятому в расчете опоры для определения весовых нагрузок от проводов и тросов. При установке опор с одинаковой высотой подвеса провода на идеально ровной поверхности его вес распределяется на обе опоры одинаково и тогда  $l_{\text{вес}} = l_{\text{габ.}}$

При различной высоте точек подвеса провода на соответствующие опоры передается вес провода на участке от точки подвеса до низшей точки провода в пролете. Длина этого участка, равная расстоянию между низшими точками провисания проводов в соседних пролетах, не должна превышать значения, принятого в расчете опоры  $l_{\text{вес.}}$

$$l \leq l_{\text{вес.}} \quad (9.9) \text{ вес расч. вес}$$

## 1.4 Монтажные графики

При монтаже провод должен быть подвешен с таким тяжением, чтобы напряжение в проводе во всех режимах соответствовало расчетным значениям. Тяжение провода может быть измерено непосредственно при помощи динамометра или определено косвенным путем по значению стрелы провеса. Последний способ дает более надежные результаты, поэтому необходимое тяжение определяют по замеру стрелы провеса. В большинстве случаев можно измерять стрелу провеса путем визирования с опоры на опору,

что наиболее удобно (рис.9.8. а). Если стрела провеса превышает высоту точки подвеса провода на опоре, то следует визировать стрелу провеса по наклонной прямой, параллельной прямой, соединяющей точки подвеса провода (рис.9.8. б) , либо стрелу провеса малого эквивалентного пролета(рис.9.8 в, г). Визирование с земли или визирование стрелы провеса малого эквивалентного пролета с опоры возможно только в случае, если обе опоры анкерного типа.

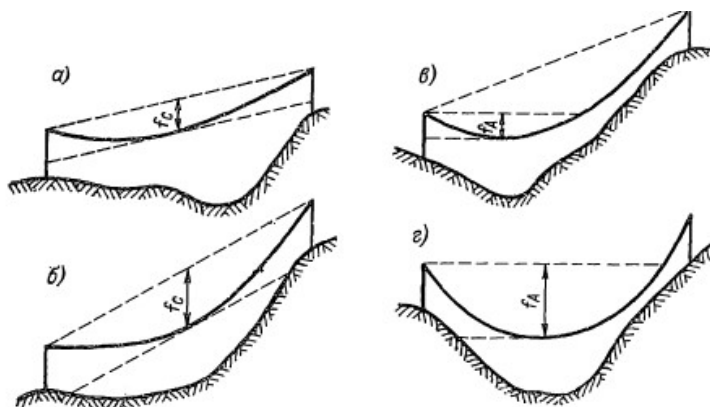


Рисунок 9.8 – Возможные случаи визирования стрелы провеса

На анкерованном участке достаточно замерять стрелу провеса на двухтрех промежуточных пролетах, поэтому выбираются такие пролеты, на которых возможно визировать стрелу провеса с опоры на опору.

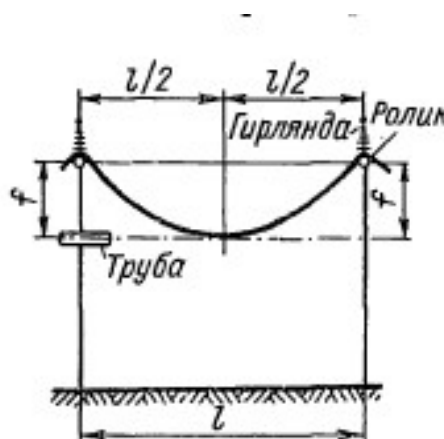


Рисунок 9.9 – Визирование стрелы провеса с опоры

В проводах анкерованного участка с разной длиной пролетов устанавливается напряжение, соответствующее значению приведенного

пролета. Поэтому стрелы провеса анкерованных участков нельзя определять по систематическому расчету провода, в котором значения стрел провеса указаны для напряжений, соответствующих фактическим пролетам.

Монтажные стрелы провеса следует определять по формуле

$$f = \frac{l^2}{8\sigma_{np}} \quad (9.10)$$

где  $l$ —длина фактического пролета;  $\sigma_{np}$  — напряжение, соответствующее фактическому пролету. Расчет монтажных стрел провеса можно определять по формуле:

$$f = f_{np} \frac{l^2}{l_{np}^2} \quad (9.11)$$

Зависимость стрел провеса от температуры практически линейна, поэтому можно вычислять стрелы провеса для значений приведенных пролетов по систематическому расчету для температур -40 градусов и +40 градусов, соединить полученные точки прямыми и определить стрелы провеса для промежуточных температур путем линейной интерполяции. Монтажные кривые представляют собой зависимости тяжения по проводам от температуры и стрелы провеса провода от температуры. По этим зависимостям производится монтаж проводов. Монтажные кривые строятся для визируемых пролетов, которые определяются в зависимости от длины анкерного пролета.

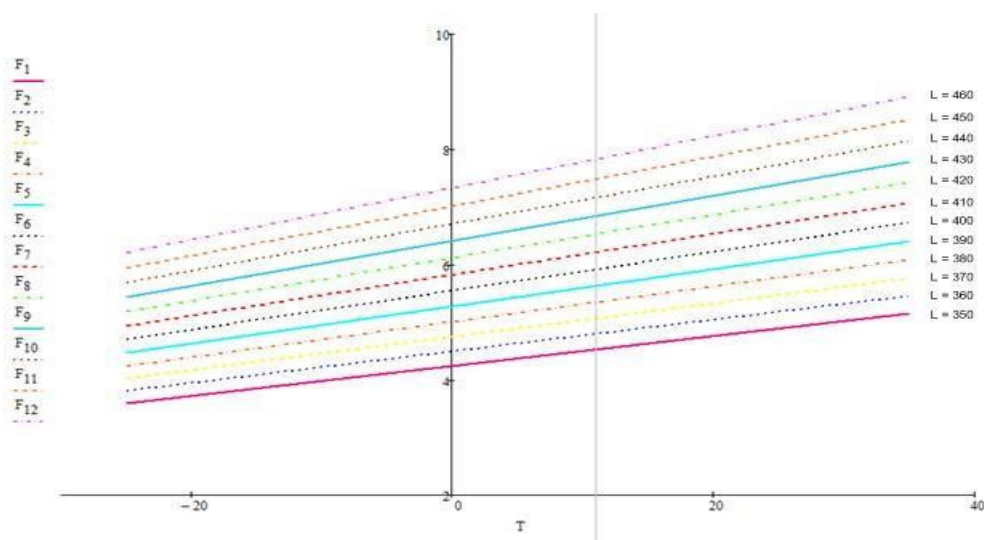


Рисунок 9.10 –Монтажные кривые

В процессе работы на линии провода вытягиваются и стрелы провеса увеличиваются. Вытяжка происходит в основном в течении первого зимнего периода эксплуатации линии, когда напряжения в проводе достигают наибольших значений, в последующие периоды этот процесс затухает. В соответствии с разработкой комиссии СИГРЭ вытяжка проводов определяется в зависимости от его конструкции, характеристик и условиями работы провода.

## 2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением построения шаблона необходимо предварительно:

1. Выполнить выбор основных конструктивных элементов

(Лабораторная работа №1);

2. Выполнить расчет поправочных коэффициентов (Лабораторная работа №2);

3. Выполнить расчет удельных механических нагрузок (Лабораторная работа №3);

4. Выполнить расчет критических пролетов и проверку изоляторов (Лабораторная работа №4).

После этого необходимо выбрать пункт меню «Шаблон» (рисунок 9. 11).

**Исходные данные**

Уном. кВ: 110, Сечение провода: 240, Район по ветру: 1, Цепь линии: 1, Тип опоры: Ж/Б, Марка изоляторов: ПФ6-Б

**Определение критических пролетов**

Tmax: 40, Tmin: -40, Tгол: -5, Tср.год: 0

**Систематический расчет провода**

| Расчетный режим | Сочетание климатических условий              | Напряжение пров. | Стрела провеса |
|-----------------|----------------------------------------------|------------------|----------------|
| 1               | Гололед, t=-5, скоростной напор ветра 0,25q  | 12.2             | 1.9538         |
| 2               | Гололед, t=-5, ветра нет                     | 9.2331           | 2.5474         |
| 3               | Гололеда нет, t=-5, скоростной напор ветра q | 8.6088           | 1.9402         |
| 4               | Гололеда нет, t среднегодовая, ветра нет     | 7.6114           | 2.1945         |
| 5               | Гололеда нет, t=+15, ветра нет               | 6.3755           | 2.6199         |
| 6               | Гололеда нет, t низшая, ветра нет            | 12.1999          | 1.3691         |
| 7               | Гололеда нет, t максимальная, ветра нет      | 4.9309           | 3.3874         |

**4. Расчет ЦТ**

Количество изоляторов: 7, Нтр=16.5, Нгол=6, Нпров=15.52, Макс.стрела провеса=9.22, Высота расположения приведенного ЦТ проводов=9.3733

**5. Расчет поправочных коэффициентов**

Нормативный скоростной напор ветра Q: 27, Диаметр провода: 21.6, Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий высоту подвески провода: 0.8000000, Толщина стенки гололеда: 5, Аэродинамический коэффициент Cx: 1, Поправочный коэффициент по гололеду, учитывающий диаметр провода: 0.8999999, Кэффициент неравномерности: 1

Рисунок 9.11 – Главное окно программы

## Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15”. Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

## Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу

лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки. Инструкция по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» приведена в Приложении 4.

### **Задание Расчетная часть**

Исходные данные, необходимые для расчета шаблона графиков представляются в таблице 9.1.

1. Расчетным режимом для построения является режим, при котором стрела провеса провода принимает максимальное значение, что определяется на основании результата систематического расчета проводов. Наименование и параметры исходного режима представляются в таблице 9.1.

Таблица 9.1– Исходные данные для расчета шаблона

| № п/п | Наименование показателя                    | Значение показателя |
|-------|--------------------------------------------|---------------------|
| 1.    | Наименование расчетного режима             |                     |
| 2.    | Удельная нагрузка, даН/ммм <sup>2</sup>    |                     |
| 3.    | Напряжение в проводе, даН/ммм <sup>2</sup> |                     |

2. В соответствии с алгоритмом расчета шаблона, приведенном в теоретической части лабораторной работы, выполнить вычисления значений  $X$  и  $Y$  кривой провисания провода с учетом принятых масштабов. Данные расчета представить в таблице 9.2

Таблица 9.1– Расчет шаблона

|        |        |        |        |        |       |   |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| $X, м$ | $-X_1$ | $-X_2$ | $-X_3$ | $-X_4$ | $X_5$ | 0 | $+X_1$ | $+X_2$ | $+X_3$ | $+X_4$ | $+X_5$ |
|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---|--------|--------|--------|--------|--------|

|          |                 |                 |                 |                 |                |   |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| X,<br>мм | -X <sub>1</sub> | -X <sub>2</sub> | -X <sub>3</sub> | -X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | 0 | +X <sub>1</sub> | +X <sub>2</sub> | +X <sub>3</sub> | +X <sub>4</sub> | +X <sub>5</sub> |
| Y, м     | Y <sub>1</sub>  | Y <sub>2</sub>  | Y <sub>3</sub>  | Y <sub>4</sub>  | Y <sub>5</sub> | 0 | Y <sub>6</sub>  | Y <sub>7</sub>  | Y <sub>8</sub>  | Y <sub>9</sub>  | Y <sub>10</sub> |
| Y,<br>мм |                 |                 |                 |                 |                | 0 |                 |                 |                 |                 |                 |

3. Построить габаритную кривую, которая располагается на шаблоне на расстоянии, равном габаритному расстоянию до земли, относительно кривой провисания провода

4. Построить земляную кривую, которая на шаблоне расположена на расстоянии, равном величине максимальной стрелы провеса.

5. Привести рисунок шаблона.

6. Рассчитать в соответствии с выражением (9.7) значения стрел провеса для температур -40 и +40 градусов Цельсия для 10 значений габаритных пролетов, лежащих в пределах, указанных в характеристиках марки промежуточной опоры, определенной при выборе основных конструктивных элементов ВЛ

Результаты представить в таблице 9.3

7. Построить и привести на рисунке монтажные кривые.

### **Работа с программой**

После ввода исходных данных аналогично лабораторной работе №1, необходимо выполнить действия, описанные в теоретической части: «2 Программные средства, используемые для выполнения лабораторной работы». Результаты расчета сохранить с помощью «PrintScreen».

### **Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать расчет заданных параметров с последующим внесением результатов в таблицы 9.1 – 9.3, «PrintScreen» рабочего окна

программы, в заключении лабораторной работы должны быть выводы по результатам работы и сравнение расчетов.

Выбор исходных данных осуществляется из таблицы 1.1 лабораторной работы №1 в соответствии с заданным преподавателем номером варианта.

Отчёт должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Отчёт выполняется на листах стандартных размеров формата А4, заполненных с одной стороны. Листы нумеруются. В отчёте должен быть приведен список использованных источников.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите мероприятия, выполняемые в обязательном порядке при выборе наилучшего варианта трассы воздушной линии и технические средства, применяемые в этих целях?
2. Назовите и дайте краткую характеристику факторам, влияющим на выбор трассы?
3. Назовите требования ПУЭ, которые должны соблюдаться при выполнении перехода линии через водные преграды?
4. Назовите требования ПУЭ, которые должны соблюдаться при выполнении перехода линии через железные и шоссейные дороги первой категории?
5. Назовите определение продольного профиля трассы, его назначение, особенности?
6. Какой линией изображается продольный профиль трассы на чертеже?
7. Какая информация отображается под горизонтальной линией, ограничивающей чертеж профиля?
8. Какая информация отображается над горизонтальной линией, ограничивающей чертеж профиля?

9. Дайте определение терминам: пикетаж, абрис ?
10. Назовите горизонтальный и вертикальный масштабы, которые обычно используется при графическом отображении продольного профиля трассы?
11. Назовите назначение шаблона?
12. Какие исходные данные требуется для построения шаблона?
13. Назовите режим, параметры которого являются исходными при построении шаблона?
14. Приведите алгоритм построения шаблона?
15. Приведите название кривых, представленных на шаблоне?
16. Приведите алгоритм нахождения точки на профиле трассы, показывающей место установки первой промежуточной опоры после анкерной с помощью шаблона?
17. С какой опоры начинается расстановка опор с помощью шаблона?
18. . В каких случаях может возникнуть необходимость установки опоры на более низкой отметке, чем соседние промежуточные опоры?
19. Назовите назначение монтажных графиков?
20. Приведите алгоритм построения монтажных графиков?
21. Зависимость каких механических параметров ВЛ представляют монтажные графики?
22. Укажите цель проверки весовых и ветровых пролетов после расстановки опор по продольному профилю трассы. К каким последствиям может привести нарушение требований к их величинам?

**Литература:** 1, 2, 3

## Литература

1. К.П.Крюков, Б.П.Новгородцев. Конструкция и механический расчет ЛЭП. Изд.Энергия. 1979.-312 с.
2. Электрические системы. Электрические сети: Учебник для электроэнергетических спец.Вузов/В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А. Жуков и др.: Под ред.В.А. Веникова,В.А.Строева.-2-е изд., перераб. и доп.М.: Высш. шк., 1998.-511с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича.- М.: Изд. НЦ ЭНАС.- 2012.- 352 с.
4. Буцманова И. В., Платонова Т.Н. Фомичева Н.Б. Электротехнический справочник том 3 книга 1 Производство и распределение электрической энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 890 с.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича.- М.: Изд. НЦ ЭНАС.- 2012.- 352 с.
6. Электротехнический справочник : в 4 т. / под ред. А. И. Герасимова, А. Ф. Дьякова, Н. Ф. Ильинского и др., Т. 3, Производство, передача и распространение электрической энергии. – 8-е изд., испр. и доп. – М. : МЭИ, 2002. – 964с. : ил. – Предм. указ.: с. 961-963. – ISBN 5-7046-0099-9 Приложение 1

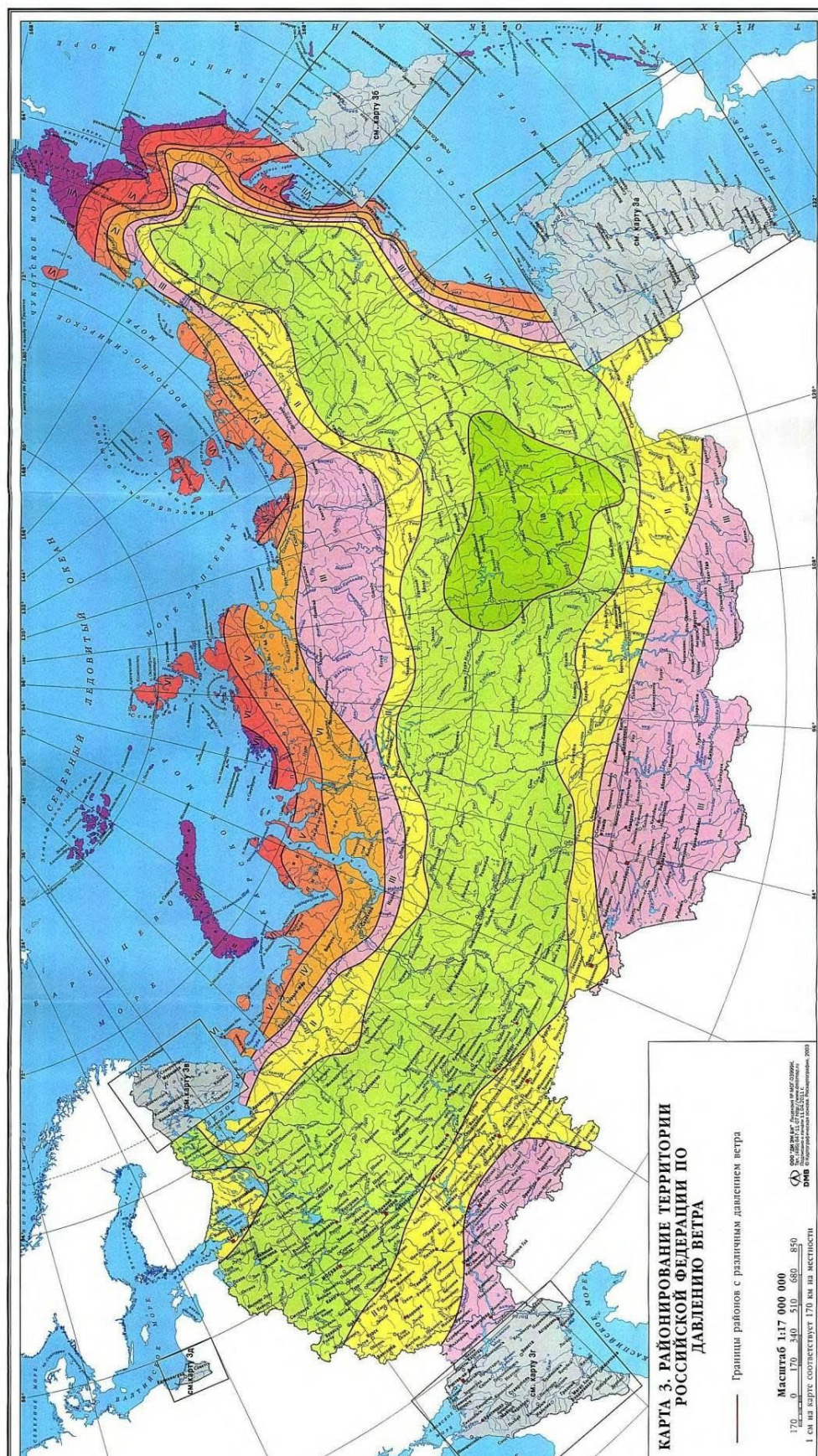


Рисунок П 1.1 – Районирование территории РФ по давлению ветра





КАРТА 3в. РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ  
И ОСТРОВА САХАЛИН ПО ТОЛЩИНЕ СТЕНКИ ГОЛОЛЁДА

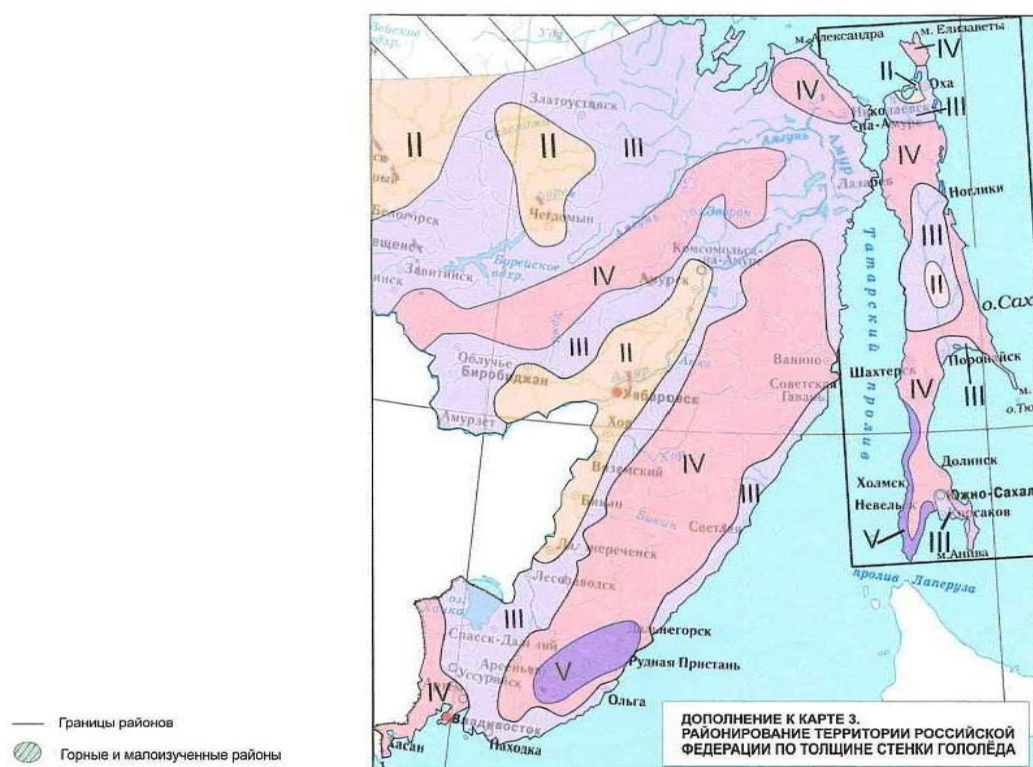


Рисунок П 1.5 – Районирование территории Приморского Края по толщине  
стенки гололеда

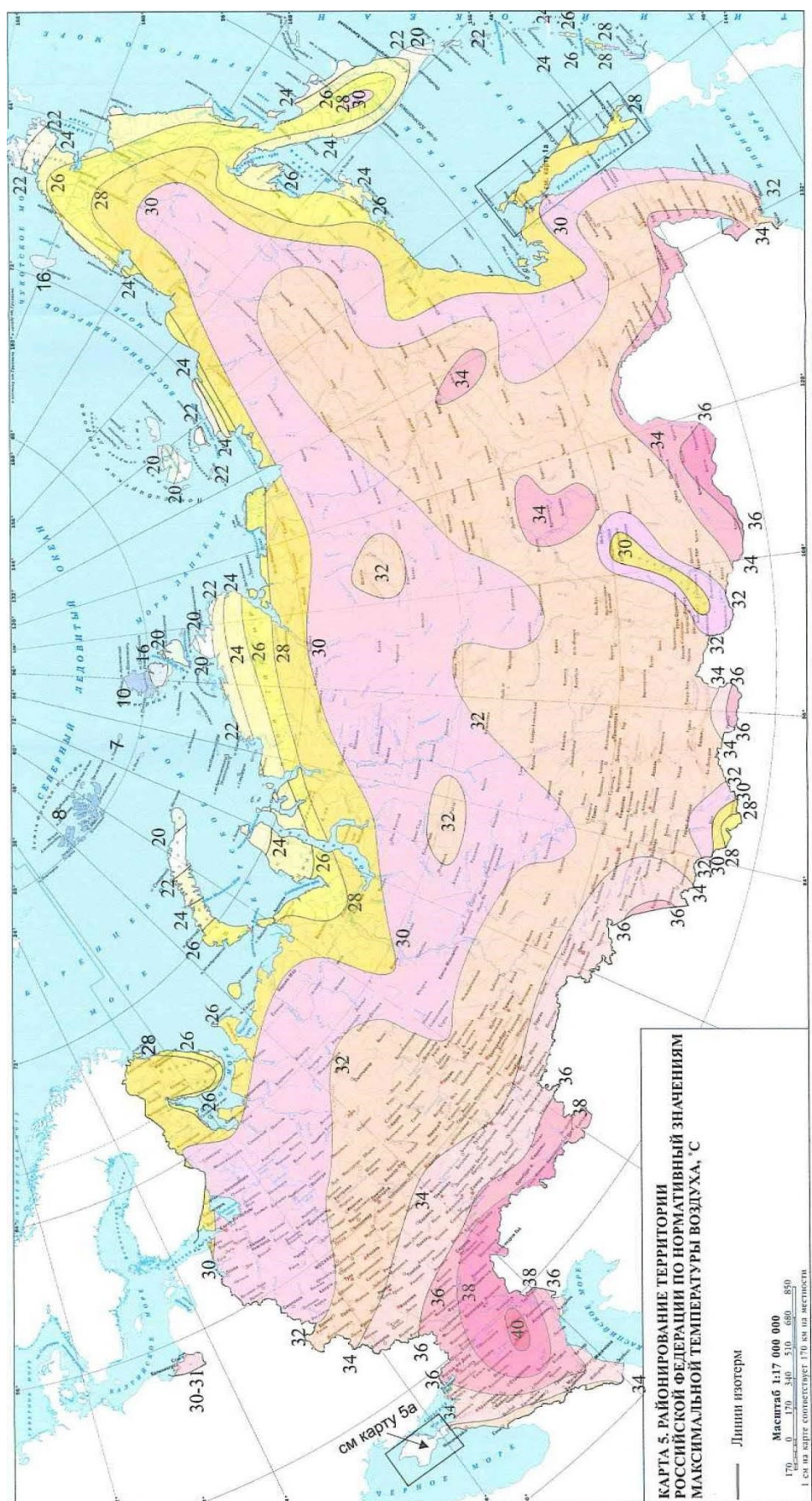


Рисунок П 1.6 – Районирование территории РФ по нормативным значениям максимальной температуры воздуха



Рисунок П 1.7 – Районирование территории республики Крым по нормативным значениям максимальной температуры воздуха

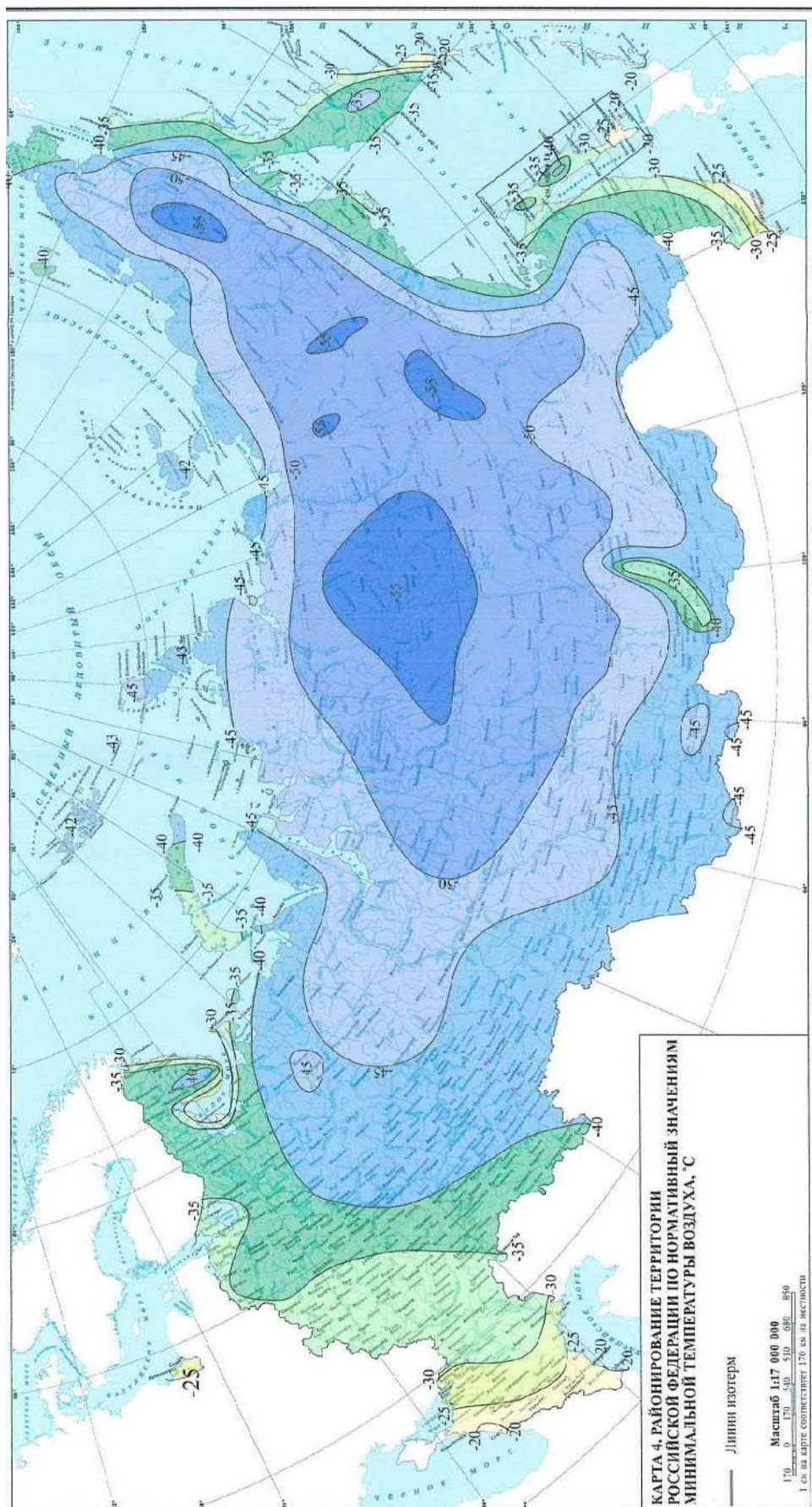


Рисунок П 1.8 – Районирование территории РФ по нормативным значениям минимальной температуры воздуха



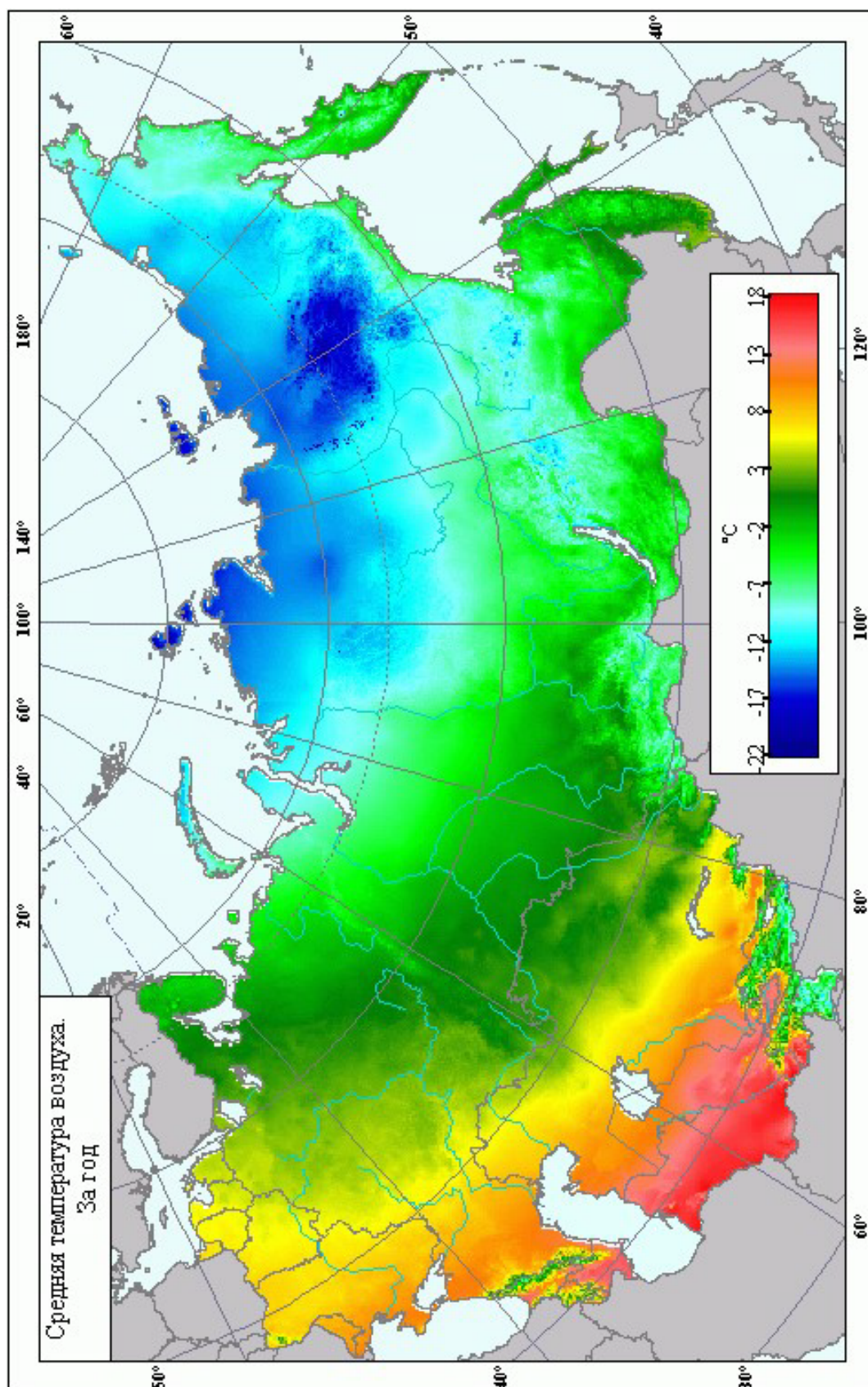


Рисунок П 1.10 – Районирование территории РФ по нормативным значениям средней температуры воздуха за год

## Справочные данные

Таблица П 2.1 – Нормативные скоростные напоры,  $\text{даН/м}^2$  и приближенные скорости ветра  $\text{м/с}$ , для высоты до 15 м над поверхностью земли.

| Ветровой район | повторяемость |    |                |    |                |    |
|----------------|---------------|----|----------------|----|----------------|----|
|                | 1 раз в 5 лет |    | 1 раз в 10 лет |    | 1 раз в 15 лет |    |
|                | q             | v  | q              | v  | q              | v  |
| 1              | 27            | 21 | 40             | 25 | 55             | 30 |
| 2              | 35            | 24 | 40             | 25 | 55             | 30 |
| 3              | 45            | 27 | 50             | 29 | 55             | 30 |
| 4              | 55            | 30 | 65             | 32 | 80             | 36 |
| 5              | 70            | 33 | 80             | 36 | 80             | 36 |
| 6              | 85            | 37 | 100            | 40 | 100            | 40 |
| 7              | 100           | 40 | 125            | 45 | 125            | 45 |

Таблица П 2.2 – Коэффициенты увеличения скоростных напоров ветра и скоростей ветра по высоте

| Зона по высоте | Скоростной напор ветра | Скорость ветра |
|----------------|------------------------|----------------|
| До 15 м        | 1,0                    | 1,0            |
| 20             | 1,25                   | 1,12           |
| 40             | 1,55                   | 1,24           |
| 60             | 1,75                   | 1,32           |
| 100            | 2,1                    | 1,45           |
| 200            | 2,6                    | 1,61           |
| 350 и выше     | 3,1                    | 1,76           |

Таблица П 2.3 – Коэффициенты неравномерности скоростных напоров ветра

| Скоростной напор ветра, $\text{даН/м}^2$ | Коэффициент неравномерности $\alpha$ |
|------------------------------------------|--------------------------------------|
| До 27                                    | 1,0                                  |
| 40                                       | 0,85                                 |

|            |      |
|------------|------|
| 55         | 0,75 |
| 76 и более | 0,7  |

Таблица П 2.4 – Нормативная толщина стенки гололеда, мм, для высоты 10 м над поверхностью земли.

| Район по гололеду | Повторяемость    |                |
|-------------------|------------------|----------------|
|                   | 1 раз в пять лет | 1 раз в 10 лет |
| 1                 | 5                | 5              |
| 2                 | 5                | 10             |
| 3                 | 10               | 15             |
| 4                 | 15               | 20             |
| особый            | 20 и более       | 22 и более     |

Таблица П 2.5 – Поправочный коэффициент на стенку гололеда на диаметр провода

| Диаметр провода, мм | Поправочный коэффициент |
|---------------------|-------------------------|
| 5                   | 1,1                     |
| 10                  | 1,0                     |
| 20                  | 0,9                     |
| 30                  | 0,8                     |
| 50                  | 0,7                     |
| 70                  | 0,6                     |

Таблица П 2.6 – Поправочный коэффициент на стенку гололеда по высоте

| Высота | Поправочный коэффициент |
|--------|-------------------------|
| 5      | 0,8                     |
| 10     | 1,0                     |
| 20     | 1,2                     |
| 30     | 1,4                     |

|           |     |
|-----------|-----|
| 50        | 1,6 |
| 70        | 1,8 |
| Более 100 | 2,0 |

Таблица П 2.7 – Наименьшие допускаемые расстояния проводов воздушных линий до земли.

| Номинальное напряжение | Расстояние, м |
|------------------------|---------------|
| 6-10                   | 6,0           |
| 35-110                 | 6,0           |
| 150                    | 6,5           |
| 220                    | 7,0           |
| 330                    | 7,5           |
| 500                    | 8,0           |

Приложение 3

### Справочные данные

Таблица П 3.1 – Рекомендуемая область применения проводов различных марок

| Область применения                                                                                                                         | Марка провода   | Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> | Отношение сечения алюминиевой части провода к сечению стального сердечника |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Районы с толщиной стенки гололеда до 20 мм                                                                                                 | АС, АЖ          | До 185                               | 6 – 6,25                                                                   |
|                                                                                                                                            |                 | 240 и более                          | 7,71 – 8,04                                                                |
| Районы с толщиной стенки гололеда более 20 мм                                                                                              | АС              | До 95                                | 6                                                                          |
|                                                                                                                                            |                 | 120 – 140                            | 4,29 – 4,39                                                                |
|                                                                                                                                            |                 | 500 и более                          | 7,71 – 8,04                                                                |
| На побережье морей, соленых озер, в районах засоленных песков, в промышленных районах, где сталеалюминевые провода разрушаются от коррозии | АСК, АСКС, АСКП | 120 – 300                            | 6,11 – 6,25                                                                |
| Сети сельскохозяйственного назначения напряжением до 110 кВ                                                                                | А               | 50 – 240                             | –                                                                          |
|                                                                                                                                            | Ж               | 50 – 185                             | –                                                                          |

Таблица П 3.2 – Расчетные данные сталеалюминевых проводов марок АС, АСК (ГОСТ 839-80)

| Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> (алюминий/сталь) | Алюминиевая часть провода |                      | Расчетные данные провода                  |                     |                          |       |                                             |                               |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------------|---------------------|--------------------------|-------|---------------------------------------------|-------------------------------|
|                                                       | Число проволок            | Диаметр проволок, мм | Сопротивление пост. току при 20 °С, Ом/км | Диаметр провода, мм | Сечение, мм <sup>2</sup> |       | Отношение сечения алюминия к стальной части | Удельная масса провода, кг/км |
|                                                       |                           |                      |                                           |                     | Алюминия                 | Стали |                                             |                               |
| 35/6,2                                                | 6                         | 2,8                  | 0,777                                     | 8,4                 | 36,9                     | 6,15  | 6                                           | 148                           |
| 50/8                                                  |                           | 3,2                  | 0,595                                     | 9,6                 | 48,2                     | 8,04  |                                             | 195                           |
| 70/11                                                 |                           | 3,8                  | 0,422                                     | 11,4                | 68                       | 11,3  |                                             | 276                           |
| 95/16                                                 |                           | 4,5                  | 0,301                                     | 13,5                | 95,4                     | 15,9  |                                             | 385                           |
| 120/19*                                               | 26                        | 2,4                  | 0,244                                     | 15,2                | 118                      | 18,8  | 6,25                                        | 471                           |
| 150/24*                                               | 26                        | 2,7                  | 0,204                                     | 17,1                | 148                      | 24,2  | 6,14                                        | 599                           |
| 185/29*                                               | 26                        | 2,98                 | 0,159                                     | 18,8                | 181                      | 29    | 6,24                                        | 728                           |
| 185/43                                                | 30                        | 2,8                  | 0,156                                     | 19,6                | 185                      | 43,1  | 4,29                                        | 846                           |
| 240/32                                                | 24                        | 3,6                  | 0,118                                     | 21,6                | 244                      | 31,7  | 7,71                                        | 921                           |
| 240/39*                                               | 26                        | 3,4                  | 0,122                                     | 21,6                | 236                      | 38,6  | 6,11                                        | 952                           |
| 240/56                                                | 30                        | 3,2                  | 0,120                                     | 22,4                | 241                      | 56,3  | 4,29                                        | 1106                          |
| 300/39                                                | 24                        | 4                    | 0,096                                     | 24,0                | 301                      | 38,6  | 7,31                                        | 1132                          |
| 300/48*                                               | 26                        | 3,8                  | 0,098                                     | 24,1                | 295                      | 47,8  | 6,16                                        | 1186                          |
| 300/66                                                | 30                        | 3,5                  | 0,100                                     | 25,5                | 288,5                    | 65,8  | 4,39                                        | 1313                          |
| 300/67                                                | 30                        | 3,5                  | 0,100                                     | 24,5                | 288,5                    | 67,3  | 4,29                                        | 1323                          |
| 300/30                                                | 48                        | 2,98                 | 0,086                                     | 24,8                | 335                      | 29,1  | 11,55                                       | 1152                          |
| 330/43                                                | 54                        | 2,8                  | 0,087                                     | 25,2                | 332                      | 43,1  | 7,71                                        | 1255                          |
| 400/18                                                | 42                        | 3,4                  | 0,076                                     | 26,0                | 381                      | 18,8  | 20,27                                       | 1199                          |
| 400/51                                                | 54                        | 3,05                 | 0,073                                     | 27,5                | 394                      | 51,1  | 7,71                                        | 1490                          |

**Инструкция по технике  
безопасности при  
выполнении работ в  
лабораториях кафедры  
«Автоматизированных  
электроэнергетических  
систем и  
электроснабжения»**

**Перед началом лабораторной работы**

1. Изучить инструкцию по охране труда при работе студентов в электротехнических лабораториях.
2. Пройти инструктаж на рабочем месте. Ознакомиться с безопасными методами выполнения лабораторной работы.
3. Изучить теоретические положения требований методики проведения лабораторной работы.
4. Получить допуск у преподавателя на выполнение лабораторной работы.
5. Ознакомиться с приборами тушения пожара и правилами обращения с огнетушителями ОУ-03, ОП-05, ОВЭ-6(з)-АВЕ-01.
6. Внимательно осмотреть лабораторный стенд, наличие и соответствие предохранителей, приборов и крепление деталей и узлов.

**Требования безопасности во время работы**

1. Получить у преподавателя разрешение на включение лабораторного стенда. Внимательно следить за показателями приборов.

2. Поддерживать порядок на рабочем месте. Внимательно и последовательно выполнять пункты методического пособия.

3. При возникновении неисправности немедленно доложить лаборанту и преподавателю.

### **Требования безопасности в аварийных ситуациях**

1. В ситуации, угрожающей аварией (скачке тока в цепи; появлении дыма или запаха горящей изоляции или др.) обучающийся должен:

1.1. Немедленно прекратить выполнение работы.

1.2. Обесточить прибор, установку (лабораторный стенд), выключив тумблер СЕТЬ.

2. В нестандартной ситуации - выключить автоматический выключатель (или рубильник) на распределительном щите лаборатории.

### **Требования безопасности по окончании выполнения лабораторной работы.**

1. Записать результаты измерений в отчет по лабораторной работе.

2. Получить разрешение на выключение лабораторного стенда.

3. Привести в порядок рабочее место и лабораторный стенд.

4. Убрать электроизмерительные приборы в отведенное место.

5. Сдать лабораторный стенд лаборанту.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **Методические указания**

по организации самостоятельной работы обучающихся  
по дисциплине «Сооружение линий электропередачи»  
для студентов направления подготовки /специальности  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Направленность (профиль) Электроэнергетические системы и сети

Ставрополь 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....                                                                | 180        |
| 1. СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....                                           | 181        |
| 2. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....                                           | 182        |
| 2.1. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЛЕКЦИИ .....                  | 182        |
| 2.2 МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ .....    | 183        |
| <b>2.3. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....</b> | <b>183</b> |
| 3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....    | 184        |

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Дисциплина «Сооружение ЛЭП» является основной, призванной формировать профессиональную подготовку бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Самостоятельная работа, наряду с аудиторными занятиями, составляет основу успешного освоения учебного курса, приобретения профессионализма и повышения компетентности.

Необходимо знать и помнить основные математические соотношения, характеризующие работу электроэнергетических систем, знать главные расчётные формулы, иметь представление о смежных технических дисциплинах.

## 1. СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Общий объем самостоятельной работы составляет 54 акад. час.

Самостоятельная работа распределена следующим образом:

| Вид деятельности студентов     | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки            | Объем часов |
|--------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|
| Подготовка к лекции            | Конспект лекций                         | Собеседование                           |             |
| Подготовка лабораторной работе | Письменный отчет                        | Собеседование                           |             |
| Выполнение контрольной работы  | Контрольная работа                      | Комплект заданий для контрольной работы |             |
| ИТОГО                          |                                         |                                         | 54          |

## 2. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### 2.1. Методика самостоятельной работы по подготовке к лекции

При подготовке к лекции в первую очередь необходимо прочитать конспект лекции.

Конспект лекции следует рассматривать как источник информации по конкретной дисциплине или группе дисциплин. Любой источник информации содержит лишь некоторый набор сведений, далеко не исчерпывающий существующие точки зрения, статистические данные, аналитические выкладки, касающиеся прямо или косвенно данной тематики. В силу этого обстоятельства конспекты лекций рекомендуется расширять и обогащать, активно используя дополнительную литературу.

Даже самого лучшего конспекта недостаточно, чтобы безупречно подготовиться к тесту, семинару, зачету, экзамену. Конспект лекций – один (но далеко не единственный) из основных источников информации по конкретному курсу, помимо рекомендованных учебников, учебных и учебно-методических пособий, научных работ, аналитических и статистических сборников и прочего. При этом преподаватель в процессе оценки знаний студента обычно ориентируется именно на прочитанные им лекции, поэтому конспекты следует использовать при подготовке к ответу в обязательном порядке.

Во-первых, тему целесообразно учить в соответствии с планом, отмеченным в конспекте. В учебниках различных авторов в соответствии с их подходом к преподаванию дисциплины темы могут излагаться в различном порядке.

Во-вторых, рекомендованная преподавателем литература по соответствующей теме, отмеченная в конспекте, будет нужна для более широкого обзора темы и охвата всех вопросов, предложенных преподавателем. При этом самостоятельно, без консультации преподавателя, дополнительную литературу подобрать достаточно сложно.

В-третьих, в конспекте содержится уже проработанная информация, не требующая детального подхода к изучению. Стил ь изложения материала в различных литературных источниках далеко не всегда бывает доступным.

В-четвертых, содержание конспекта – минимум, который студент обязан знать в обязательном порядке в соответствии с учебным планом. При этом в авторских учебниках и пособиях отдельным разделам может уделяться большее внимание, чем остальным, а ваш лектор может иметь на этот счет собственное мнение.

В-пятых, конспект окажет вам большую услугу, если рассматривать его как маленькую энциклопедию важнейших вопросов, которые могут быть вам заданы преподавателем. Большинство вопросов при итоговой оценке знаний будет задано с учетом того, что в лекциях предлагались ответы на них.

## **2.2 Методика самостоятельной работы при подготовке к лабораторным работам**

В структуре самостоятельной работы предусмотрено выполнение и оформление лабораторных работ. Лабораторные работы выполняются на компьютере с помощью программ, моделирующих различные аспекты функционирования дальних электропередач. Лабораторные работы могут выполняться в компьютерном классе. Оформление результатов, полученных в ходе выполнения лабораторных работ, выполняется студентом самостоятельно в соответствии с требованиями, изложенными в «Методических указаниях по выполнению лабораторных работ» по дисциплине.

## **2.3. Методика самостоятельной работы при выполнении контрольной работы**

В структуре самостоятельной работы предусмотрено выполнение и оформление контрольной работы по дисциплине. Контрольная работа выполняется по индивидуальному заданию, выдаваемому каждому студенту.

Методические вопросы выполнения разделов контрольной работы рассматриваются на практических занятиях по дисциплине.

При выполнении контрольной работы следует пользоваться методическими указаниями.

## 2.

### 3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Для успешного освоения дисциплины, необходимо выполнить следующие виды самостоятельной работы, используя рекомендуемые источники информации