

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

Г. И. Селиверстов, С. Г. Жуковец

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛЭП

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2010

УДК 621.315.1(075.8)
ББК 31.279я73
С29

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 22.12.2008 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Л. И. Евминов

Селиверстов, Г. И.

С29

Конструкции и расчет механической части ЛЭП : метод. указания к курсовой работе по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / Г. И. Селиверстов, С. Г. Жуковец. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 36 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-885-5.

Даны краткие теоретические сведения, руководящие указания и формулы для расчета механической части линий электропередачи.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.315.1(075.8)
ББК 31.279я73

ISBN 978-985-420-885-5

© Селиверстов Г. И., Жуковец С. Г., 2010
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2010

1. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

1.1. Цель курсовой работы

Задачей курсовой работы является закрепление теоретических знаний и приобретение навыков по расчету механической части воздушных линий электропередачи. Они могут быть также использованы при выполнении дипломных проектов аналогичного содержания.

В процессе выполнения работы студент приобретает навыки самостоятельной творческой работы при проведении инженерных расчетов и технико-экономического анализа, учится пользоваться справочными материалами, ГОСТами, приобретает навыки изложения, подготавливается к дипломному проектированию.

В учебном проектировании принимается ряд допущений и условностей, позволяющих избежать чрезмерного увеличения объема проекта и сосредоточить внимание на наиболее существенных вопросах.

Для облегчения поиска данных по новейшему оборудованию и методик расчета в указаниях приводятся ссылки на соответствующую литературу.

1.2. Исходные положения

Проектирование конкретной линии электропередачи ведется на основании разработанной схемы развития энергосистемы. В задании на проектирование указываются пункты начала и конца линии, номинальное напряжение, количество цепей, марка провода и материал опор. После проведения предварительных изысканий непосредственно перед рабочим проектированием известны также расчетные климатические условия: толщина стенки гололеда, максимальная скорость ветра, максимальная, минимальная и среднегодовая температуры.

Воздушные линии сооружаются преимущественно на унифицированных опорах. При этом нет необходимости для каждой проектируемой линии разрабатывать конструкции опор. Поэтому основными вопросами, которые должны решаться при проектировании, являются следующие: рациональный выбор и применение унифицированных опор, механический расчет проводов и тросов в нормальных и аварийных режимах, расстановка опор по профилю трассы линии.

На воздушных линиях могут встретиться пролеты различной длины, что в основном обусловлено рельефом местности, наличием различных преград и пересекаемых инженерных сооружений и пр. Поэтому по известным исходным данным для всех необходимых рас-

четных режимов работы линии заранее выполняют расчет провода данной марки для всего диапазона пролетов, которые могут получиться в данной линии. Результаты расчета представляются в виде зависимостей напряжения в проводе и стрел провеса от длины пролета. Выполненный в таком виде расчет провода называют систематическим расчетом. Он дает информацию о напряжении в проводах и стрелах провеса при решении различных задач, возникающих при проектировании механической части линии.

Систематический расчет проводов выполняют в следующей последовательности:

- 1) определяют удельные нагрузки, действующие на провода;
- 2) вычисляют значения критических пролетов;
- 3) находят напряжение в проводе при различных расчетных режимах (расчетных сочетаниях климатических условий);
- 4) определяют стрелы провеса провода для выбранных расчетных режимов;
- 5) по результатам расчетов составляют сводные таблицы и кривые в виде зависимостей напряжения в проводе и стрелы провеса от длины пролета.

Рассмотрим кратко отдельные этапы проектирования. Заметим, что все рассуждения справедливы как для проводов, так и для тросов. В целях сокращения слово «трос» в тексте опущено.

1.3. Содержание работы

При выполнении курсовой работы подлежат разработке следующие вопросы:

1. Выбор материала и типа опор.
2. Определение удельных нагрузок.
3. Определение критических пролетов.
4. Систематический расчет проводов и тросов.
5. Расчет проводов и тросов в аварийных режимах.
6. Расстановка опор по профилю трассы.
7. Расчет переходов через инженерные сооружения.
8. Расчет монтажных стрел провеса.
9. Графическая часть проекта содержит один лист – результаты расчета механической части ВЛ.

Исходные данные для курсовой работы приведены в приложении 1.

2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛИНИИ

2.1. Выбор материала и типов опор

Для воздушных линий электропередачи применяют деревянные, железобетонные и металлические (стальные) опоры.

Выбор материала опор в общем случае следует производить на основании сравнительных технико-экономических расчетов. В настоящее время в большинстве случаев при проектировании линий применяют унифицированные опоры. Нормы технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше рекомендуют следующие области применения различных материалов.

Деревянные опоры из пропитанной древесины следует применять для одноцепных линий электропередачи напряжением 35–150 кВ во всех районах, в которых применение древесины дает существенное снижение затрат на строительство.

Железобетонные опоры с предварительно напряженной арматурой применяют в условиях равнинной местности на всех одноцепных линиях 35, 110, 150 кВ, где нецелесообразно применение деревянных опор, на всех одноцепных линиях электропередачи 220 кВ на всех, двухцепных линиях 35, 110 кВ, на одноцепных линиях 330 кВ с горизонтальным расположением проводов, на линиях электропередачи напряжением 500 кВ, сооружаемых в равнинной местности, где применение металлических опор экономически нецелесообразно.

Не разрешается применять железобетонные опоры на линиях, проходящих в горной местности и в местности с сильно пересеченным профилем, а также на линиях, строительство которых удалено от базы железобетонных изделий на расстояние более 1000 км.

Металлические опоры следует применять на двухцепных линиях напряжением 35, 110, 150 кВ и на одноцепных линиях 220, 330 кВ в районах, где нецелесообразно или невозможно применение деревянных или железобетонных опор (в безлесных районах, в горной местности или при сильно пересеченной местности, при удаленности места строительства от базы на расстояние более 1000 км); на одноцепных линиях 330 кВ со смешанным расположением проводов; на двухцепных линиях 220, 330 кВ; на линиях 500 кВ в тех случаях, когда не допускается применение железобетонных опор; на линиях 750 кВ.

После решения вопроса о материале опор приступают к выбору основного типа промежуточных опор, а также типов анкерных и угловых опор.

Как уже указывалось, при проектировании следует применять унифицированные опоры. Унификация опор устанавливает для каждой опоры соответствующую область применения: напряжение линии, количество цепей, районы гололедности, максимальную скорость ветра, диапазоны марок проводов, марки тросов.

Зная эти сведения, из справочников выбирают соответствующий тип опоры. Например, опора ПА-2 (промежуточная на напряжение 35 кВ) имеет следующую область применения: одноцепная, районы по гололеду I–III, скорость ветра до 30 м/с, сечения проводов АС-50 + АС-95 и А-95 + А-120.

С целью максимального сокращения количества опор разных типов некоторые из них объединены для линий двух смежных стандартных напряжений: 35 и 110 кВ, 110 и 150 кВ, 220 и 330 кВ.

При выборе унифицированных опор отпадает необходимость в наиболее трудоемкой части проектирования - разработке конструкции опор.

До выбора типа опор надо иметь представление о желаемом расположении проводов на опоре. С точки зрения электрических процессов в линии желательно иметь симметричное расположение проводов друг относительно друга (в углах равностороннего треугольника). Однако на линиях с подвесными изоляторами при этом приходится располагать один провод под другим, что дает большую вероятность схлестывания проводов. По этим соображениям удобно применять горизонтальное расположение проводов в одной плоскости (П-образные опоры). Однако эти опоры оказываются более дорогими, так как должны иметь две стойки. Промежуточным решением является размещение проводов в углах неравностороннего треугольника, а на двухцепных опорах – в виде «бочки», «прямой елки», «обратной елки». На линиях 35–330 кВ обычно применяют опоры со смешанным расположением фаз за исключением особо гололедных районов с частой пляской проводов. В таких районах, а также на линиях 500 кВ и выше применяют горизонтальное расположение проводов.

По выбранному типу унифицированных опор устанавливают одну из главных величин для дальнейшего расчета – расчетную габаритную длину пролета. Она обычно указывается в технических данных опоры.

2.2. Определение удельных нагрузок

Провода воздушных линий испытывают действие вертикальных нагрузок (провода и гололеда) и горизонтальных нагрузок (давление ветра), в результате чего в металле возникают напряжения на растяжение.

При расчетах удобно пользоваться удельными (приведенными) нагрузками, которые относят к одному погонному метру длины линии на 1 мм^2 сечения провода.

Удельные нагрузки определяют исходя из условия, что нагрузка по длине провода в пролете распределяется равномерно и порывы ветра отсутствуют.

1. Нагрузка от собственной массы вычисляется в зависимости от материала провода и его конструкции

$$\gamma_1 = \frac{G_0}{1000 \cdot S}, \quad (2.1)$$

где G_0 – масса 1 км провода; S – суммарная площадь поперечного сечения всех проволок провода или троса.

2. Нагрузка от массы гололеда определяется исходя из условия, что гололедные отложения имеют цилиндрическую форму с плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$

$$\gamma_2 = 0,00283 \cdot \frac{b \cdot (d + b)}{S}, \quad (2.2)$$

где d – диаметр провода; b – толщина стенки гололеда, выбираемая в зависимости от климатического района по гололеду и номинального напряжения линии.

Чем выше напряжение линии, тем она более ответственная, и поэтому при ее расчете принимаются более жесткие условия. Для линий напряжением 35 кВ и ниже принимается толщина стенки гололеда, наблюдаемая с повторяемостью один раз в 5 лет, для линий 110–330 кВ один раз в 10 лет, а для линий 500 кВ и выше – один раз в 15 лет.

3. Нагрузки от собственной массы провода и гололеда направлены в одну сторону и их суммарное действие определяется как

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (2.3)$$

4. Нагрузка от давления ветра при отсутствии гололеда

$$\gamma_4 = \frac{\alpha \cdot C_x \cdot d \cdot q}{1000 \cdot S}, \quad (2.4)$$

где α – коэффициент, учитывающий неравномерность скорости ветра по длине пролета; C_x – аэродинамический коэффициент, принимаемый: 1,1 – для проводов и тросов диаметром 20 мм и более, не покрытых гололедом; 1,2 – для проводов и тросов диаметром менее 20 мм и для всех проводов и тросов, покрытых гололедом; q – скоростной напор ветра.

Повторяемость наибольшей величины скоростного напора ветра (скорости ветра) принимается такой же, как и при определении толщины стенки гололеда в зависимости от напряжения линии.

Расчетный скоростной напор находится для известного климатического района по ветру.

5. Нагрузка от давления ветра при наличии гололеда определяется аналогично, но с учетом увеличения площади диаметрального сечения из-за гололеда

$$\gamma_5 = \frac{\alpha \cdot C_x \cdot (d + 2 \cdot b) \cdot q}{1000 \cdot S} \cdot \sin \varphi. \quad (2.5)$$

6. Суммарная нагрузка от собственной массы провода и ветра (при отсутствии гололеда)

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2}. \quad (2.6)$$

7. Суммарная нагрузка от собственной массы провода, гололеда и ветра

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}. \quad (2.7)$$

Обратим внимание, что удельные нагрузки определяются и вводятся в расчеты не в произвольном их сочетании, а для строго определенных технически обоснованных расчетных сочетаний климатических условий. Например, нагрузку γ_7 вычисляют не при максимальной скорости ветра и гололеде, а при гололеде и скорости ветра $0,5 \cdot v$ либо при максимальной скорости ветра без гололеда.

Необходимые данные для расчета удельных нагрузок приведены в [7]–[9].

2.3. Определение критических пролетов

Для каждой марки провода существует предел прочности. Если нагрузка на провод превышает этот предел, то происходит нарушение механических свойств провода.

В проводах воздушных линий должен быть определенный запас механической прочности. При выборе запаса прочности проводов и тросов считаются с возможными погрешностями при выборе исходных данных (температуры и нагрузок) и другими допущениями. Поэтому запас прочности приходится принимать значительный.

Действующие Правила устройства электроустановок задают запас прочности в виде допускаемых напряжений в проводах в процентах от предела прочности провода для следующих условий:

- а) наибольшей внешней нагрузки;
- б) наименьшей температуры при отсутствии внешних нагрузок;
- в) среднегодовой температуры при отсутствии внешних нагрузок.

Соответствующие допускаемые напряжения σ_r , σ_- , σ_3 в процентах предела прочности провода приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Допускаемые напряжения в проводах и тросах

Наименование провода и троса	Допускаемое напряжение в процентах предела прочности провода и троса		
	при наибольшей внешней нагрузке σ_r	при наименьшей температуре σ_-	при среднегодовой температуре σ_3
Алюминиевые провода	50	30	30
Стальные провода			
ПСО	40	40	35
АС	50	50	35
Сталеалюминевые провода			
АС, АСО, АСУ	42	37	25
Стальные тросы	50	50	35

Ограничения напряжений при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре необходимы для проверки провода на статическое растяжение при наиболее тяжелых режимах. Эти ограничения могут оказаться недостаточными при динамических условиях, возникающих из-за вибрации проводов, которые могут привести к уменьшению прочности провода в местах его закрепления. Поэтому при расчете проводов

необходимо вводить также ограничение по среднеэксплуатационному напряжению σ_3 . Заметим, что ограничение уменьшает вредное влияние вибрации, но не исключает его полностью. Поэтому дополнительно должны быть проведены расчеты с целью проверки необходимости установки дополнительных средств защиты от вибрации.

Как видно из таблицы 2.1, для монометаллических проводов (А, ПС, ПСО) допускаемые напряжения при наибольшей внешней нагрузке и наименьшей температуре одинаковы. Это объясняется тем, что при механическом растяжении или при изменении температуры провод по всему сечению испытывает одинаковое изменение напряжения, как состоящий из одного металла.

В проводах, состоящих из двух металлов (АС), стальная и алюминиевая части имеют разные температурные коэффициенты линейного расширения и модули упругости, что вызывает разнохарактерные воздействия на удлинение провода при изменении внешних нагрузок и температуры. Поэтому допускаемые напряжения при наибольшей нагрузке и наименьшей температуре приняты различными.

При механическом расчете проводов в качестве исходного (начального) можно принимать любое состояние, характеризующееся любой нагрузкой и температурой. Однако при монтаже проводов должно быть выполнено условие, чтобы напряжения в них не превышали соответствующих допускаемых напряжений для режимов максимальной нагрузки, наименьшей температуры и среднегодовой температуры. Для выполнения этого условия целесообразно в качестве исходного принять одно из состояний провода, при котором напряжение может быть принято равным допускаемому. Надо лишь правильно выбрать один из трех ограничивающих режимов. При изменении нагрузки и температуры их влияние для заданных исходных климатических условий будет проявляться в большей или в меньшей степени в зависимости от длины пролета. При малых пролетах на напряжение в проводе большое влияние оказывает температура, а при больших пролетах – нагрузка. Граничный пролет, при котором влияние температуры и нагрузки на напряжение в проводе оказывается равновесным, называется *критическим пролетом*.

При ограничении напряжения в проводе по трем режимам в общем случае существует три критических пролета. Физический смысл их заключается в следующем.

Первый критический пролет – это пролет такой длины, при котором напряжение в проводе в режиме среднегодовой температуры равно допустимому при среднегодовой температуре σ_3 , а в режиме

наинизшей температуры – равно допустимому напряжению при наивысшей температуре σ_- .

Второй критический пролет – это пролет, при котором напряжение в проводе при наибольшей нагрузке равно допустимому напряжению при наибольшей нагрузке σ_r , а в режиме наинизшей температуры равно допустимому напряжению при наинизшей температуре σ_- .

Третий критический пролет – это пролет, при котором напряжение при среднегодовой температуре достигает допустимого при среднегодовой температуре σ_3 , а в режиме максимальной нагрузки равно допустимому при максимальной нагрузке σ_r .

Формулы для определения критических пролетов могут быть получены из уравнения состояния провода:

$$\sigma - \frac{\gamma^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot \beta} = \sigma_m - \frac{\gamma_m \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{(m)}^2 \cdot \beta} - \frac{\alpha}{\beta} \cdot (t - t_m), \quad (2.8)$$

где σ , γ , t – соответствующие величины для искомого (неизвестного) режима провода; l – длина пролета; β – величина, обратная модулю упругости $\beta = \frac{I}{E}$; α – температурный коэффициент линейного расширения провода; σ_m , γ_m , t_m – напряжение в проводе, удельная нагрузка и температура в исходном (известном) режиме (состояние) провода.

Для получения формулы какого-то критического пролета надо в уравнение состояния провода вместо величин σ_m , γ_m , t_m подставить значения для одного из ограничивающих режимов, а вместо величин σ , γ , t – другого, а длину пролета считать неизвестной величиной.

Например, для нахождения первого критического пролета надо: вместо σ_m , γ_m , t_m подставить σ_3 , γ_3 , t_3 (для режима среднегодовой температуры), в вместо σ , γ , t – σ_- , γ_1 , t_- .

Формулы для определения критических пролетов для сталеалюминиевых проводов имеют вид:

$$l_{1к} = \frac{2\sigma_3}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\beta \cdot (\sigma_3 - \sigma_-) + \alpha \cdot (t_3 - t_-)]}{1 - \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_-}\right)^2}};$$

$$l_{2к} = \frac{2\sigma_3}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\beta \cdot (\sigma_r - \sigma_-) + \alpha \cdot (t_r - t_-)]}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_-}\right)^2}},$$

$$l_{3к} = \frac{2\sigma_3}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\beta \cdot (\sigma_r - \sigma_3) + \alpha \cdot (t_r - t_3)]}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_3}\right)^2}},$$

где t_r , t_- , t_3 – соответственно температура в режиме максимальной нагрузки, наименьшей температуры и среднегодовой температуры; γ_r – удельная нагрузка в режиме максимальной нагрузки.

Остальные величины были пояснены ранее.

Следует обратить внимание на правильный выбор величины γ_r при определении критических пролетов. Как следует из применяемых при систематическом расчете проводов расчетных сочетаний климатических условий (табл. 2.2), максимальная нагрузка, необходимая для проверки напряжений в проводах, может наступить в одном из двух случаев:

а) при температуре $t = -5$ °С, скоростном напоре ветра $0,25 \cdot q_{\max}$ (скорость ветра $0,52 \cdot v_{\max}$) и наличии гололеда (расчетный режим 6);

б) при температуре $t = -5$ °С и максимальном напоре ветра q_{\max} (v_{\max}) при отсутствии гололеда (расчетный режим 5).

Удельная нагрузка γ_r должна быть взята наибольшая из этих двух случаев.

Для монометаллических проводов (алюминиевых, стальных) и тросов формулы критических пролетов упрощаются

$$l_{1к} = \frac{2\sigma_3}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\beta \cdot (\sigma_3 - \sigma_{\max}) + \alpha \cdot (t_3 - t_-)]}{1 - \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{\max}}\right)^2}},$$

$$l_{2к} = \frac{2\sigma_{\max}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\alpha \cdot (t_r - t_-)]}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_1}\right)^2 - 1}},$$

$$l_{3к} = \frac{2\sigma_{\max}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot [\beta \cdot (\sigma_{\max} - \sigma_3) + \alpha \cdot (t_r - t_3)]}{\left(\frac{\gamma_r}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_3}\right)^2}}$$

Здесь $\sigma_{\max} = \sigma_r = \sigma_-$ – допустимое напряжение в режиме максимальной нагрузки и наинизшей температуры.

Таблица 2.2

Расчетные сочетания климатических условий

Расчетные режимы	Сочетания климатических условий		
	Температура	Ветровая нагрузка	Наличие гололеда
1	максимальная t_{\max}	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
2	$t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	отсутствует $q = 0$	провода и тросы покрыты гололедом $\gamma_{2\max}$
3	наинизшая t_-	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
4	среднегодовая t_3	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
5	$t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	напор ветра максимальный $q_{\max}(v_{\max})$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
6	$t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	напор ветра максимальный $0,25 \cdot q_{\max}(0,5 \cdot v_{\max})$	провода и тросы покрыты гололедом $\gamma_{2\max}$
7	$t = +5 \text{ }^\circ\text{C}$	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
8	$t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	$q = 6,25 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^2 (v = 10 \text{ м}/\text{с})$	отсутствует $\gamma_2 = 0$

2.4. Систематический расчет проводов и тросов

Цель систематического расчета заключается в построении зависимостей изменения напряжения в проводе от длины пролета $\sigma = \varphi(l)$ и стрелы провеса от длины пролета $\gamma = \varphi(l)$. Эти зависимости находят для определенных расчетных сочетаний климатических условий. Основные расчетные режимы приведены в таблице 2.2. Поясним назначение каждого из них.

Расчетные режимы 1–6 необходимы для проверки работы линии в нормальных условиях (при необорванных проводах и тросах).

Режим 7 используется при расчете расстояний проводов от тросов (в грозном режиме при температуре воздуха +15 °С).

Режим 8 применяют для проверки линии по условиям монтажа.

Сочетания климатических условий 1 и 2 необходимы для нахождения максимальной вертикальной стрелы провеса, которая может возникнуть при максимальной температуре, либо когда провода и тросы нагружены гололедом.

Режим 3 используется для проверки проводов по допустимому напряжению в условиях наименьшей температуры, а также для определения габаритов при пересечении с инженерными сооружениями и для других целей.

По расчетному режиму 4 контролируют напряжение в средних эксплуатационных условиях, чтобы оно не превышало допустимое при среднегодовой температуре.

Один из режимов 5 или 6 дает максимальную внешнюю нагрузку на провода и по нему производится проверка на допустимое напряжение при максимальных нагрузках. Эти режимы используют также для нахождения косых (наклонных) стрел провеса провода и тросов (при воздействии ветра).

Зависимости $\sigma = \varphi(l)$ и $\gamma = \varphi(l)$ для каждого расчетного сочетания климатических условий строятся по 8–10 точкам. Величины наибольшего и наименьшего пролетов принимаются в зависимости от высоты принятого типа опор, заданных климатических условий (гололеда и ветра), марки провода и должны охватывать все длины пролетов, которые могут встретиться на проектируемой линии (для линий 35–220 кВ они лежат в пределах 70–400 м). Промежуточные значения пролетов берутся через 30–50 м. В число промежуточных точек следует включать длины критических пролетов.

Возможны в основном следующие сочетания длин критических пролетов: $l_{1к} \leq l_{2к} \leq l_{3к}$ и $l_{1к} \geq l_{2к} \geq l_{3к}$. В первом случае физический смысл имеют первый и третий критические пролеты $l_{1к}$ и $l_{3к}$, а второй критический пролет $l_{2к}$ является мнимым. Во втором случае имеющим физический смысл является только второй критический пролет $l_{2к}$, а пролеты $l_{1к}$ и $l_{3к}$ являются мнимыми. Физическая сущность этого заключения подробно изложена в литературе и здесь не приводится.

Если после вычисления критических пролетов получилось соотношение $l_{1к} \leq l_{2к} \leq l_{3к}$, то при расчете точек зависимостей $\sigma = \varphi(l)$ и $\gamma = \varphi(l)$ поступают следующим образом:

- для точек, соответствующих пролетам $l \leq l_{1к}$, принимают в качестве исходного режим наинизших температур (сочетание 3, табл. 2.2);
- для пролетов $l_{1к} \leq l \leq l_{3к}$ расчет точек ведут по сочетанию климатических условий 4;
- для пролетов $l \geq l_{3к}$ за исходный режим принимают сочетание 5 или 6 в зависимости от того, при каком из этих сочетаний имеет место большая удельная нагрузка.

При соотношении критических пролетов $l_{1к} \geq l_{2к} \geq l_{3к}$ для точек, соответствующих пролетам $l \leq l_{2к}$, за исходный принимают режим наинизших температур 3, а для пролетов $l \geq l_{2к}$ – режим максимальных нагрузок 5 или 6.

Реже могут встретиться случаи, когда один или два критических пролета мнимые. Если оказался мнимым $l_{1к}$, то для длин пролетов $l \leq l_{3к}$ в качестве исходного режима следует брать режим среднегодовой температуры, а при $l \geq l_{3к}$ – режим максимальных нагрузок. В случае, когда мнимый $l_{3к}$, при $l \leq l_{1к}$ за исходный режим берут режим наинизших температур, а при $l \geq l_{1к}$ – режим среднегодовой температуры. В этих случаях пролет $l_{2к}$ физического смысла не имеет. Если мнимыми оказались одновременно $l_{1к}$ и $l_{3к}$, то для всех расчетных длин пролетов в качестве исходного режима следует принимать режим среднегодовой температуры.

Напряжение в проводе определяется из уравнения состояния провода (2.8). Для этого вместо величин с индексами « t » подставляют значения для соответствующего исходного режима, а вместо величин γ и t значения режима, для которого необходимо найти напряжение в проводе. Тогда для определенной длины пролета уравнение состояния провода принимает вид кубического уравнения

$$\sigma - \frac{B}{\sigma^2} = \pm A,$$

где A и B – числовые коэффициенты, полученные в результате подстановки в уравнение состояния провода всех известных величин.

Это уравнение обычно решают подбором с помощью ЭВМ.

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

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma}, \quad (2.9)$$

где l – длина пролета, соответствующая данной расчетной точке; γ – удельная нагрузка в расчетном режиме, для которого производится определение стрелы провеса; σ – напряжение в материале провода в соответствующем расчетном режиме при выбранной длине пролета.

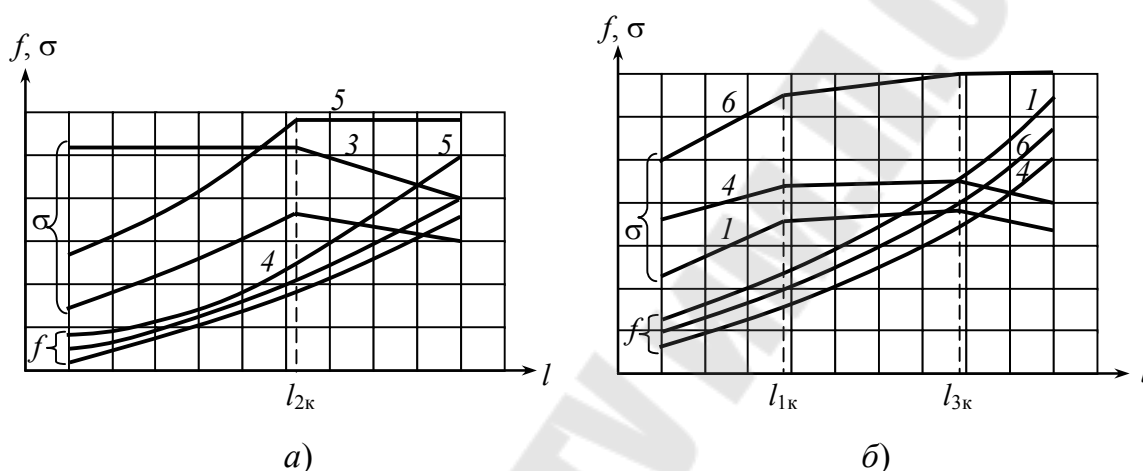


Рис. 2.1. Пример результатов систематического расчета проводов

Результаты расчетов сводят в таблицы и по ним вычерчивают соответствующие графики. На рис. 2.1 в качестве примера дан вид некоторых графиков при $l_{1к} \geq l_{2к} \geq l_{3к}$ (рис. 2.1, а) и при $l_{1к} \leq l_{2к} \leq l_{3к}$ (рис. 2.1, б).

При проведении массовых систематических расчетов их выполняют на ЭВМ.

2.5. Расчет проводов и тросов в аварийных режимах

Под аварийным режимом воздушной линии понимают работу при полностью или частично оборванных проводах и тросах.

Обрывы проводов и тросов возможны даже при правильно спроектированной по нормальному режиму и правильно построенной линии. Повреждения линии с обрывом проводов могут произойти при воздействии на них внешних нагрузок, значительно превосходящих расчетные, из-за незначительного повреждения проводов в зажимах

при монтаже и вибрации проводов, при схлестывании проводов в процессе «пляски» и т. д.

Основная задача механического расчета проводов при аварийном режиме заключается в определении величины тяжения и провеса провода в пролетах, смежных с аварийным.

Если анкерный пролет состоит из одного пролета, то при обрыве провода в нем со стороны уцелевших проводов в смежных пролетах на анкерные опоры возникает усилие, равное полному тяжению провода до обрыва. Величина этого усилия применяется в качестве нормативной горизонтальной нагрузки при расчете анкерных опор в аварийном режиме.

Если же анкерный пролет состоит из нескольких пролетов, то при обрыве провода в одном из пролетов, 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 будет также происходить из-за отклонения опор в сторону действия горизонтальной силы.

Изменение тяжения провода в результате смещения его точки подвеса называется редуцией, а установившееся новое тяжение – редуцированным.

Целью расчета аварийного режима воздушной линии и является определение редуцированного тяжения. Оно представляет собой нагрузку на промежуточную опору в аварийном режиме. При проектировании новых опор величина редуцированного тяжения служит в качестве исходного данного. Если проектирование линии ведется с применением унифицированных опор, то это тяжение определяют для заданных условий и затем сравнивают его с наибольшим тяжением, по которому производился расчет выбранного типа унифицированной опоры.

Кроме того, по редуцированному тяжению определяют стрелы провеса и производят проверку габарита проводов до земли и до пересекаемых инженерных сооружений.

Редуцированное тяжение зависит от материала и конструкции опоры, типа изоляции, нагрузки на проводе и длины пролета.

Расчет проводов в аварийном режиме следует производить для сочетаний климатических условий, приведенных в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Сочетания климатических условий

Расчетные режимы	Сочетания климатических условий		
	температура	ветровая нагрузка	наличие гололеда
1	$t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$	отсутствует $q = 0$	провода и тросы покрыты гололедом $\gamma_{2\text{max}}$
2	наинизшая $t_{\text{н}}$	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$
3	среднегодовая $t_{\text{с}}$	отсутствует $q = 0$	отсутствует $\gamma_2 = 0$

По расчетным режимам 1 и 2 находят наибольшую нагрузку, действующую на анкерные опоры при обрыве провода. Она может наступать при гололеде либо при наинизшей температуре.

Режим 3 используют для расчета промежуточных опор, определения стрел провеса и проверки габаритов. Несмотря на то, что наибольшая стрела провеса может наступить при других условиях (например, при максимальной температуре), этот расчет проводят для среднегодовых условий, так как в противном случае происходит значительное удорожание линии.

Промежуточные опоры с подвесными гирляндами рассчитываются на условные усилия при обрыве тех проводов и тросов, которые дают наибольший изгибающий или крутящий момент на опору.

Расчет опор производится на следующие условия: оборван один провод (при любом числе проводов на опоре); тросы не оборваны; оборван один трос; провода не оборваны.

Расчет выполняют для сочетаний климатических условий, соответствующих среднеэксплуатационным условиям (при среднегодовой температуре и отсутствии ветра и гололеда).

Расчет промежуточных опор для линий с нерасщепленными проводами ведут исходя из нормативного тяжения, принимаемого равным следующим условным величинам:

1) для металлических – свободно стоящих опор из любого материала на оттяжках:

- с проводами сечением до 185 мм^2 $0,5 \cdot T_{\text{max}}$;
- с проводами сечением 240 мм^2 и более $0,4 \cdot T_{\text{max}}$;

- 2) для железобетонных свободно стоящих опор:
- с проводами сечением до 185 мм² 0,3 · T_{max} ;
 - с проводами сечением 240 мм² и более 0,25 · T_{max} ;
- 3) для деревянных свободно стоящих опор:
- с проводами сечением до 185 мм² 0,25 · T_{max} ;
 - с проводами сечением от 240 мм² до 400 мм² 0,2 · T_{max} .

Здесь T_{max} – наибольшее нормативное тяжение соответствующей марки провода, для которой производится конструирование данной опоры.

В случае применения унифицированных опор задача сводится к сравнению полученного при проектировании линии редуцированного тяжения с нормативным тяжением при обрыве провода, по которому, рассчитана применяемая унифицированная опора. Величина T_{max} обычно известна из технических данных унифицированных опор. Ее можно также определить по формуле:

$$T_{\max} = \sigma_{\text{доп}} \cdot S, \quad (2.10)$$

где $\sigma_{\text{доп}}$ – наибольшее допускаемое напряжение для данной марки провода; S – наибольшее сечение провода из всего диапазона сечений, для которого может быть применена данная унифицированная опора.

Существует несколько методов определения тяжения проводов в аварийном режиме. Аналитическое решение этой задачи громоздко. Поэтому практические расчеты выполняют графическим или графоаналитическим методами. Теоретические положения этих методов изложены в [3]–[5]. Здесь же укажем порядок расчета без подробных теоретических пояснений.

Исследования показывают, что при числе уцелевших пролетов между анкерными опорами, большем пяти, определение редуцированного тяжения можно ввести, полагая между анкерными опорами 6 пролетов. При этом остальные пролеты оказывают малое влияние на редуцированное тяжение в пролете, смежном с аварийным, из-за малого смещения точек подвеса. Поэтому для расчета проводов в аварийном режиме принимают расчетную схему из шести одинаковых пролетов, длина которых равна расчетной длине пролета l_0 . Полагают также, что точки подвеса провода имеют одинаковые отметки (рис. 2.2).

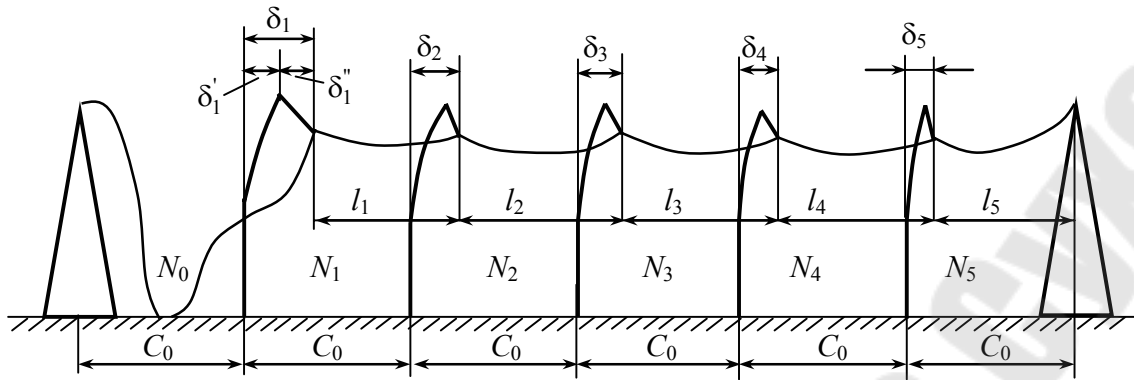


Рис. 2.2. Расчетная схема для определения редуцированного натяжения

При обрыве провода в пролете 0 на опорах возникает разность тяжений ΔT , которая приводит к отклонению точек подвеса провода на опорах на величины δ_i . Эти величины обусловлены гибкостью опор (δ') и отклонением гирлянд изоляторов (δ''). Из-за неодинакового отклонения точек подвеса провода длины пролетов изменятся и станут неравными $l_1 \dots l_5$.

Для определения редуцированного тяжения производят предварительно построение двух зависимостей: разности тяжений на опоре от отклонения точки подвеса провода $\Delta T = f(\sigma)$ и тяжения провода от изменения длины пролета $\Delta T = f(\Delta l)$.

Отклонение точки подвеса провода определяется прогибом опоры и отклонением гирлянды изоляторов:

$$\delta = \delta' + \delta'' \quad (2.11)$$

Прогиб промежуточной опоры, вызываемый разностью тяжений в двух смежных пролетах:

$$\delta' = k \cdot m \cdot \Delta T, \quad (2.12)$$

где k – коэффициент гибкости опоры, принимаемый:

- для деревянных опор с составной стойкой 0,002–0,0025 м/кг·с;
- для деревянных опор и со стойкой из одного бревна – 0,001–0,0012 м/кг·с;
- для железобетонных опор – 0,001 м/кг·с;
- металлические опоры можно считать жесткими ($k = 0$);
- m – коэффициент распределения усилий между стойками опоры, принимается для П-образных опор:

– при обрыве крайнего провода для опор без ветровых связей 1,0;

– для опор с ветровой связью 0,75;

– при обрыве среднего провода – 0,5;

– для одностоечных опор – 1,0.

Отклонение гирлянды изоляторов из-за разности тяжений в проводах двух смежных пролетов:

$$\sigma'' = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\sqrt{(G_{\text{п}} + \frac{G_{\text{г}}}{2})^2 + \Delta T^2}}, \quad (2.13)$$

где λ – длина гирлянды и изоляторов; $G_{\text{п}}$ – вес пролета провода; $G_{\text{г}}$ – вес гирлянды изоляторов.

Длина и масса гирлянды определяются по соответствующим данным отдельных изоляторов и линейной арматуры.

Таким образом, зависимость $\Delta T = f(\sigma)$ может быть построена по следующему уравнению:

$$\sigma = k \cdot m \cdot \Delta T + \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\sqrt{(G_{\text{п}} + \frac{G_{\text{г}}}{2})^2 + \Delta T^2}}. \quad (2.14)$$

Для ее построения задают 6–8 значений разности тяжений ΔT в интервале от 0 до 60–70 % величины тяжения нормального режима линии (при необорванных проводах) и по формуле (2.14) определяют соответствующие значения σ . Тяжение в нормальном режиме определяют по напряжению материала провода из систематического расчета для того же сочетания климатических условий:

$$T_3 = \sigma \cdot S, \quad (2.15)$$

где S – площадь сечения провода.

Зависимость $\Delta T = f(l)$ строят, используя следующее уравнение, получаемое в результате приравнивания длины провода в пролете до и после обрыва провода:

$$T_3 = \sigma \cdot S = S \cdot \sqrt{\frac{l^3 \cdot \gamma^2}{24 \cdot (L_0 - l)}}, \quad (2.16)$$

где L_0 – длина провода в пролете; γ – удельная нагрузка от собственного веса провода; l – длина пролета в аварийном режиме.

Длина провода в пролете:

$$L_0 = l_0 + \frac{\gamma^2 \cdot l_0^3}{24 \cdot \sigma_0^2}, \quad (2.17)$$

где σ_0 – напряжение провода, взятое из систематического расчета для расчетного пролета.

Задаваясь различными длинами пролета l , по формуле (2.16) находят тяжение провода T . Имея в виду, что изменение длины пролета $\Delta l = l_0 - l$, можно построить зависимость $T = f(\Delta l)$.

В практических расчетах при нахождении тяжения задаются 8–10 значениями длины пролета l , начиная с l_0 и затем меньшими через 0,1–0,3 м.

Зависимости $\Delta T = f(\sigma)$ и $T = f(\Delta l)$ имеют вид, показанный на рис. 2.3. Их построение выполняют обязательно в одном масштабе.

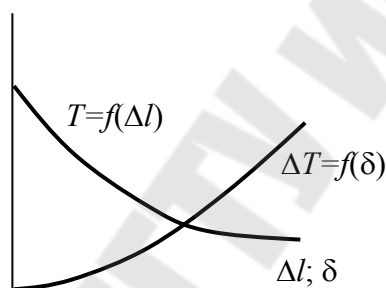


Рис. 2.3. Графики для расчета проводов в аварийном режиме

Редуцированное тяжение в пролете, смежном с аварийным, находят, задаваясь тяжением в пятом пролете порядка 70–80 % от тяжения провода в нормальном режиме и выполняя серию построений на кривых рис. 2.3. Методика этих построений подробно изложена в [3]–[5].

2.6. Расстановка опор по профилю трассы

Расстановке опор – наиболее ответственный этап при проектировании линии. В результате расстановки опор определяются окончательно число и тип опор, количество изоляторов, линейной арматуры.

Одна из главных задач при расстановке опор по профилю трассы заключается в проверке расстояний от проводов до земли и до пересекаемых инженерных сооружений. Габариты должны проверяться в следующих режимах:

а) в нормальном режиме линии (при необорванных проводах и тросах) по максимальной стреле провеса из сопоставления стрел провеса в режиме максимальной температуры и в режиме гололеда без ветра;

б) при аварийном состоянии линии (обрыв провода в соседнем пролете) в режиме среднегодовой температуры.

В нормальном состоянии линии проверке габаритов подлежат все пролеты в любой местности. В аварийном режиме габариты проверяются во всех пролетах только в населенной местности. В ненаселенной местности габариты в аварийных режимах следует проверять для пролетов пересечения с инженерными сооружениями.

При пересечении двух воздушных линий должны проверяться расстояния по вертикали между ближайшими проводами и тросами при грозном режиме (температура воздуха $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ветер и гололед отсутствуют).

На заданном профиле трассы опоры устанавливают с помощью максимального шаблона. Шаблон представляет собой три кривые провисания провода (рис. 2.4), построенные в виде парабол для режима, при котором наступает максимальная стрела провеса (при наибольшей температуре или при гололеде без ветра). Режим максимальной стрелы провеса находится из систематического расчета для расчетной длины пролета. Он может быть также определен путем вычисления критической температуры, при которой стрела провеса провода без гололеда и ветра достигает такой же величины, как при гололеде без ветра:

$$t_k = t_2 + \frac{\sigma}{\alpha \cdot E} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3}\right), \quad (2.18)$$

где t_2 – температура при гололеде ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$); σ – напряжение в проводе при гололеде без ветра.

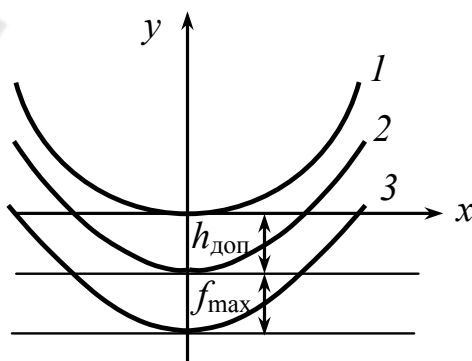


Рис. 2.4. Максимальный шаблон

Если $t_{\max} \geq t_k$, то наибольшая стрела провеса будет возникать при t_{\max} , а в случае $t_{\max} \leq t_k$ – при гололеде без ветра.

Первая кривая шаблона строится на основе формул стрелы провеса

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma}. \quad (2.19)$$

Заменяя $l = 2 \cdot x$, получим

$$y = k \cdot x^2, \quad (2.20)$$

где

$$k = \frac{\gamma}{2 \cdot \sigma}. \quad (2.21)$$

Удельная нагрузка γ и напряжение провода σ берутся для режима, соответствующего максимальной стреле провеса. Напряжение находится по результатам систематического расчета проводов для длины пролета:

$$l' \approx (0,8 \dots 0,95) \cdot l_{\text{расч}},$$

т. е. по длине, несколько меньшей, чем расчетная длина пролета. Опыт проектирования показывает, что средний пролет после расстановки опор получается примерно на 10 % меньше, чем расчетный, за счет наличия ограничений по трассе (дороги, реки, углы и т. п.).

Задаваясь различными значениями x , по формуле (2.20) находят соответствующие значения y .

Вторую кривую, называемую габаритной, строят параллельно первой, отложив от нее по вертикали расстояние $h_{\text{доп}}$, равное допустимому габариту от провода до земли. Аналогично строят третью кривую, называемую земляной. Вертикальное расстояние от второй кривой принимают равной максимальной стреле провеса f_{\max} .

Построение шаблона выполняют в тех же масштабах, что и продольный профиль трассы. Шаблон чертят на миллиметровке, а затем перечерчивают на прозрачную кальку.

До расстановки опор всю трассу разбивают на участки, ограниченные анкерными опорами. Расстановку промежуточных опор производят на каждом анкерном участке независимо от других анкерных участков.

Максимальный шаблон накладывают на профиль трассы так, чтобы кривая 3 пересекала профиль в месте установки первой анкерной опоры, а кривая 2 касалась профиля. При этом ось y должна находиться в вертикальном положении. Тогда другая точка пересечения кривой 3 с профилем укажет место установки первой промежуточной опоры. При таком положении шаблона во всех точках пролета габарит до земли будет не менее допустимого. Затем шаблон передвигают и аналогичным образом находят положение следующей опоры. Поочередное положение шаблона на профиле трассы показано на рис. 2.5.

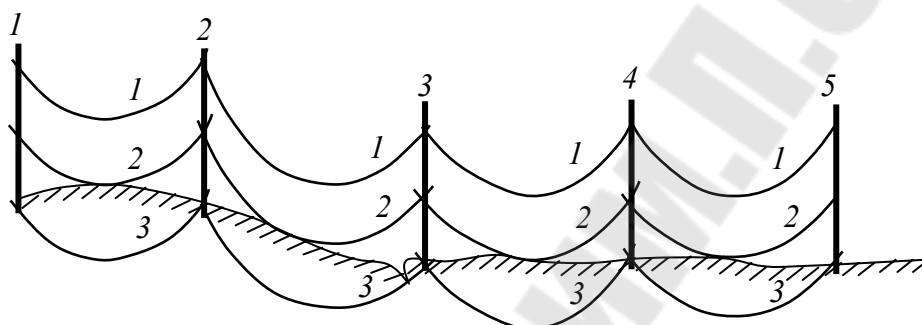


Рис. 2.5. Применение максимального шаблона для расстановки опор

Последний пролет в конце анкерного участка может оказаться малой длины. В этом случае его следует увеличить, уменьшая соответственно ряд соседних пролетов, стремясь, чтобы все пролеты были примерно одинаковой длины. При этом шаблон надо дополнительно проверить, чтобы при перемещении опор габариты оставались не менее допустимых.

Более подробно вопрос расстановки опор на профиле трассы описан в [3]–[5]. При массовых расчетах расстановку опор производят с применением ПЭВМ.

После расстановки опор определяют величину приведенного пролета $l_{пр}$.

Его физический смысл заключается в том, что после монтажа провода в анкерном пролете с помощью подвесных изоляторов, по всему анкерному участку произойдет выравнивание напряжения провода, которое будет соответствовать какому-то условному пролету. В дальнейших расчетах напряжение провода в анкерном участке определяют по приведенному пролету.

Приведенный пролет вычисляют как корень квадратный из суммы кубов пролетов, входящих в анкерный пролет (между двумя соседними анкерными опорами), деленной на длину анкерного участка:

$$l_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n l_i^3}{\sum_1^n l_i}}. \quad (2.22)$$

Очевидно, что приведенный пролет для различных анкерных участков в общем случае различен.

Если приведенный пролет оказался близок к расчетному, по которому был построен шаблон, то расстановку опор можно считать удовлетворительной.

В случае $l_{\text{пр}} \gg l'$ или $l_{\text{пр}} \ll l'$ следует найти из систематического расчета напряжение провода, соответствующее $l_{\text{пр}}$ и сравнить его с напряжением, которое принималось при построении шаблона. При существенном различии надо построить другой шаблон для нового напряжения и произвести перестановку опор. Необходимость этого вызвана тем, что при меньшем полученном напряжении будут возникать большие стрелы провеса, что может привести к нарушению габаритов до земли. Если напряжение оказывается выше расчетного, для которого строился шаблон, то будут создаваться излишние запасы в габаритах, что приведет к перерасходу опор.

На участках трассы с сильно пересеченным профилем необходима проверка опор на вырывание, которое может возникнуть, когда отметка расположения опоры значительно ниже отметок двух соседних опор (рис. 2.6).

Проверка на вырывание производится с помощью минимального шаблона. Он представляет собой кривую провисания провода при минимальной стреле провеса и строится по формуле (2.19), куда подставляется удельная нагрузка от собственного веса провода и напряжений в режиме наинизшей температуры.

Шаблон накладывают на профиль так, чтобы кривая проходила через вершины опор 1 и 3 (рис. 2.6). Если при этом кривая шаблона окажется выше точки «а», то, следовательно, опора 2 будет испытывать силу, действующую вертикально вверх. Для ее устранения могут быть рассмотрены следующие мероприятия: перестановка опоры 2 на более высокую отметку, ликвидация вообще опоры 2, применение по-

вышенной опоры 2, установка анкерной опоры 2 вместо промежуточной, подвеска компенсирующих грузов.

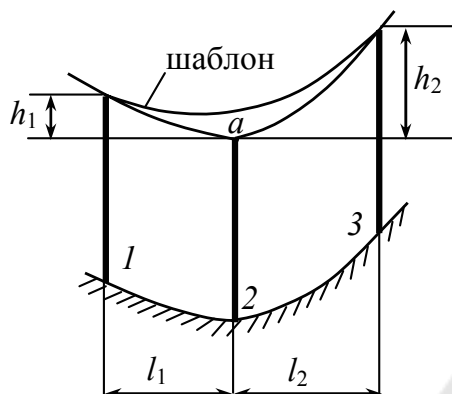


Рис. 2.6. Проверка опоры на выравнивание

При расстановке опор на профиле трассы все опоры должны быть проверены по нагрузкам, которые будут возникать в реальных условиях. Вертикальные нагрузки, действующие на опору, определяются собственной массой проводов и гололеда, а горизонтальные – действием ветра на провода линии.

Проверку производят путем вычисления для каждой опоры весового и ветрового пролетов и сравнения их с соответствующими расчетными.

Весовой пролет соответствует вертикальной нагрузке на опору и определяется суммой двух смежных эквивалентных полупролетов, прилегающих к данной опоре. Так, для опоры 2 (рис. 2.7)

$$l_{\text{вс}} = \frac{l'_{\text{э}1} + l''_{\text{э}2}}{2}. \quad (2.23)$$

Эквивалентные пролеты являются пролетами с подвеской провода на одинаковых высотах.

Первый (большой) эквивалентный пролет:

$$l'_3 = l + \frac{2 \cdot \sigma \cdot h}{\gamma \cdot l}. \quad (2.24)$$

Второй (малый) эквивалентный пролет:

$$l''_3 = l - \frac{2 \cdot \sigma \cdot h}{\gamma \cdot l}, \quad (2.25)$$

где l – действующая длина пролета; h – разность высот точек подвеса провода.

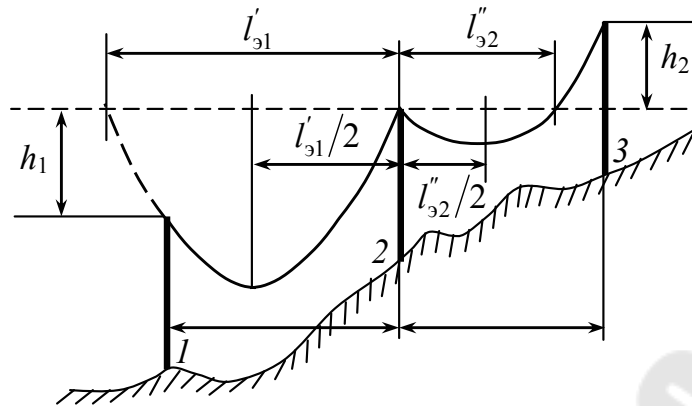


Рис. 2.7. Определение весового пролета

Так, для опоры 2 (рис. 2.7):

$$l'_{\text{э}1} = l_1 + \frac{2 \cdot \sigma \cdot h_1}{\gamma \cdot l_1}; \quad (2.26)$$

$$l''_{\text{э}2} = l_2 - \frac{2 \cdot \sigma \cdot h_2}{\gamma \cdot l_2}, \quad (2.27)$$

где γ – удельная нагрузка от собственного веса провода и гололеда; σ – напряжение провода в режиме гололеда без ветра, взятое для приведенного пролета данного анкерного участка; l_1, l_2 – длины пролетов берутся с профиля трассы.

При проектировании смежными эквивалентными пролетами для данной опоры не всегда будет один большой, а другой малый эквивалентный пролет. Возможны два больших или два малых эквивалентных пролета. В этих случаях формула (2.23) принимает соответственно вид:

$$l_{\text{вес}} = \frac{l'_{\text{э}1} + l'_{\text{э}2}}{2} \quad \text{или} \quad l_{\text{вес}} = \frac{l''_{\text{э}1} + l''_{\text{э}2}}{2}. \quad (2.28)$$

Очевидно, что при подвеске провода на одинаковых высотах $h = 0$, и тогда весовой пролет равен полусумме действительных пролетов:

$$l_{\text{вес}} = \frac{l_1 + l_2}{2}. \quad (2.29)$$

На опору действует вертикальная нагрузка не выше расчетной, если

$$l_{\text{вес}} \leq l_{\text{вес.расч}} \cdot \quad (2.30)$$

Расчетный весовой пролет обычно известен из технических данных унифицированных опор.

Проверку горизонтальной нагрузки от действия ветра производят путем вычисления ветрового пролета и сравнения его с расчетным. В инженерных расчетах с достаточной точностью ветровой пролет можно вычислить как полусумму смежных пролетов:

$$l_{\text{ветр}} = \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot \quad (2.31)$$

Для каждой опоры должно быть соблюдено условие:

$$l_{\text{ветр}} \leq l_{\text{ветр.расч}} \cdot \quad (2.32)$$

Расчетный ветровой пролет указывается в паспортных данных унифицированных опор.

Если весовой или ветровой пролеты для какой-то опоры оказались выше расчетных, то должна быть произведена соответствующая перестановка опор на профиле трассы.

2.7. Расчет переходов через инженерные сооружения

Под переходами через инженерные сооружения понимают пересечения проектируемой линии с железными и шоссейными дорогами, линиями электропередачи, линиями связи и сигнализации. Цель расчета заключается в определении расстояний от проводов линии до пересекемого сооружения и сравнении их с допустимыми.

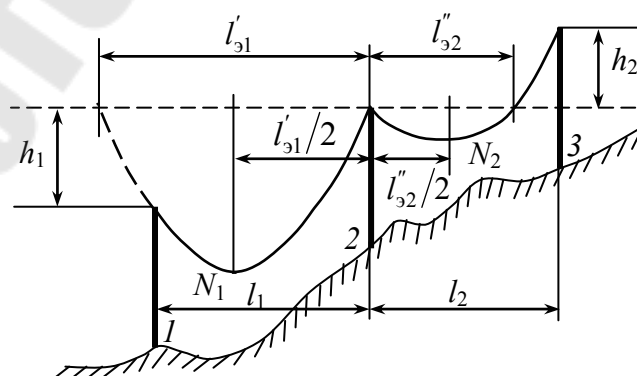


Рис. 2.8. Переход линии через инженерное сооружение

Действительное расстояние от нижнего провода до инженерного сооружения (рис. 2.8):

$$h = h_0 - h_c - f_1, \quad (2.33)$$

где h_0 – высотная отметка точки подвеса нижнего провода на профиле трассы, определяемая отметкой в месте установки опоры и размерами отдельных элементов опоры; h_c – высотная отметка верхней части инженерного сооружения на профиле трассы; f_1 – стрела провеса провода в месте пересечения, отстоящего от опоры с большей отметкой точки подвеса провода на расстоянии $l_{\text{п}}$. Стрела провеса провода в нормальном режиме:

$$f_1 = \frac{\gamma \cdot l_{\text{п}} \cdot (l'_3 - l_{\text{п}})}{2 \cdot \sigma}, \quad (2.34)$$

где γ – удельная нагрузка провода, соответствующая режиму наибольшей стрелы провеса (режим максимальной температуры или гололеда без ветра); σ – напряжение провода в режиме наибольшей стрелы провеса, находится для приведенного пролета данного анкерного участка; l'_3 – длина первого (большого) эквивалентного пролета.

При подвеске проводов на опорах пролета пересечения на одинаковых высотах $l'_3 = l$ и, следовательно, в формулу (2.34) вместо l'_3 следует подставлять длину пролета пересечения l .

В аварийном режиме стрелу провеса в месте пересечения определяют для режима среднегодовой температуры при отсутствии ветра и гололеда. Расчет ведут по формуле (2.34), куда вместо γ подставляют нагрузку от собственного веса провода. Напряжение провода находят по редуцированному тяжению провода $T_{\text{ред}}$ и сечению S :

$$\sigma_{\text{ред}} = \frac{T_{\text{ред}}}{S}, \quad (2.35)$$

либо с помощью коэффициентов редукиции (k):

$$\sigma_{\text{ред}} = \sigma_3 \cdot k, \quad (2.36)$$

где σ_3 – напряжение провода при среднегодовой температуре.

При расчете перехода в аварийном режиме важно правильно выбрать расчетную схему. Для нахождения наибольшей стрелы провеса надо принимать расчетную схему, в которой обрыв провода на-

ходится в пролете, соседнем с пролетом пересечения. Если переход находится на пятом и более пролете от анкерной опоры, то расчетную схему можно выбрать, состоящую из пяти уцелевших пролетов. При меньшем числе пролетов до анкерной опоры расчетная схема принимается с фактическим количеством пролетов.

Если в одном пролете выполняется пересечение с несколькими инженерными сооружениями, то проверка габаритов должна производиться до каждого из них.

При выбранной высоте опор проектируемой линии расстояния до пересекаемых сооружений могут оказаться меньше допустимых. В этом случае должны быть разработаны соответствующие мероприятия. Прежде всего следует попытаться увеличить габариты путем перемещения опоры проектируемой линии ближе к месту пересечения и за счет этого уменьшить стрелу провеса над инженерными сооружениями. В ряде случаев допускается переустройство пересекаемых линий электропередачи и линий связи путем понижения их опор или перекладки в подземные кабели. Может оказаться целесообразным применение повышенных опор на проектируемой линии в месте пересечения.

Чертежи переходов выполняют в более крупном масштабе, чем профиль трассы. Для переходов принимают следующие масштабы: по вертикали 1:1000 или 1:2000.

2.8. Расчет монтажных стрел провеса

Поскольку монтаж провода может выполняться в широком диапазоне температур окружающего воздуха, важно правильно выбрать соответствующие стрелы провеса в реальных условиях монтажа.

Если стрела провеса будет занижена, то в режиме минимальных температур может наступить напряжение провода, превышающее допустимое. При завышении стрелы провеса в режиме максимальных температур или при гололеде могут нарушиться габариты до земли и пересекаемых сооружений.

При монтаже провода обычно бывает достаточно осуществлять контроль над стрелами провеса в двух пролетах анкерного участка. Поэтому монтажные стрелы провеса обычно строят для двух пролетов каждого анкерного участка, являющихся вторыми от анкерных опор или для ровного участка трассы.

Расчет монтажных стрел провеса выполняют в следующем порядке:

1. Определяют приведенные пролеты $l_{пр}$ для всех анкерных участков.

2. Устанавливают соотношение между приведенным пролетом и критическими пролетами, по которому принимают один из трех исходных режимов, ограничивающих допустимые напряжения провода.

3. Используя уравнение состояния провода, находят напряжение провода для данного приведенного пролета анкерного участка при различных температурах. Для этого в правую часть уравнения подставляют параметры принятого режима, ограничивающего допустимое напряжение провода, а в левую часть – удельную нагрузку от собственного веса провода, так как монтаж проводов ведется при отсутствии гололеда и сильного ветра. Значения температур задают от +30 до –30 °С через каждые 10 °С.

4. Намечают пролеты, для которых надо рассчитать монтажные стрелы провеса.

5. Определяют для каждого из них стрелы провеса:

$$f = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{пр}}, \quad (2.37)$$

где l – длина пролета; $\sigma_{пр}$ – напряжение провода в приведенном пролете, полученное из уравнения состояния провода для различных температур.

6. Определяют тяжение провода:

$$T = \sigma_{пр} \cdot S. \quad (2.38)$$

Результаты расчетов сводят в монтажные таблицы, по которым строят монтажные кривые $f = \varphi(t)$ и $T = \varphi(t)$ (рис. 2.9).

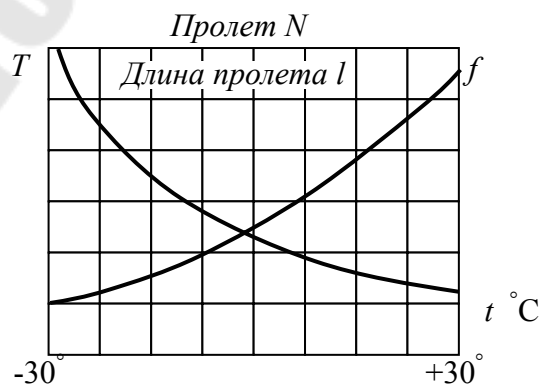


Рис. 2.9. Монтажные кривые

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1.1

Исходные данные для проектирования

Напряжение ВЛ, кВ	Число цепей	Материал опор	Сечение проводов, типа АС	Климатический район		Температура воздуха, °С			Переход через инженерные сооружения	Номер по порядку
				по ветру	по гололеду	Максимальная «+»	Минимальная «-»	среднегодовая «+»		
35	1	железобетонная	70/11	IV	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/3$	железная дорога	1
		металлическая	95/16	I	II				шоссейная дорога	2
		железобетонная	120/19	II	III				линия электропередачи	3
		металлическая	150/24	III	IV				линия связи	4
	2	железобетонная	70/11	III	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/2$	железная дорога	5
		металлическая	95/16	II	II				шоссейная дорога	6
		железобетонная	120/19	I	III				линия электропередачи	7
		металлическая	150/24	IV	IV				линия связи	8

Продолжение табл. П.1.1

Напряжение ВЛ, кВ	Число цепей	Материал опор	Сечение проводов, типа АС	Климатический район		Температура воздуха, °С			Переход через инженерные сооружения	Номер по порядку
				по ветру	по гололеду	Максимальная «+»	Минимальная «-»	среднегодовая «+»		
110	1	железобетонная	95/16	II	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/3$	железная дорога	9
		металлическая	120/19	I	II				шоссейная дорога	10
		железобетонная	150/24	IV	III				линия электропередачи	11
		металлическая	185/29	III	IV				линия связи	12
	2	железобетонная	95/16	I	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/2$	железная дорога	13
		металлическая	120/19	IV	II				шоссейная дорога	14
		железобетонная	150/24	III	III				линия электропередачи	15
		металлическая	185/29	II	IV				линия связи	16
220	1	железобетонная	240/32	IV	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/3$	железная дорога	17
		металлическая	300/39	III	II				шоссейная дорога	18
		железобетонная	330/43	II	III				линия электропередачи	19
		металлическая	400/51	I	IV				линия связи	20

Напряжение ВЛ, кВ	Число цепей	Материал опор	Сечение проводов, типа АС	Климатический район		Температура воздуха, °С			Переход через инженерные сооружения	Номер по порядку
				по ветру	по гололеду	Максимальная «+»	Минимальная «-»	среднегодовая «+»		
220	2	железобетонная	240/32	III	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/2$	железная дорога	21
		металлическая	300/39	II	II				шоссейная дорога	22
		железобетонная	330/43	I	III				линия электропередачи	23
		металлическая	400/51	IV	IV				линия связи	24
330	1	железобетонная	240/32	II	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/3$	железная дорога	25
		металлическая	300/39	I	II				шоссейная дорога	26
		железобетонная	400/51	IV	III				линия электропередачи	27
		металлическая	500/64	III	IV				линия связи	28
	2	железобетонная	240/32	I	I	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и} + n_{о})$	$2 \cdot (n_{\phi} + n_{и}) + \frac{n_{о}}{2}$	$n_{и}/2$	железная дорога	29
		металлическая	300/39	IV	II				шоссейная дорога	30
		железобетонная	400/51	III	III				линия электропередачи	31
		металлическая	500/64	II	IV				линия связи	32

Содержание

1. Требования к курсовой работе	3
1.1. Цель курсовой работы	3
1.2. Исходные положения	3
1.3. Содержание работы	4
2. Систематический расчет механической части линии	5
2.1. Выбор материала и типов опор	5
2.2. Определение удельных нагрузок	7
2.3. Определение критических пролетов	9
2.4. Систематический расчет проводов и тросов	13
2.5. Расчет проводов и тросов в аварийных режимах	16
2.6. Расстановка опор по профилю трассы	22
2.7. Расчет переходов через инженерные сооружения	29
2.8. Расчет монтажных стрел провеса	31
Приложение	33

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Селиверстов Георгий Иванович
Жуковец Светлана Григорьевна**

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛЭП

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 02
«Электроэнергетические системы и сети»
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. И. Жукова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 22.12.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,87.

Изд. №178.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.