

# Методика расчета проводов для горных ВЛ: старое по-новому

Ведущий специалист  
ООО «Аддисон»,  
Кустова О.В

## Аннотация

В процессе эксплуатации ВЛ провода и тросы испытывают различные климатические воздействия, вследствие чего все компоненты ВЛ оказываются в условиях постоянно меняющихся нагрузок.

Расчетные нагрузки на все элементы ВЛ зависят от напряжения в проводе в монтажном режиме. Отсюда, главной задачей проектировщика является составление монтажных таблиц, в которых приводятся значения напряжений и стрел провеса проводов и тросов для каждого анкерowanego участка ВЛ.

В 1976 г. Среднеазиатское отделение института «Энергосетьпроект» выпустило ВРЕМЕННЫЕ руководящие указания по расчету монтажных напряжений и стрел провеса проводов и тросов воздушных линий электропередачи с учетом остаточных деформаций (Инв. №3471тм). Эти указания не распространяются на участки ВЛ, проходящие в горной и сильно пересеченной местности, однако, они до сих пор являются единственным нормативным документом, на основании которого рассчитываются все строящиеся и реконструируемые ВЛ. В виду растущего интереса к горным районам Российской Федерации, в том числе с точки зрения электросетевого строительства, таким как Сочи и Крым, возникает необходимость разработки методики расчета проводов для горных воздушных линий с последующим выходом нормативных документов.

Во второй половине прошлого века многие инженеры обращали свое пристальное внимание на вопросы расчета проводов и тросов для горных воздушных линий. Соломон Иванович Шабуров освятил основные отличия в расчете проводов для горных участков ВЛ от участков, проходящих в равнинной местности, в своей книге «Специальные вопросы проектирования горных линий электропередачи». Также этим вопросом занимался Александр Александрович Глазунов. ГИП Северо-Западного отделения института «Энергосетьпроект» Николай Владимирович Соловьев посвятил написанию программы для расчета горных линий электропередачи остаток своих дней, но, к сожалению, так и не успел ее завершить.

Используя накопившийся материал, посвященный вопросу расчета проводов для горных линий электропередачи, разработана настоящая методика расчета проводов для горных линий.

## Особенности расчета проводов и тросов для горных линий электропередачи

В ходе строительства ВЛ монтажники натягивают провод, пользуясь значениями стрел провеса и напряжений из монтажных таблиц, соответствующими температурному режиму монтажа. Используя монтажные ролики, они обеспечивают равенство горизонтальных проекций напряжений в точках подвеса проводов.

После того как провод переключается из монтажных роликов в глухие зажимы, любое изменение погодных условий, в том числе изменение температуры, приводит к изменению напряжения в проводе. В идеальном случае, когда длины всех пролетов, принадлежащих одному анкерному участку, одинаковы, и точки крепления провода к гирляндам изоляторов располагаются на одной высоте, изменение напряжения вследствие изменения нагрузок или температуры происходит во всех пролетах на одинаковую величину. В связи с чем, гирлянды изоляторов остаются вертикальными. Участки ВЛ, проходящие по равнинной местности допускается также рассчитывать без учета перепада высот, используя понятие приведенного пролета.

Горные трассы ВЛ отличаются от равнинных значительным перепадом высот, а также невозможностью обеспечить равенство длин пролетов. Поэтому, рассматривая горные

ВЛ, нужно помнить о том, что любое, даже незначительное изменение погоды, может привести к существенной разности напряжений в соседних пролетах, и, как следствие, к отклонению гирлянд изоляторов вдоль оси ВЛ, что равнозначно изменению длин пролетов.

В виду выше сказанного, алгоритм расчета провода, представленный в настоящем докладе, включает в себя обязательную зависимость значения напряжения в проводе во всех расчетных режимах от выбранной температуры монтажа. Это утверждение становится очевидным, если рассмотреть случай изменения температуры сразу после монтажа.

Рассматривая анкерный участок ВЛ с уклоном  $40^\circ$ , состоящий из трех пролетов, длина каждого из которых 325м, 81м и 259м соответственно. Провод марки АС 330/43. Район по гололеду - 4, район по ветру – 2, минимальная температура -  $-40^\circ\text{C}$ .

В рассматриваемом примере провод монтируется при температуре  $+30^\circ\text{C}$ . В момент монтажа гирлянды изоляторов занимают вертикальное положение.

При изменении температуры до  $-30^\circ\text{C}$  гирлянды изоляторов отклоняются на величины  $\delta_1 = 11$  см,  $\delta_2 = 2$  см за положительное направление отклонения гирлянд изоляторов принято направление от опоры №1 в сторону опоры №4. При этом в расчете принято допущение, что вытяжка провода еще не произошла, поэтому в качестве механической характеристики используется только модуль начального нагружения (модуль неупругости).

В таблице 1 приведены результаты расчета монтажных напряжений и стрел провеса провода АС 330/43 в рассматриваемом примере по двум методам. Первый метод выполнен по ВРУ №3471тм, а второй метод – на основе уравнений провисания провода по цепной линии и с учетом зависимости напряжения в проводе во всех расчетных режимах от температуры монтажа.

При этом в первом методе используется приведенный пролет, равный 280,36 м.

Таблица 1. Сравнительная таблица результатов расчета монтажных напряжений и стрел провеса.

Расчетные	Температура монтажа, $^\circ\text{C}$							
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	С	С	С	С	
	С	С	С					
1-й метод (приближенный)	4	4	4	4	3	3	3	
	,	,	,	,	,	,	,	
	7	4	3	1	9	8	7	
	1	9	0	2	7	2	0	
	9	9	1	1	1	1	1	
	,	,	0	0	1	1	1	
	3	8	,	,	,	,	,	
9	4	2	7	1	5	9		
		8	2	4	5	5		
2-й метод (точный)	4	4	4	3	3	3	3	
	,	,	,	,	,	,	,	
	6	3	1	9	7	5	4	
	8	9	4	2	3	6	1	
	9	1	1	1	1	1	1	
	,	0	0	1	1	2	2	
	4	,	,	,	,	,	,	
5	0	6	2	8	4	9		
		8	9	9	6	3	8	

<sup>\*)</sup> В верхней строке приведены результаты расчета напряжений в проводе, кгс/мм<sup>2</sup>.

В нижней строке приведены результаты расчета стрел провеса провода в 1-м расчетном пролете, равном 325м.

Анализ результатов показывает, что при расчете провода по упрощенному методу, провод оказывается перетянутым в режиме максимальных нагрузок и тем значительнее, чем больше уклон профиля горной ВЛ. При этом, нагрузки на опоры принимаются заниженными, вследствие чего все конструктивные элементы ВЛ эксплуатируются на нагрузки, превышающие расчетные.

При расчете проводов для горных ВЛ, недопустимо использование приведенного пролета, так как понятие приведенного пролета справедливо только для случаев относительного равенства пролетов, составляющих анкерный участок, что, практически, невыполнимо при расстановке опор на профилях горных ВЛ.

Для более точного расчета проводов для горных ВЛ до сих пор рекомендуется использовать графоаналитический метод с последовательным приближением результатов /1/.

Принимая во внимание вычислительные мощности современных компьютерных технологий, использование упрощений, допускаемых при выполнении ручного расчета, становится нецелесообразным.

В связи с этим, методика расчета проводов для горных ВЛ, должна включать в себя все механические процессы, происходящие в проводе, начиная с момента монтажа до установления равновесия, когда гирлянды изоляторов отклоняются под действием разности напряжений в соседних пролетах, во всех расчетных режимах и во всех пролетах анкерного участка. Это условие достигается решением системы уравнений и использованием численных методов, заложенных в алгоритме решения данной системы.

### Уточненный алгоритм расчета проводов для горных ВЛ

При разработке алгоритма точного расчета проводов для горных ВЛ принимались во внимание следующие условия:

1. Напряжение в проводе во всех расчетных режимах зависит от температуры монтажа.
2. Все расчетные формулы должны быть использованы для условия провисания провода по форме цепной линии, т.е. длина провода в пролете определяется посредством гиперболической функции /2/.

При составлении системы, состоящей из условий, определяющих равновесное состояние провода, использовались следующие уравнения:

1. Уравнение, связывающее длину провода в момент монтажа, при заданной температуре монтажа, с длиной провода в режиме наибольшего напряжения. Решение о том, какой режим должен приниматься в качестве исходного, основывается на ряде проходов программы и сравнении напряжений с допускаемыми значениями.

$$L_M = \hat{L}(1 + \varepsilon_{\text{мех}} + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$L_M = \hat{L} \left[ 1 + \sigma_M \left[ \frac{1}{F} + K_p \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{F} \right) - \frac{\hat{\sigma}}{D} \right] - \alpha(\hat{t} - t_M) \right] \quad (2)$$

Обозначения, входящие в формулы (1) и (2), полностью совпадают с обозначениями из ВРУ №3471ТМ-Т2-14.

Длина провода в пролете определяется по гиперболической формуле, приведенной в /1/:

$$L = \sqrt{\frac{4\sigma^2}{\gamma^2} \sinh^2 \frac{\gamma l}{2\sigma} + h^2} \quad (3)$$

Приведенные уравнения составляются для всех пролетов, входящих в анкерный участок.

2. Уравнения, составленные для каждого пролета рассматриваемого анкерного участка, определяющие изменение длин пролетов, происходящее вследствие

отклонения гирлянд изоляторов. Величина отклонения гирлянды изоляторов выражается следующей формулой /1/:

$$\delta = \frac{\lambda(T_{i+1} - T_i)}{\sqrt{(G_n + g_r)^2 + (T_{i+1} - T_i)^2}} \quad (4)$$

В формуле (4)  $G_n$  – суммарное действие вертикальных составляющих тяжений в соседних пролетах.

Проекция тяжений находятся по формулам, разработанным инж. И.А. Лопатиным /1/.

Используя численные методы решения систем уравнений, для каждой температуры монтажа находится напряжение, при котором максимальное напряжение во всем анкерном участке приближается к допусковому напряжению, с погрешностью равной  $0.005 \text{ кгс/мм}^2$ .

После нахождения наибольшего напряжения, используя уравнение состояния провода /1/ по формуле (5), находятся напряжения во всех остальных расчетных режимах.

$$L_n = L_m[1 + \alpha(t_n - t_m) + \beta(\sigma_n - \sigma_m)] \quad (5)$$

В формуле (5) длина провода находится по формуле (3), в которой длина пролета равна длине измененного на величину отклонения гирлянд изоляторов пролета.

Используя уравнение цепной линии /1/ можно найти координаты любой точки провода в каждом режиме, необходимые для проверки габаритов. Уравнение цепной линии выражается формулой (6).

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \cosh \frac{x\gamma}{\sigma_0} \quad (6)$$

### Условия необходимой проверки

Расчет провода для горных ВЛ не ограничивается нахождением напряжений и стрел провеса. Существует ряд условий, при выполнении которых, расчет провода может считаться корректным.

В таблице 2 приведены условия проверки и необходимые мероприятия при невыполнении этих условий.

Таблица 2. Условия проверки расчета провода

№ п/п	Условие проверки	Расчетные формулы	Необходимые мероприятия в случае невыполнения условия
1.	Напряжение в точках подвеса провода не должно превосходить величину $1,05 [\sigma]$ .	$\sigma_A = \sigma_0 \cosh \frac{l_{зп}\gamma}{2\sigma_0}$ $\sigma_A \leq 1,05[\sigma]$	Понижение монтажного напряжения
2.	Угол отклонения гирлянд изоляторов в направлении оси ВЛ должен лежать в пределах $2^0$ .	$\frac{\delta}{\lambda} \leq \tan 2^0$	В зависимости от величины угла отклонения гирлянды может потребоваться изменить расстановку опор или подвесить компенсирующие грузы
3.	На подвесную гирлянду изоляторов не должно оказываться «вырывающих» усилий.	$G_n > 0$	Подвеска грузов или замена поддерживающей подвески на натяжную, или изменение расстановки опор

	Также для горных ВЛ большое значение имеет проверка на неравномерную нагрузку на провод в соседних пролетах (сброс гололеда в соседнем пролете)		
--	---	--	--

Кроме того, для горных ВЛ проводятся все те же проверки, что и для участков ВЛ, проходящих в равнинной местности, такие как, приближение гирлянд изоляторов к телу опоры под воздействием ветра, перегрузка в режиме, следующем сразу после монтажа.

### **Вывод**

Расчет провода для горных ВЛ не похож на расчет провода для ВЛ, проходящих в равнинной местности. В связи с этим необходимо в кратчайшие сроки совместными усилиями проектных институтов приступить к дополнениям существующего перечня НТД документацией, устанавливающей требования к расчету горных линий. Кроме того, принимая во внимание возможности современных вычислительных технологий, необходимо создать новый или в качестве дополнения к существующим расчетным комплексам программный продукт, позволяющий рассчитывать провода для горных линий электропередачи.

### **Литература:**

1. Глазунов А.А.. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Том первый. Работа и расчет проводов и тросов. – М.: Госэнергоиздат.
2. Меркин Д.Р.. Введение в механику гибкой нити. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы.

**ООО «Аддисон»**  
 194223, г. Санкт-Петербург,  
 ул. Курчатова, д. 14, оф. 509  
 Тел.: +7 (812) 292-89-13  
 E-mail: spb@addison-  
 engineering.net  
 www.addison-engineering.net