

УДК 621.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПРОЛЁТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Хилевич Р.А.

Научный руководитель - ст. преподаватель Мышковец Е.В.

Для каждой марки провода существует предел прочности, превышение которого вызывает необратимые изменения его механических свойств. У проводов и тросов воздушных линий должен быть запас механической прочности. Действующие ТКП задают запас прочности в виде допустимых напряжений в проводах в процентах от предела прочности провода $\sigma_{кр}$. Для проводов воздушных линий электропередачи в качестве расчётных принимают три вида режимов:

- 1) режим 1 - режим низшей температуры σ_{-} при отсутствии внешних нагрузок;
- 2) режим 2 - режим наибольшей нагрузки $\sigma_{г}$, при котором температура равна температуре гололёдообразования;
- 3) режим 3 - среднегодовой температуры при отсутствии внешних нагрузок.

Вопрос о том, который из трёх режимов должен быть принят в качестве исходного состояния при заданном допуске напряжении, решается в зависимости от ряда факторов:

1. длины пролёта;
2. температуры;
3. нагрузки на провод;
4. величины допускаемого напряжения.

Однако после монтажа проводов напряжения в них не должны превышать соответствующих допустимых напряжений для режимов максимальной нагрузки, низшей и среднегодовой температур. Для того, чтобы понять, в каком случае больше будет сказываться влияние температуры, а в каком - влияние нагрузки, необходимо в уравнении состояния провода принять в качестве независимой переменной величину пролёта, а в качестве зависимой - величину напряжения и рассмотреть пределы изменения напряжения при изменении длины пролёта. Запишем уравнение состояния провода:

$$\sigma - \frac{\gamma^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0), \quad (1)$$

где σ - напряжение в проводе;

σ_0 - напряжение в низшей точке провода;

l - длина провода;

E - модуль продольной упругости;

α - температурный коэффициент линейного удлинения;

$(t - t_0)$ - разность температур.

Как независимая переменная, пролёт может изменяться до очень малой величины, то есть можно записать, что l^0 или до очень большой величины - l . Такая процедура делается условно, с целью выяснения характера и пределов изменения напряжения. Рассмотрим, как изменится уравнение состояния провода при условии l^0 . Когда длина пролёта, уменьшаясь, стремится к нулю, то стремятся к нулю те члены уравнения (1), которые имеют множитель l^2 и их влияние на величину напряжения будет практически неощутимо. В этом случае уравнение состояния примет вид:

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0). \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что чем меньше длина пролёта, тем меньше сказывается величина нагрузки, и напряжение будет зависеть от температуры рассчитываемого режима. В зависимости от величины температуры искомое напряжение σ может получиться больше или меньше исходного напряжения σ_0 .

Для того чтобы проследить влияние увеличения пролёта, необходимо разделить все члены уравнения состояния провода на l^2 . Тогда получим:

$$\frac{\sigma}{l^2} - \frac{\gamma^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma^2} = \frac{\sigma_0}{l^2} - \frac{\gamma_0^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_0^2} - \frac{\alpha \cdot E}{l^2} \cdot (t - t_0). \quad (3)$$

По мере увеличения длины пролёта, все члены, имеющие в знаменателе l^2 , будут уменьшаться, а при стремлении к бесконечности, обратятся в нули. При этом получится равенство:

$$\frac{\gamma^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma^2} = \frac{\gamma_0^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_0^2} \quad (4)$$

из которого, сократив одинаковые множители, получим:

$$\sigma = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cdot \sigma_0. \quad (5)$$

Приблизительно такой же результат будет и при конечной, но достаточно большой длине пролёта. В зависимости от величины нагрузки искомое напряжение σ может, как и в случае влияния температуры, получиться больше или меньше исходного напряжения σ_0 . На основании рассмотренных случаев можно сделать следующие выводы:

1) При малых пролётах на величину искомого напряжения оказывает влияние температура, а при больших - нагрузка;

2) Существует такая пограничная длина пролёта, при которой влияние температуры и нагрузки на величину напряжения будет одинаковым, то есть существует некоторый критический пролёт, в котором значения напряжений при наименьшей температуре и наибольшей нагрузке равны между собой $\sigma_- = \sigma_+$.

Такой пролёт называют вторым критическим пролётом.

Первый критический пролёт - это пролёт такой длины, при которой напряжение в проводе в режиме среднегодовой температуры равно допустимому при среднегодовой температуре σ_3 , а в режиме низшей температуры - допустимому напряжению при низшей температуре σ_- .

Третий критический пролёт - это пролёт, при котором напряжение в проводе при среднегодовой температуре достигает допустимого при среднегодовой температуре σ_3 , а в режиме максимальной нагрузки равно допустимому при максимальной нагрузке σ_+ .

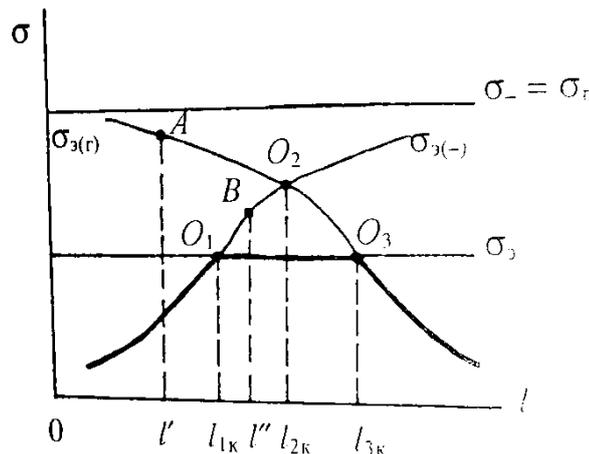


Рисунок 1а. Зависимость напряжения в проводе от длины пролёта при $l_{1к} < l_{2к} < l_{3к}$

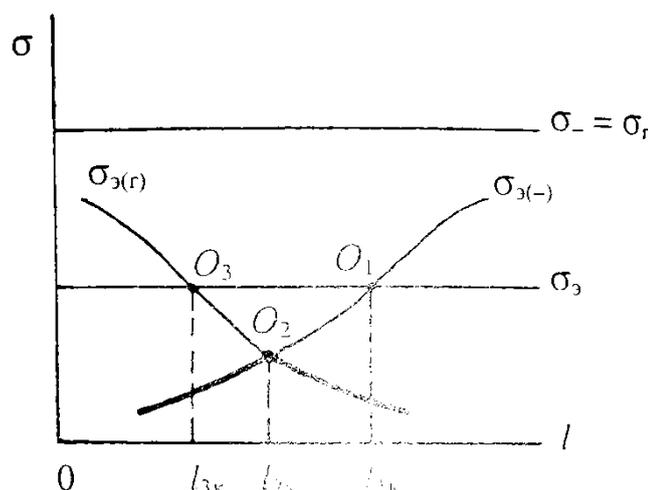


Рисунок 1б. Зависимость напряжения в проводе от длины пролёта при $l_{1к} > l_{2к} > l_{3к}$

В точке O_1 , соответствующей первому критическому пролёту $l_{1к}$, напряжения одновременно равны допустимым режимам среднегодовой температуры и низшей температуры, в точке O_2 при втором критическом пролёте $l_{2к}$ - в режимах низшей температуры и наибольшей нагрузки, в точке O_3 при третьем критическом пролёте - в режимах среднегодовой температуры и наибольшей нагрузки.

Наиболее часто имеют место следующие соотношения длин критических пролётов $l_{1к} < l_{2к} < l_{3к}$ (рис. 1а) и $l_{1к} > l_{2к} > l_{3к}$ (рис 1б).

Если для первого случая расчетный пролет лежит в пределах $0 < l < l_{1к}$, то за исходный следует принимать режим наименьшей температуры. В противном случае, если за исходный взять, например, режим наибольшей нагрузки, то при пролета l' напряжение при среднегодовой температуре превысит допустимое (точка А на рис 1а) при $l_{1к} < l < l_{3к}$ за исходный должен быть взят режим среднегодовой температуры, так как при других исходных режимах и длине пролета l'' напряжение в этом режиме может превысить допустимое (точка В). Соответственно при $l > l_{3к}$ в качестве исходного принимается режим наибольших нагрузок.

При втором соотношении длин критических пролётов в случае $l < l_{2к}$ исходным должен служить режим низшей температуры, а при $l > l_{2к}$ - режим наибольшей нагрузки.

Расчетные выражения, справедливые для любых проводов, получают, подставляя в уравнение (1) соответствующие режимам пары допускаемых напряжений и решая это уравнение относительно длины пролёта. Тогда формулы для определения критических пролётов при $\sigma_r = \sigma_- = \sigma_{max}$ имеют вид:

$$l_{1к} = \frac{2 \cdot \sigma_3}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot (\beta \cdot (\sigma_3 - \sigma_{max}) + \alpha \cdot E \cdot (t_3 - t_-))}{E \cdot (1 - (\sigma_3 / \sigma_{max})^2)}}; \quad (6)$$

$$l_{2к} = \frac{2 \cdot \sigma_{max}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha \cdot (t_3 - t_-)}{(\gamma_r / \gamma_1)^2 - 1}}; \quad (7)$$

$$l_{3к} = \frac{2 \cdot \sigma_{max}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot (\beta \cdot (\sigma_{max} - \sigma_3) + \alpha \cdot E \cdot (t_r - t_3))}{E \cdot ((\gamma_r / \gamma_1)^2 - (\sigma_{max} / \sigma_3)^2)}}; \quad (8)$$

где t_r, t_-, t_3 - соответственно температура в режиме максимальной нагрузки, низшей и среднегодовой температур;

γ_r - удельная нагрузка в режиме максимальной нагрузки.

Возможен еще один случай, когда кривые (рис. 1а, 1б) пересекаются на прямой σ_3 . При этом все критические пролеты равны $l_{1к} = l_{2к} = l_{3к}$. Тогда из формул (6).. (8) видно, что при заданных низшей и среднегодовой температурах для конкретного сечения провода (данной удельной нагрузки γ_1) длины критических пролетов будут зависеть только от величины максимальной нагрузки γ_r . Эта величина, при которой напряжения при всех расчетных условиях одинаковы, называется критической нагрузкой.

Рассмотрим пример.

Для строящейся воздушной линии 220 кВ на местности, характеризуемой следующими значениями температуры воздуха за длительный период наблюдения на метеорологической станции:

1. среднегодовая $t_{cr} = -2^\circ\text{C}$
2. гололедообразования $t_r = -5^\circ\text{C}$;
3. абсолютная наинизшая $t_- = -55^\circ\text{C}$,

найти значение температурного коэффициента линейного расширения провода, модуля упругости, допускаемые значения эквивалентного механического напряжения для трех характерных эксплуатационных состояний провода, соответствующих заданным температурам. Решить уравнения состояния провода для пролётов различной длины и построить графические зависимости изменения механического напряжения в проводе. Вычислить значения критических длин пролётов и выбрать определяющие климатические условия для расчета провода на прочность. Исходные данные и пояснения: Технические данные провода АС-240/32: сечение = 238мм², диаметр = 21,6мм. Значения температурного коэффициента линейного расширения провода, модуля упругости, а также допускаемые значения эквивалентного механического напряжения зависят от отношения площадей поперечных сечений алюминия и стали $m = 5,52$. Решение: Для провода АС-240/32 нормальной конструкции с отношением площадей поперечных сечений алюминия и стали $m = 5,52$ находим: $\alpha = 19,2 \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}^{-1}$; $E = 8,25 \cdot 10^3 \text{ даН/мм}^2$. Принимаем, что провод изготовлен из обычной твердотянутой электротехнической алюминиевой проволоки марки АТ, тогда находим значения допускаемого напряжения: $\sigma_{П6} = 13 \text{ даН/мм}^2$ в состоянии провода, когда действует наибольшая механическая нагрузка; $\sigma_- = 13 \text{ даН/мм}^2$ в состоянии провода, когда действует наинизшая температура воздуха; $\sigma_3 = 8,7 \text{ даН/мм}^2$ в состоянии провода, когда действует среднегодовая температура воздуха (среднеэксплуатационные условия работы провода). Каждое из этих значений не может быть превышено в процессе работы воздушной линии. Рассчитаем изменение значений среднеэксплуатационных напряжений σ_3 в проводе, которые будут возникать в пролётах различной длины, если требуется обеспечить сохранение допускаемых напряжений при условии возникновения наибольшей механической нагрузки или при установившейся наинизшей температуре окружающей среды. Для этого составим и решим уравнения состояния провода в двух вариантах. Искомое среднеэксплуатационное напряжение для варианта 1 обозначим индексом (1), для варианта 2-индексом (2).

Вариант 1: исходные условия - возникновение наибольшей механической нагрузки $\gamma_{нб}$; искомые условия - среднеэксплуатационные, тогда уравнение состояния примет вид:

$$\sigma_3 - \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_3^2} = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_r),$$

Полученное уравнение можно представить как неполное кубическое:

$$\sigma_3^3 - A \cdot \sigma_3^2 - B = 0,$$

$$\text{где } A = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_r),$$

$$B = \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l^2}{24}.$$

Неполные кубические уравнения можно решать любым из итерационных методов. Воспользуемся итерационным методом Ньютона, при этом напряжение на каждой последующей итерации запишется как:

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

где σ_k - напряжение на предыдущей итерации;
 $f'(\sigma_k)$ - производная по переменной σ на итерации k.

Тогда

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

Иследуем, как изменится напряжение в проводе в зависимости от изменения длины пролёта при возникновении наибольшей механической нагрузки. Как независимая переменная, пролёт изменяется до очень малой величины, то есть можно записать, что l стремится к 0 или до очень большой величины, поэтому на нулевой итерации удобно вычислить значение напряжения при l = 0 :

$$\sigma_3^{(1)} = \sigma_{нб} - \alpha \cdot E \cdot (t_{ср} - t_r) = 13 - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot (-2 - (-5)) = 12,52 \text{ даН/мм}^2.$$

Напряжение не исследуемом проводе будет изменяться до $l \rightarrow \infty$.

Используя формулу (5), получим:

$$\sigma_{3(k)}^{(1)} = \frac{\gamma}{\gamma_{нб}} \cdot \sigma_{нб} = \frac{0,0035}{0,0155} \cdot 13 = 2,94 \text{ даН/мм}^2,$$

то есть среднеэксплуатационное напряжение при условиях возникновения наибольшей нагрузки будет изменяться от начального значения $\sigma_3^{(1)} = 12,52$ до конечного значения $\sigma_{3(k)}^{(1)} = 2,94 \text{ даН/мм}^2$.

Получим зависимости коэффициентов A и B от длины пролёта l_1 :

$$A = \sigma_{нб} - \frac{\gamma_{нб}^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_{нб}^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{ср} - t_r) = 13 - \frac{(0,0155)^2 \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot l_1^2}{24 \cdot 13^2} - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot (-2 - (-5)) = 12,52 - 0,0005l_1^2;$$

$$B = \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l^2}{24} = \frac{(0,035)^2 \cdot 8,25 \cdot 10^3 l_1^2}{24} = 0,0042l_1^2,$$

Вычислим значения коэффициентов A и B, а также значения механических напряжений при длинах пролётов от 100 до 800 м, сопровождая расчет занесением результатов в табл.1.

Таблица 1. Результаты расчетов напряжений в проводе при условии возникновения наибольшей механической нагрузки, даН/мм

$l_i, \text{ м}$	A	B	σ_{30}	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}
1	2	3	4	5	6	7
100	7,52	42	12,52	9,89	8,58	8,19
200	-7,48	168	8,19	5,46	4,19	3,87
300	-32,48	378	3,87	3,31	3,25	3,25
400	-67,48	672	3,25	3,09	3,09	3,09
500	-112,48	1050	3,09	3,02	3,02	3,02
600	-167,48	1512	3,02	2,99	2,99	2,99
700	-232,48	2058	2,99	2,96	2,96	2,96
800	-307,48	2688	2,96	2,94	2,94	2,94

Вариант 2: исходные условия - при установившейся наинизшей температуре окружающей среды t_- ; искомые условия - среднеэксплуатационные, тогда уравнение состояния примет вид:

$$\sigma_3 - \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_3^2} = \sigma_- - \frac{\gamma_{н6}^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_-),$$

$$\text{где } A = \sigma_- - \frac{\gamma_-^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_-),$$

$$B = \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24}.$$

Исследуем, как изменится напряжение в проводе в зависимости от изменения длины пролёта при установившейся наинизшей температуре окружающей среды:

$$\sigma_3^{(2)} = \sigma_- - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_-) = 13 - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot (-2 - (-55)) = 4,6 \text{ даН/мм}^2, \text{ т. е. } < \sigma_3.$$

Используя формулу (5), получим:

$$\sigma_{3(k)}^{(2)} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1} \cdot \sigma_- = \frac{0,0035}{0,0035} \cdot 13 = 13 \text{ даН/мм}^2,$$

то есть среднеэксплуатационное напряжение при условиях установившейся наинизшей температуры будет изменяться от начального значения $\sigma_3^{(2)} = 4,6$ до конечного значения $\sigma_{3(k)}^{(2)} = 13 \text{ даН/мм}^2$.

Получим зависимости коэффициентов А и В от длины пролёта l_i :

$$A = \sigma_- - \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l_i^2}{24 \cdot \sigma_-^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_{cr} - t_-) = 13 - \frac{(0,0035)^2 \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot l_i^2}{24 \cdot 13^2} - 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 \cdot (-2 - (-55)) = 4,6 - 0,00002 l_i^2;$$

$$B = \frac{\gamma_1^2 \cdot E \cdot l^2}{24} = \frac{(0,035)^2 \cdot 8,25 \cdot 10^3 l_i^2}{24} = 0,0042 l_i^2,$$

Вычислим значения коэффициентов А и В, а также значений механических напряжений при длинах пролётов от 100 до 300 м, сопровождая расчет занесением результатов в табл. 2

$l_i, \text{ м}$	A	B	σ_{30}	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}
1	2	3	4	5	6	7
100	4,4	42	4,6	6,2	5,8	5,7
700	-5,2	2058	10,7	11,2	11,2	11,2
800	-8,2	2688	11,2	11,6	11,6	11,6

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения напряжения $\sigma = f(l_i)$ (табл. 1, столбец 7), (табл. 2, столбец 7) при заданном исходном значении 13 даН/мм². Значение допускаемого напряжения при среднеэксплуатационных условиях работы провода $\sigma_3 = 8,7$ даН/мм² никак не связано с длиной пролёта, поэтому на рис. 2 представлено прямой горизонтальной линией, соответствующей этому значению. Графические зависимости 1f (l_i) и 2f (l_i) пересекаются при $l_i = 130$ м. Прямая $\sigma_3 = 8,7$ даН/мм не пересекает ни одну из зависимостей.

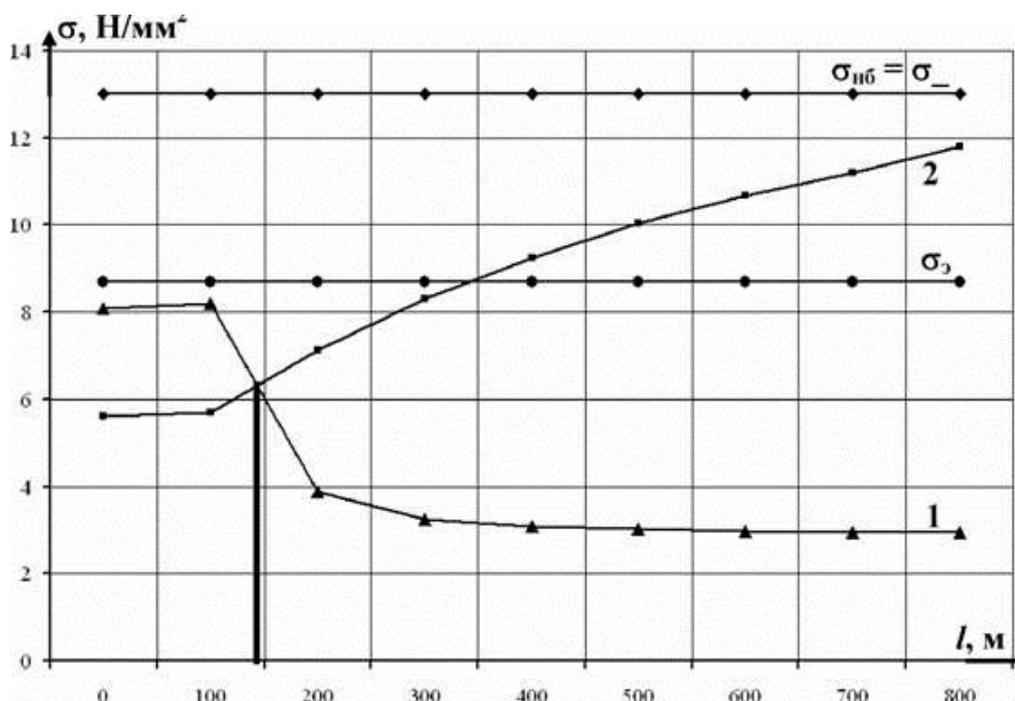


Рисунок 2. Изменение напряжения в проводе при среднеэксплуатационных условиях в зависимости от длины пролёта: 1- значения напряжения рассчитаны при исходных климатических условиях наибольшей механической нагрузки; 2 - то же, но исходные условия соответствуют установившейся наинизшей температуре окружающей среды установившейся наинизшей температуры окружающей среды, даН/мм.

Для вычисления первого критического пролёта необходимо сравнить \$l_k\$. Если имеет мнимое значение, так как в этом случае зависимость (кривая 2, рис. 2) не пересеклась бы с прямой и вычислять \$l_k\$ нет необходимости. В данном примере получено \$4,6 = 8,7\$ даН/мм, поэтому вычисляем \$l_k\$ по формуле (6):

$$l_{1к} = \frac{2 \cdot \sigma_-}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot (1 \cdot (\sigma_- - \sigma_з) + \alpha \cdot E \cdot (t_- - t_{сг}))}{E \cdot (1 - (\sigma_- / \sigma_з)^2)}} = \frac{2 \cdot 13}{0,0035} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot (1 \cdot (13 - 8,7) + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 (-55 - (-2)))}{8,25 \cdot 10^3 \cdot (1 - (13/8,7)^2)}} = 365м$$

Для вычисления третьего критического пролёта \$l_{3к}\$ необходимо сравнить \$\sigma_{з(k)}^{(1)}\$ с \$\sigma_з\$. Если \$\sigma_{з(k)}^{(2)} > \sigma_з\$, то \$l_{3к}\$ имеет мнимое значение, так как зависимость \$\sigma_з = f(l_i)\$ при принятых исходных условиях лежала бы выше прямой \$\sigma_з\$ и вычислять \$l_{3к}\$ не было бы необходимости. Если \$\sigma_{з(k)}^{(2)} < \sigma_з\$ и дополнительно \$\sigma_{з(k)}^{(2)} > \sigma_з\$, то третий критический пролёт существует и его длину \$l_{3к}\$ следует вычислить. В примере получено \$\sigma_{з(k)}^{(1)} = 2,94 < \sigma_з = 8,7\$ даН/мм\$^2\$ и \$\sigma_з^{(1)} = 12,52 > \sigma_з = 8,7\$ даН/мм\$^2\$, поэтому вычисляем \$l_{3к}\$ по формуле(8):

$$l_{3к} = \frac{2 \cdot \sigma_{нб}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot (\beta \cdot (\sigma_{нб} - \sigma_з) + \alpha \cdot E \cdot (t_r - t_{сг}))}{E \cdot ((\gamma_r / \gamma_1)^2 - (\sigma_{нб} / \sigma_з)^2)}} = \frac{2 \cdot 13}{0,0035} \sqrt{\frac{6 \cdot (1 \cdot (13 - 8,7) + 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8,25 \cdot 10^3 (-5 - (-2)))}{8,25 \cdot 10^3 \cdot ((0,0155/0,0035)^2 - (13/8,7)^2)}} = 94м.$$

Далее необходимо сравнить \$l_{1к}\$ и \$l_{3к}\$ между собой. Если \$l_{1к} > l_{3к}\$, то расчёт \$l_{2к}\$ необходим. В рассматриваемом примере получено \$l_{1к} = 365 > l_{3к} = 94м\$, поэтому рассчитываем \$l_{2к}\$ по формуле (7):

$$l_{2к} = \frac{2 \cdot \gamma_{нб}}{\gamma_1} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha \cdot (t_r - t_-)}{(\gamma_{нб}/\gamma_1)^2 - 1}} = \frac{2 \cdot 13}{0,0035} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot (-5 - (-55))}{(0,0155/0,0035)^2 - 1}} = 130,7 \text{ м.}$$

В результате расчетов примера было получено соотношение $l_{1к} = 365 > l = 94$ м, значит среднеэксплуатационный режим, как расчетный отсутствует, и «работающим» является второй критический пролет. Сравним вероятную длину с $l_{2к}$.

Вывод по примеру: сравнение длин пролётов показывает, что $l = 470 > l_{2к} = 130,7$ м, значит расчетным является режим наибольших нагрузок $\gamma_{нб}$ (кривая 1, рис. 2).

Литература

1. Короткевич, М.А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть / М.А. Короткевич. – Минск: Высшая школа, 2010. – 574 с.
2. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: Учебник. / Г.Е.Поспелов, В.Т.Федин, П.В.Лычёв. – Мн.: Технопринт, 2004. – 720 с.