

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела

РАСЧЕТ ПРОВОДОВ ВЛЭП НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению курсовых и дипломных проектов, самостоятельной работы,
практических занятий и курсовых работ для студентов направлений
подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
08.03.01 «Строительство», 13.04.01 «Теплоэнергетика
и теплотехника», 08.04.01 «Строительство»
всех форм обучения*

Воронеж 2021

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7

*Составители: В. Н. Мелькумов, С. В. Чуйкин, С. Г. Тульская,
А. И. Колосов, Д. М. Чудинов, Е. В. Плаксина*

Расчет проводов ВЛЭП на механическую прочность: методические указания к выполнению курсовых и дипломных проектов, самостоятельной работы, практических занятий и курсовых работ для студентов направлений подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.03.01 «Строительство», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.04.01 «Строительство» всех форм обучения. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: В. Н. Мелькумов, С. В. Чуйкин, С. Г. Тульская, А. И. Колосов, Д. М. Чудинов, Е. В. Плаксина. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 19 с.

Изложены общие теоретические сведения и приведены методические рекомендации по выполнению курсовых и дипломных проектов, самостоятельной работы, практических занятий и курсовых работ.

Предназначены для студентов бакалавриата направлений 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.03.01 «Строительство» и магистрантов направлений 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.04.01 «Строительство» всех форм обучения.

Ил. 3. Табл. 9. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 621.3(07)
ББК 31.2я7**

Рецензент – О. А. Сотникова, д-р техн. наук, профессор кафедры проектирования зданий и сооружений им. Н. В. Троицкого ВГТУ

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

Программой курсов дисциплин «Электроэнергетика», «Передача и распределение электроэнергии», «Электрические материалы», «мониторинг строительства энергетических сетей», а также других профильных дисциплин по направлениям подготовки бакалавров 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.03.01 «Строительство» и магистрантов 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 08.04.01 «Строительство» всех форм обучения предусмотрено выполнение курсовых проектов, практических занятий и курсовых работ по разделу проектирование воздушных линий электропередачи.

Настоящие методические указания рекомендуются для освоения методов расчета проводов ВЛЭП на механическую прочность.

В нем изложены общие теоретические сведения и приведены методические рекомендации по выполнению курсовых и дипломных проектов, самостоятельной работы, практических занятий и курсовых работ. В пособии приводятся варианты для расчета проводов ВЛЭП на механическую прочность при различных климатических и эксплуатационных условиях.

1. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Линейный изолятор (изолятор) – устройство, служащее для изоляции и крепления проводов воздушных линий электропередачи к опорам.

Гирлянда изоляторов – устройство, состоящее из нескольких подвесных изоляторов и линейной арматуры, подвижно соединенных между собой.

Перекрытие изоляции – разряд по границе раздела двух сред, чаще всего это граница твердый диэлектрик – газ.

Гололед – осадок прозрачного, полупрозрачного или беловатого прозрачного льда с высокой плотностью.

Зернистая изморозь (плотная изморозь) – осадок белого цвета, напоминающая снег.

Кристаллическая изморозь – слой кристаллического льда белого цвета ажурного строения, напоминающего иней.

Вибрация проводов – вызываемые ветром периодические колебания натянутого в пролете провода, происходящие в вертикальной плоскости.

Пляска проводов – колебания со значительной амплитудой и низкой частотой.

Пролет воздушной линии – участок воздушной линии между двумя опорами или конструкциями, заменяющими опорами.

Длина пролета – горизонтальная проекция пролета воздушной линии.

Габаритный пролет – пролет, длина которого определяется нормированным вертикальным расстоянием от провода до земли при установке опор на идеально ровной поверхности.

Ветровой пролет – длина участка воздушной линии, давление ветра на провода и тросы с которого воспринимается опорой.

Весовой пролет – длина участка воздушной линии, вес проводов и тросов которого воспринимается опорой.

Стрела провеса – расстояние по вертикали от прямой, соединяющей точки крепления провода, до провода.

Населенная местность – территории городов, курортные и пригородные зоны, территории поселков городского типа и сельских населенных пунктов.

Труднодоступная местность – местность, недоступная для транспорта.

Ненаселенная местность – земли, не относящиеся к населенной и труднодоступной местности.

Большие переходы ЛЭП – пересечения судоходных рек, каналов, озер, водохранилищ, оврагов и других препятствий с пролетом более 700 м.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Воздушными линиями электропередачи называются сооружения, предназначенные для передачи электроэнергии по проводам, которые крепятся специальными изоляционными элементами к опорам [1]. Основными элементами данных сооружений являются: провода, по которым передается электрическая энергия, изоляционные устройства, опоры и их основания. Воздушные линии электропередачи классифицируют:

а) по напряжению на линии: низкого напряжения (до 1 кВ); высокого напряжения (от 1 кВ до 330 кВ); сверхвысокого напряжения (от 330 кВ до 750 кВ); ультравысокого напряжения (выше 750 кВ).

б) по назначению на линии: сверхдальние - служащие для связи отдельных энергосистем (500 кВ и выше); магистральные – служащие для передачи электроэнергии от электростанций и их связи в рамках единой энергосистемы (220 кВ и 330 кВ); распределительные – служащие для соединения распределительных пунктов с крупными общественными и промышленными потребителями (35 кВ и 110 кВ); подводящие – служащие для подвода электроэнергии потребителю (20 кВ и ниже).

Линии низкого напряжения представляют собой простейшие сооружения в виде одиночных стоек (рис. 2.1а), с закрепленными на них изолирующими устройствами и проводами. Линии более высокого напряжения обладают сложной конструкцией, обусловленной необходимостью применения более тяжелых проводов и арматуры (рис. 2.1 б, в). В большинстве случаев изолирующие устройства на таких линиях крепятся к специальным траверсам, а изолятор изготавливается из нескольких элементов [1].

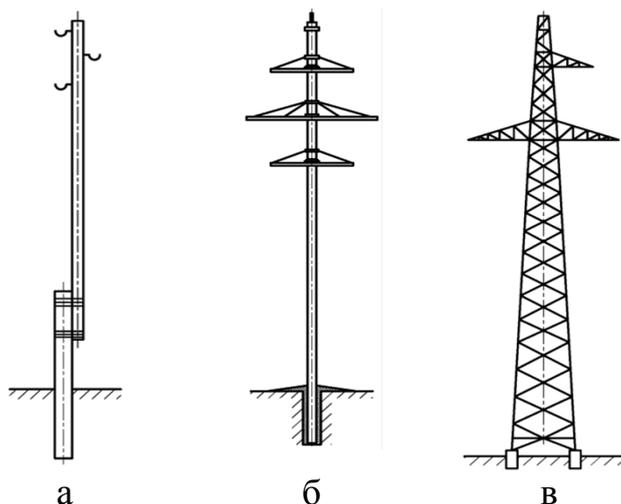


Рис. 2.1. Опоры воздушных линий электропередачи

На воздушных линиях электропередачи подвешиваются однопроволочные и многопроволочные провода. Первые, как правило, изготавливаются диаметром 4-5 мм из стали и применяются на линиях напряжением до 1 кВ [2]. Ограничения диаметра связано с тем, что однопроволочные провода имеют незначительную механическую прочность, при малых диаметрах, и обладают значительной остаточной деформацией, при больших диаметрах.

Многопроволочные провода скручиваются из нескольких проволок и обладают значительной гибкостью [2]. Такие провода могут быть выполнены практически любого необходимого сечения путем подбора числа и диаметра проволок (рис. 2.2). Зачастую многопроволочные провода изготавливают из круглых проволок, причем в центре размещают несколько проволок одинакового сечения.

Наибольшее распространение получили провода с одной центральной проволокой, на которую навиваются один или несколько слоев проволок (повивов) в зависимости от требуемого сечения провода. После скрутки каждая проволока, кроме центральной, располагается по винтовой линии [2].

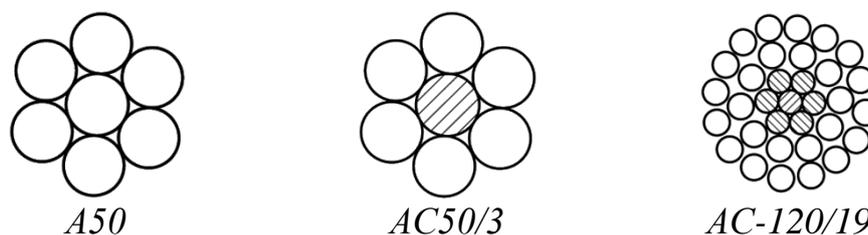


Рис. 2.2. Многопроволочные провода с различным числом центральных проволок

При выборе материала, из которого будут изготавливаться провода воздушных линий необходимо учитывать несколько факторов. При плохой электропроводности материала провода может возникать дополнительное увеличение потерь мощности и напряжения воздушной линии, что ухудшает экономичность электропередачи, в связи с этим материал, из которого изготавли-

вается провод, должен обладать с высокой электропроводностью. Кроме того, свои ограничения на выбор материала проводов также налагает и механическая прочность провода, так низкое ее значение приводит к большому провису провода, а, следовательно, к малым длинам пролетов. Также, материал провода должен обладать высокой сопротивляемостью атмосферным воздействиям (таким как дождь, снег, гололед, изморозь, высокое содержание солей и т.д.) [1-3].

Наибольшее распространение в настоящее время получили алюминиевые и сталеалюминиевые провода. Первые изготавливаются исключительно из алюминиевых проволок, у вторых, центральная проволока и прилегающие к ней повивы изготавливаются из стали, остальные из алюминия, данная конструкция придает проводу дополнительную прочность [3].

Для обозначения марок проводов приняты буквенные и цифровые обозначения. Буквы обозначают материал провода (АС – сталеалюминиевые, А – алюминиевые) добавление к данным обозначениям букв КП показывает, что межпроводочное пространство заполняется смазкой, которая защищает провод от коррозии. Кроме упомянутых обозначений существуют так же отмененные аббревиатуры АСУ и АСО, обозначающие соответственно сталеалюминиевые провода усиленной и облегченной конструкций. Цифрами обозначают сечения металлических частей провода. Так отношение сечений алюминиевой и стальной частей обозначается дробью, числитель при этом показывает сечение алюминиевой части, а знаменатель стальной (АС 120/19 – сталеалюминиевый провод с сечением алюминиевой часть 118 мм^2 и стальным сердечником $18,8 \text{ мм}^2$) [1-3].

Провода на опорах, как правило, располагаются в один, два или три яруса (рис 2.3). В первом случае расположение проводов называют горизонтальным, во втором и третьем случаях, если провода расположены без смещения по горизонтали, вертикальным, если же имеется горизонтальное смещение то смешанным [2, 3].

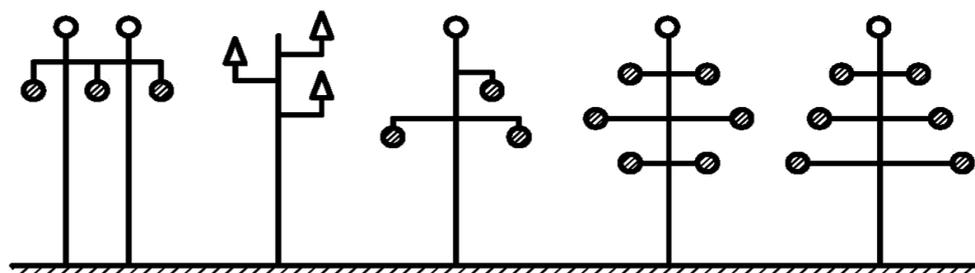


Рис. 2.3. Схемы расположения проводов воздушных линий электропередачи:

Расстояние между проводами и их расположение на опоре определяется в зависимости от двух условий [1-3]: обеспечение минимального расстояния от проводов до опоры, требуемого по координации изоляции для предотвращения перекрытий на конструкцию опоры; обеспечение минимального расстояния между проводами, необходимого для исключения возможности опасного сближения и схлестывания проводов.

3. РАСЧЕТ ПРОВОДА НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

3.1. Определение толщины стенки гололеда на проводе и величины ветрового давления

а) средняя высота подвеса проводов на опоре.

$$h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{m} - \lambda, \quad (3.1)$$

где h_i – расстояние от земли до i -ой траверсы опоры, м; m – количество проводов на опоре; λ – длина гирлянды изоляторов, м (для предварительного расчета длина гирлянды изолятора может быть принята: для воздушных линий напряжением 35 кВ – 0,6 м; напряжением 110 кВ – 1,3 м; напряжением 150 кВ – 1,6 м; напряжением 220 кВ – 2,4 м).

Например, для опоры ПБ110 средняя высота подвеса провода примет вид:

$$h_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + (h_2 + h_3)}{m} - \lambda, \quad (3.2)$$

где h_1 , h_2 и h_3 – соответственно расстояния до первого, второго и третьего проводов, м.

б) допустимая стрела провеса провода определяется по формуле:

$$[f] = h_2 - \lambda - \Gamma, \quad (3.3)$$

где h_2 – расстояние от земли до нижней траверсы, м; λ – длина гирлянды изоляторов, м; Γ – наименьшее расстояние по вертикали от проводов до поверхности земли, м (определяется по табл. 3.1 и таблицам в работе [3]).

в) высота приведённого центра тяжести провода.

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3}[f], \quad (3.4)$$

где h_{cp} – средняя высота подвеса проводов или тросов на опоре; $[f]$ – допустимая стрела провеса провода или троса.

Таблица 3.1

Расстояние по вертикали от проводов до поверхности земли

| Характер местности | Расстояние по вертикали от проводов до поверхности земли, м | | | | | |
|--------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | до 35 кВ | 110 кВ | 220 кВ | 330 кВ | 500 кВ | 750 кВ |
| Ненаселенная | 6 | 6 | 7 | 7,5 | 8 | 12 |
| Населенная | 7 | 7 | 8 | 11 | 15,5 | 23 |
| Труднодоступная | 5 | 5 | 6 | 6,5 | 7 | 10 |

г) толщина стенки гололеда на проводе.

$$C_{max} = k_{\Gamma 1} \cdot k_{\Gamma 2} \cdot C_0, \quad (3.5)$$

где C_0 – табличное значение толщины стенки гололеда, (табл. 3.2); $k_{\Gamma 1}$ – коэффициент, зависящий от высоты приведённого центра тяжести провода, (табл. 3.3); $k_{\Gamma 2}$ – коэффициент, зависящий от диаметра провода или троса, (табл. 3.4).

Таблица 3.2

Значение нормативной толщины стенки гололеда в зависимости от района по гололеду

| Район по гололеду | Нормативная толщина гололеда C_0 , мм |
|-------------------|---|
| 1 | 10 |
| 2 | 15 |
| 3 | 20 |
| 4 | 25 |
| 5 | 30 |
| 6 | 35 |
| 7 | 40 |
| особый | выше 40 |

Таблица 3.3

Значение коэффициента $k_{\Gamma 1}$ от высоты приведённого центра тяжести провода

| Высота h_{np} , м | До 25 | 30 | 50 | 70 | 100 |
|----------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|
| Коэффициент $k_{\Gamma 1}$ | 1,0 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |

Таблица 3.4

Значение коэффициента $k_{\Gamma 2}$ от диаметр провода или троса

| Диаметр провода (или троса) d , мм | 10 | 20 | 30 | 50 | 70 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Коэффициент $k_{\Gamma 2}$ | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |

При значении приведённого центра тяжести провода $h_{np} \leq 25$ м значения C_{max} принимаются непосредственно из табл. 3.1. При $h_{np} > 25$ м вводятся поправочные коэффициенты на высоту $k_{\Gamma 1}$ (из табл. 3.3) и диаметр провода или троса $k_{\Gamma 2}$ (из табл. 3.4).

д) ветровое давление на провод.

$$W_{max} = W_0 \cdot K_w, \quad (3.6)$$

где W_0 – нормальное значение давления в зависимости от района по ветру, (таблица 3.5); K_w – коэффициент, зависящий от типа местности, (табл. 3.6).

Таблица 3.5

Нормальное значение ветрового давления в зависимости от района по ветру

| Район по ветру | Нормативное значение W_0 , Па |
|----------------|---------------------------------|
| 1 | 400 |
| 2 | 500 |
| 3 | 650 |
| 4 | 800 |
| 5 | 1000 |
| 6 | 1250 |
| 7 | 1500 |
| особый | Выше 1500 |

Таблица 3.6

Значение коэффициента K_w в зависимости от типа местности

| Высота расположения приведенного центра тяжести проводов и тросов над поверхностью земли, м | Коэффициент K_w для типов местности | | |
|---|---------------------------------------|------|------|
| | А | В | С |
| до 15 | 1,00 | 0,65 | 0,40 |
| 20 | 1,25 | 0,85 | 0,55 |
| 40 | 1,50 | 1,1 | 0,80 |
| 60 | 1,70 | 1,3 | 1,00 |
| 80 | 1,85 | 1,45 | 1,15 |
| 100 | 2,00 | 1,6 | 1,25 |

Различают три типа местности в зависимости от условий ветрового воздействия [3]: А – побережье озер, водохранилищ, морей, степи, пустыни и т.д.; В – территории городов, лесные массивы и другая местность, равномерно покрытая препятствиями высотой не менее 2/3 высоты опор; С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м.

3.2. Определение удельных нагрузок на провод

В работе [2] указывается, что нагрузки на провода при различных условиях определяются в следующей последовательности.

1. Единичная нагрузка от собственного веса провода - обозначается буквой p_1 . Для ее расчета необходимо разделить на тысячу массу или вес провода указываемы в справочной литературе.

2. Единичная нагрузка от гололеда - обозначается буквой p_2 .

В работе [3] приведенные выше уравнения дополняются поправочными коэффициентами учитывающими надежность по гололедной нагрузке, регион строительства, условие работы линии, надежность по ветровой нагрузке и т.д., в результате применяемые для расчета удельных нагрузок зависимости принимают вид:

А. Удельная нагрузка от собственного веса провода определяется по формуле:

$$\gamma_1 = \frac{G_n}{F}, \quad (3.7)$$

где G_n – вес одного метра провода или троса, Н; F – фактическое сечение провода или троса, мм².

Б. Удельная нагрузка от веса гололеда определяется по формуле:

$$\gamma_2 = \frac{q_0 \cdot \pi \cdot C_{max} \cdot (d + C_{max}) \cdot K_n \cdot K_p \cdot K_f \cdot K_d}{F}, \quad (3.8)$$

где q_0 – плотность гололедных отложений, равная $9 \cdot 10^{-3}$; C_{max} – толщина стенки гололеда; d – диаметр провода или троса; F – фактическое сечение провода или троса; K_n – коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным 1 для воздушных линий до 220 кВ, 1,3 для воздушных линий от 330 до 750 кВ; K_p – региональный коэффициент, принимаемый равным от 1 до 1,5 на основании опыта эксплуатации (для расчета принять равным 1); K_f – коэффициент надежности по гололедной нагрузке равный 1,3 для районов по гололеду I и II, 1,6 для районов по гололеду III и выше; K_d – коэффициент условий работы принимается равным 0,5.

В. Удельная нагрузка от собственного веса провода и веса гололеда.

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2, \quad (3.9)$$

Г. Удельная нагрузка от давления ветра при отсутствии гололеда определяется по формуле:

$$\gamma_4 = \frac{W_{max} \cdot k_l \cdot k_H \cdot C_x \cdot d \cdot K_n \cdot K_p \cdot K_f \cdot 10^{-3}}{F}, \quad (3.10)$$

где k_l – коэффициент, учитывающий влияние длины пролёта на ветровую нагрузку, (табл. 3.7); k_H – коэффициент, учитывающий неравномерность скоростного напора ветра по пролету (таблица 3.8); C_x – коэффициент лобового сопротивления, равный 1,1 для проводов диаметром 20 мм и более, свободных от гололеда, 1,2 для всех проводов, покрытых гололедом, и для проводов, диаметром менее 20мм, свободных от гололеда; K_f – коэффициент надежности по ветровой нагрузке, равный 1,1.

Таблица 3.7

Значение коэффициента k_l в зависимости от длины пролета

| | | | | |
|-------------------|-------|-----|------|-------------|
| Длина пролета, м | до 50 | 100 | 150 | 250 и более |
| Коэффициент k_l | 1,2 | 1,1 | 1,05 | 1,0 |

Таблица 3.8

Значение коэффициента k_H в зависимости от ветрового давления

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|------|-----|------|------|------------|
| Ветровое давление, Па | до 200 | 240 | 280 | 300 | 320 | 360 | 400 | 500 | 680 и выше |
| Коэффициент k_H | 1,0 | 0,94 | 0,88 | 0,85 | 0,83 | 0,8 | 0,76 | 0,71 | 0,7 |

Д. Удельная нагрузка от давления ветра на провод при наличии гололеда.

$$\gamma_5 = \frac{W' \cdot k_l \cdot k_H \cdot C_x \cdot (d + 2 \cdot C_{max}) \cdot K_n \cdot K_p \cdot K_f \cdot 10^{-3}}{F}, \quad (3.11)$$

$$W' = 0,25 \cdot W_{max}. \quad (3.12)$$

Для воздушных линий до 220 кВ ветровое давление при гололеде должно приниматься не менее 200Па, а для воздушных линий, напряжением 330-750 кВ, не менее 160Па. В этой формуле коэффициент k_H определяется по таблице в зависимости от W' .

Е. Удельная нагрузка от давления ветра и веса провода без гололёда определяется по формуле:

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2}, \quad (3.13)$$

Ж. Удельная нагрузка на провод от давления ветра и веса провода, покрытого гололедом, определяется по формуле:

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}, \quad (3.14)$$

3.3. Определение критических пролетов

А. Первый критический пролет определяется по формуле:

$$l_{\kappa 1} = \frac{2 \cdot [\sigma_{t\text{cp}}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \left[\frac{1}{E} \cdot ([\sigma_{t\text{cp}}] - [\sigma_{t\text{min}}]) + \alpha(t_{\text{cp}} - t_{\text{min}}) \right]}{1 - \left(\frac{[\sigma_{t\text{cp}}]}{[\sigma_{t\text{min}}]} \right)^2}}, \quad (3.15)$$

б) Второй критический пролет определяется по формуле:

$$l_{\kappa 2} = \frac{2 \cdot [\sigma_{\gamma\text{max}}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha \cdot (t_{\text{зол}} - t_{\text{min}})}{\left(\frac{\gamma_{\text{max}}}{\gamma_1} \right)^2 - 1}}, \quad (3.16)$$

в) Третий критический пролет определяется по формуле:

$$l_{\kappa 3} = \frac{2 \cdot [\sigma_{\gamma\text{max}}]}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \left[\frac{1}{E} \cdot ([\sigma_{\gamma\text{max}}] - [\sigma_{t\text{cp}}]) + \alpha(t_{\text{зол}} - t_{\text{cp}}) \right]}{\left(\frac{\gamma_{\text{max}}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{[\sigma_{\gamma\text{max}}]}{[\sigma_{t\text{cp}}]} \right)^2}}, \quad (3.17)$$

3.4. Определение напряжений в материале провода

Таблица 3.9

Условия выбора исходного режима

| Соотношение $l_{\kappa 1}, l_{\kappa 2}, l_{\kappa 3}$ | Соотношение l и l_{κ} | Параметры исходного режима |
|--|-----------------------------------|--|
| $l_{\kappa 1} < l_{\kappa 2} < l_{\kappa 3}$ | $l < l_{\kappa 1}$ | $[\sigma_{t\text{min}}], \gamma_1, t_{\text{min}}$ |
| | $l_{\kappa 1} < l < l_{\kappa 3}$ | $[\sigma_{t\text{cp}}], \gamma_1, t_{\text{cp}}$ |
| | $l > l_{\kappa 3}$ | $[\sigma_{\gamma\text{max}}], \gamma_{\text{max}}, t_{\text{зол}}$ |
| $l_{\kappa 1} > l_{\kappa 2} > l_{\kappa 3}$ | $l < l_{\kappa 2}$ | $[\sigma_{t\text{min}}], \gamma_1, t_{\text{min}}$ |
| | $l > l_{\kappa 2}$ | $[\sigma_{\gamma\text{max}}], \gamma_{\text{max}}, t_{\text{зол}}$ |
| $l_{\kappa 1} - \text{МНИМЫЙ}$ | $l < l_{\kappa 3}$ | $[\sigma_{t\text{cp}}], \gamma_1, t_{\text{cp}}$ |
| | $l > l_{\kappa 3}$ | $[\sigma_{\gamma\text{max}}], \gamma_{\text{max}}, t_{\text{зол}}$ |

| | | |
|--|--------------|---|
| $l_{к1}$ – МНИМЫЙ $l_{к3} < l_{к2}$ | $l > l_{к2}$ | $[\sigma_{\gamma \max}], \gamma_{\max}, t_{\text{гол}}$ |
| | $l < l_{к2}$ | $[\sigma_{t \min}], \gamma_1, t_{\min}$ |
| $l_{к3}$ – МНИМЫЙ $l_{к2} < l_{к1}$ | $l > l_{к2}$ | $[\sigma_{\gamma \max}], \gamma_{\max}, t_{\text{гол}}$ |
| | $l < l_{к2}$ | $[\sigma_{t \min}], \gamma_1, t_{\min}$ |
| $l_{к3}$ – МНИМЫЙ | $l < l_{к1}$ | $[\sigma_{t \min}], \gamma_1, t_{\min}$ |
| | $l > l_{к1}$ | $[\sigma_{t \text{cp}}], \gamma_1, t_{\text{cp}}$ |
| $l_{к1}$ и $l_{к3}$ – МНИМЫЕ | - | $[\sigma_{t \text{cp}}], \gamma_1, t_{\text{cp}}$ |

Расчет проводов и тросов воздушной линии на механическую прочность включает в себя определение напряжений при различных условиях работы. При изменении климатических условий меняются удельные нагрузки, температура провода и напряжение в его материале. Для определения напряжений в материале провода при различных климатических условиях используют уравнение состояния провода, которое имеет следующий вид:

$$\sigma_p - \frac{\gamma_p^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_p^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_p - t_u), \quad (3.18)$$

где σ_u, γ_u, t_u – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в исходном режиме; σ_p, γ_p, t_p – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в рассчитываемом режиме; E и α – модуль упругости и температурный коэффициент линейного удлинения материала провода; l_p – расчетная длина пролета.

Нормативными документами устанавливается следующее сочетание климатических условий или режимов, при которых производится расчет проводов и тросов на механическую прочность:

а) режим высшей температуры - в данном режиме ветер и гололед отсутствуют, учитывается удельная нагрузка от собственного вес провода или троса (γ_1) и максимальная температура (t_{\max});

б) режим гололеда без ветра - в данном режиме ветер отсутствует, провода или тросы покрыты гололедом, учитывается удельная нагрузка от собственного веса провода и веса гололеда (γ_3), а температура окружающего воздуха считается равной -5°C ;

в) режим низшей температуры - в данном режиме ветер и гололед отсутствуют, учитывается удельная нагрузка от собственного вес провода или троса (γ_1) и минимальная температура (t_{\min});

г) режим среднегодовой температуры - в данном режиме ветер и гололед отсутствуют, учитывается удельная нагрузка от собственного вес провода или троса (γ_1) и среднегодовая температура (t_{cp});

д) ветровой режим - в данном режиме учитывается максимальное ветровое давление (удельная нагрузка γ_6) при отсутствии гололеда, а температура окружающего воздуха считается равной -5°C ;

е) режим гололеда с ветром - в данном режиме учитывается удельная нагрузка от давления ветра и веса провода, покрытого гололедом (γ_7), температура окружающего воздуха считается равной -5°C ;

ж) грозовой режим - в данном режиме учитывается удельная нагрузка от собственного вес провода или троса (γ_1), а температура окружающего воздуха считается равной 15°C ;

В районах со среднегодовой температурой -5°C и ниже, температуры для режимов б, д и е следует принимать равной -10°C .

Уравнение состояния связывает указанные выше параметры двух различных режимов. С помощью этого уравнение можно по заданным исходным условиям определить напряжение в материале провода при новых изменившихся условиях. Относительно неизвестной величины σ_p уравнение состояния является неполным кубическим уравнением вида:

$$\sigma_p^3 \pm B \cdot \sigma_p^2 - D = 0, \quad (3.19)$$

где B и D – числовые коэффициенты, полученные в результате подстановки в уравнение состояния всех известных параметров.

Наиболее простым методом решения данного уравнения является метод подбора. Для уменьшения времени расчета необходимо представлять себе приближенное значение искомого напряжения σ_p по отношению к исходному σ_u . Например, если в исходном режиме задано напряжение при гололеде $\sigma_{гол}$, а требуется найти напряжение при максимально температуре, т.е. $\sigma_{t_{max}}$, то искомого напряжения должно быть меньше исходного в 2-2,5 раза.

Примером использования численного метода для решения кубического уравнения может служить метод касательных, который является итерационным. Алгоритм заключается в следующем;

1. Задаются нулевым приближение σ_0 . При выборе нулевого приближения следует руководствоваться соображениями, характерными для метода подбора. В качестве нулевого приближения можно использовать значения известных приближений ($\sigma_{\gamma_{max}}$, $\sigma_{t_{min}}$, $\sigma_{t_{cp}}$).

2. Определяют поправку Δ путем деления самой функции на её первую производную:

$$\Delta_i = \frac{\sigma_{i-1}^3 \pm B \cdot \sigma_{i-1}^2 - D}{3 \cdot \sigma_{i-1}^2 \pm 2 \cdot B \cdot \sigma_{i-1}}, \quad (3.20)$$

где i – номер итерации. На первом приближении (итерации) $\sigma_i = \sigma_0$.

3. Находят новое значение напряжения σ_i по формуле:

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} - \Delta_i. \quad (3.21)$$

4. Выполняют проверку окончания процесса итерации по условию:

$$|\Delta| \leq \varepsilon, \quad (3.22)$$

где ε – заранее заданная точность расчета (от 0,01 до 0,03).

Если условие выполняется, то расчет прекращается, значение σ_i принимается за исходное. Если условие не выполняется, то значение σ_i принимается в качестве нового приближения и расчет повторяется.

3.5. Определение стрелы провеса провода в различных режимах

Определение стрелы провеса провода в режимах гололеда без ветра высшей температуры t_{\max} и грозового режима определяется по формуле:

$$f_i = \frac{\gamma_i \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_i}, \quad (3.23)$$

где γ_i и σ_i – удельная нагрузка и напряжение в проводе в соответствующем режиме.

- допустимая стрела провеса при высшей температуре определяется по формуле:

$$f_{t_{\max}} = \frac{\gamma_7 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{t_{\max}}}, \quad (3.24)$$

- допустимая стрела провеса при низшей температуре определяется по формуле:

$$f_{t_{\min}} = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{t_{\min}}}, \quad (3.25)$$

- допустимая стрела провеса при средней температуре определяется по формуле:

$$f_{\text{ср}} = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{\text{ср}}}, \quad (3.26)$$

- допустимая стрела провеса при грозовом режиме определяется по формуле:

$$f_{\text{гроз}} = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{\text{гроз}}}, \quad (3.27)$$

- допустимая стрела провеса при максимальной нагрузке определяется по формуле:

$$f_{\gamma_{\max}} = \frac{\gamma_7 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{\gamma_{\max}}}, \quad (3.28)$$

- допустимая стрела провеса при гололёде без ветра определяется по формуле:

$$f_{\text{сол}} = \frac{\gamma_3 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{\text{сол}}}, \quad (3.29)$$

3.6. Алгоритм расчета проводов на механическую прочность

При выполнении работы по проверке проводов на механическую прочность, расчет необходимо выполнять в следующей последовательности:

1 этап. Определить удельные нагрузки ($\gamma_1 - \gamma_7$) на провода ЛЭП;

2 этап. Определить критические пролеты ($l_{k1} - l_{k3}$), после чего, по соотношению расчетного и критических пролетов определить параметры исходного режима расчетного пролета;

3 этап. С помощью уравнения состояния провода определяют напряжения в проводе для режимов среднегодовой и низшей температур, а также для режима наибольшей нагрузки по формулам (3.30-3.32) соответственно:

$$\sigma_{t_{cp}} - \frac{\gamma_1^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{t_{cp}}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cp} - t_u), \quad (3.30)$$

$$\sigma_{t_{min}} - \frac{\gamma_1^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{t_{min}}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{min} - t_u), \quad (3.31)$$

$$\sigma_{\gamma_{max}} - \frac{\gamma_7^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{\gamma_{max}}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot ((-5) - t_u), \quad (3.32)$$

4 этап. Проверить условия механической прочности проводов:

$$\sigma_{t_{cp}} \leq [\sigma_{t_{cp}}]; \sigma_{t_{min}} \leq [\sigma_{t_{min}}]; \sigma_{\gamma_{max}} \leq [\sigma_{\gamma_{max}}]; \quad (3.33)$$

5 этап. С помощью уравнения состояния провода определить напряжения в проводе для режимов гололеда без ветра, высшей температуры и грозового режима по формулам (3.34-3.36) соответственно:

$$\sigma_{zol} - \frac{\gamma_3^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{zol}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot ((-5) - t_u), \quad (3.34)$$

$$\sigma_{t_{max}} - \frac{\gamma_7^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{t_{max}}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{max} - t_u), \quad (3.35)$$

$$\sigma_{спроз} - \frac{\gamma_1^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_{спроз}^2} = \sigma_u - \frac{\gamma_u^2 \cdot l_p^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_u^2} - \alpha \cdot E \cdot (15 - t_u), \quad (3.36)$$

6 этап. Определить стрелы провеса проводов для режимов гололеда без ветра, высшей температуры и грозового режима.

7 этап. Проверить соблюдение расстояний от нижнего провода до земли по условию:

$$f_{t_{max}} \leq [f]; f_{zol} \leq [f],$$

где $[f]$ – допустимая стрела провеса провода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кесельман, Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кесельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
2. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1979, 312 с.
3. Вихарев, А. П. Проектирование механической части ЛЭП: учебное пособие / А. П. Вихарев, А. В. Вычегжанин, Н Г. Репкина. – Киров: изд. ВятГУ, 2009. – 140 с.
4. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. (ПУЭ-7). – Москва

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Таблица П.1

Характеристика воздушных линий электропередачи

| Первая цифра варианта | Номинальное напряжение, кВ | Материал опоры | Характер местности | Марка провода |
|-----------------------|----------------------------|----------------|--------------------|---------------|
| 1 | 35 | ж/б | ненаселенная | АС-95/16 |
| 2 | 35 | ж/б | населенная | АС-150/24 |
| 3 | 35 | мет. | ненаселенная | АС-150/24 |
| 4 | 110 | ж/б | населенная | АС-120/19 |
| 5 | 110 | мет. | населенная | АС-70/11 |
| 6 | 150 | мет. | ненаселенная | АС-120/19 |
| 7 | 150 | ж/б | населенная | АС-120/19 |
| 8 | 220 | мет. | ненаселенная | АС-300/39 |
| 9 | 220 | мет. | населенная | АС-400/51 |
| 0 | 220 | мет. | ненаселенная | АС-400/51 |

Таблица П.2

Климатические характеристика района строительства

| Вторая цифра варианта | Район по ветру | Район по гололеду | $t_{max}, ^\circ\text{C}$ | $t_{min}, ^\circ\text{C}$ | $t_{cp}, ^\circ\text{C}$ | Тип местности |
|-----------------------|----------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|
| 1 | II | II | 40 | -15 | 5 | С |
| 2 | I | III | 35 | -25 | 10 | В |
| 3 | III | II | 20 | -30 | 10 | В |
| 4 | II | I | 20 | -20 | 0 | А |
| 5 | I | II | 25 | -15 | 5 | С |
| 6 | II | II | 25 | -30 | -5 | А |
| 7 | III | II | 25 | -25 | -5 | А |
| 8 | II | I | 25 | -15 | 0 | С |
| 9 | I | I | 30 | -10 | 5 | С |
| 0 | II | II | 25 | -20 | 5 | В |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| 1. Словарь терминов..... | 3 |
| 2. Общие сведения..... | 4 |
| 3. Расчет провода на механическую прочность..... | 7 |
| 3.1. Определение толщины стенки гололеда на проводе и величины ветрового давления..... | 7 |
| 3.2. Определение удельных нагрузок на провод..... | 10 |
| 3.3. Определение критических пролетов..... | 12 |
| 3.4. Определение напряжений в материале провода..... | 12 |
| 3.5. Определение стрелы провеса провода в различных режимах..... | 15 |
| 3.6. Алгоритм расчета проводов на механическую прочность..... | 16 |
| Библиографический список..... | 17 |
| Приложение..... | 18 |

РАСЧЕТ ПРОВОДОВ ВЛЭП НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению курсовых и дипломных проектов, самостоятельной работы,
практических занятий и курсовых работ для студентов направлений
подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
08.03.01 «Строительство», 13.04.01 «Теплоэнергетика
и теплотехника», 08.04.01 «Строительство»
всех форм обучения*

Составители: Мелькумов Виктор Нарбенович
Чуйкин Сергей Владимирович
Тульская Светлана Геннадьевна
Колосов Александр Иванович
Чудинов Дмитрий Михайлович
Плаксина Елена Владимировна

В авторской редакции

Подписано в печать 01.06.2021.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Уч.-изд. л. 1,2. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 330 экз.

Заказ № 84

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14