

Министерство энергетики и электрификации СССР  
Главинпроект  
Ордена Октябрьской революции ВЭИИ и НИИ  
Энергообъектпроект  
Среднеазиатское отделение

Временные руководящие указания  
по расчету монтажных напряжений  
и стрел провеса проводов и тросов  
воздушных линий электропередачи  
с учетом остаточных деформаций

Том II

Полонитальная записка

Инв. № 3471-тв-т2

Главный инженер

*И. С. Буряков* Буряков

Нач. технического отдела

*А. Турмет* А. Турмет

Зав. лабораторией горных  
линий электропередачи

*А. Косаман* А. Косаман

Руководитель группы

*А. Яковлев* А. Яковлев

Ташкент, 1976

Министерство энергетики и электрификации СССР  
Главинпроект  
Ордена Октябрьской революции ВЭПИ и НИИ  
Энергообъектпроект  
Среднеазиатское отделение

Временные руководящие указания  
по расчету монтажных напряжений  
и стрел провеса проводов и тросов  
воздушных линий электропередачи  
с учетом остаточных деформаций

Том II

Полонительная записка

Инв. № 3471-тв-т2

Главный инженер

*И. С. Буряков* Буряков

Нач. технического отдела

*А. Турмет* А. Турмет

Зав. лабораторией горных  
линий электропередачи

*А. Касымов* А. Касымов

Руководитель группы

*А. Яковлев* А. Яковлев

Ташкент, 1976

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
1. Введение	4
2. Нагрузочно-разгрузочная диаграмма в растяжении провода	8
3. Вывод расчетных формул	13
4. О максимальных деформациях по длине и ее интенсивности	18
5. Параметр $K_p$	22
6. Перегрузка провода	24
7. Анализ коэффициентов перетяжки и перегрузки проводов	30
ЛИТЕРАТУРА	38

## I. Введение

Метод механического расчета проводов и тросовых линий (далее "провода") воздушных линий электропередачи, применяемый в Советском Союзе, основан на предположении, что они обладают только упругими свойствами, благодаря которым имеет место прямая пропорциональность между напряжением в поперечном сечении провода и его относительным удлинением.

В действительности в процессе монтажа и эксплуатации проводов проявляются остаточные деформации, обусловленные:

- а) обмятием проводов при приложении продольных усилий,
- б) свойством неупругости металлов, проявляющаяся практически мгновенно д. нагрузке провода,
- в) свойством ползучести алюминия и других цветных металлов, которое приводит к остаточным удлинениям провода после длительного приложения растягивающей силы.

Вследствие остаточных деформаций напряжения в проводе уменьшаются, а углы провеса соответственно увеличиваются, по сравнению с рассчитанными лишь с учетом упругих деформаций, что нарушает габариты от проводов до земли и пересекаемых сооружений.

В Советском Союзе на ряде линий электропередачи, смонтированных без учета остаточных деформаций, выявлялись недостаточные габариты от проводов до земли, что потребовало перемонтажа проводов.

Аналогичные явления имели место за рубежом. В [1.9] отмечаются тяжелые последствия произошедшей в США аварии с прекращением электрооборудования 13 млн. потребителей из-за перекрытия проводов перегруженной магистральной линии с проводами переобъемленной линии, причиной которого являлась неучтенная деформация проводов.

Исследование ползучести проводов в лабораторных условиях и на реальных пролетах показывает, что этот процесс продолжается весьма длительное время, причем наиболее интенсивно он протекает сразу

после монтажа провода и тем быстрее, чем больше напряжение в проводе, заужая с течением времени по экспоненциальному закону. На основании зарубежных исследований группа О5 СИГРО [д.8], разработавшая метод определения остаточных деформаций проводов в процессе эксплуатации, считает, что эти деформации продолжают в течение всего срока службы линии электропередачи.

С целью компенсации остаточных деформаций проводов применяются различные мероприятия. В СССР осуществлялась перетяжка сталеалюминевых проводов при монтаже (уменьшение стрел провеса) в размере 10-12%, как рекомендовано в книге Глазунова А.А. "Основа механической части ВЛ", т.1, 1956 г. В последние годы эта величина принималась в размере 5-7%, как рекомендовалось в атласе рабочих чертежей ВЛ. В Великобритании [д.9] на ЛЭП сверхвысокого напряжения производилась перетяжка проводов на 8-15% и дополнительно предусматривался запас габарита величиной 0,6 - 0,9 м. Эффективным средством уменьшения остаточных деформаций на действующей линии является предварительная вытяжка проводов до их монтажа. Предварительная вытяжка производится путем приложения к проводу тяжения в течение определенного срока. В [д.11] отмечается положительный опыт предварительной вытяжки проводов распяленной фазы приложенном максимальном тяжении в течение трех суток.

В [д.10] описывается опыт предварительной вытяжки талевым, равным 133% от максимального с выдержкой времени в течение 30 мин.

Перечисленные меры не отвечают требованиям надежной эксплуатации ВЛ, так как они основаны на частном опыте в конкретных проводках в определенных условиях и в большинстве случаев соответствуют случайным величинам компенсации остаточных деформаций.

В течение ряда лет разрабатывались аналитические методы расчета пластических деформаций и соответствующие им способы монтажа проводов. Они основывались на экспериментальных исследованиях ползучести проводов различных конструкций в течение длительного времени.

В США [а.6] распространен опыт Болневильской энергосистемы, основанный на зависимости удлинений ползучести провода от времени вида

$$\epsilon = FT^{\pi} \quad (1)$$

где  $\epsilon$  - относительное удлинение провода,  
 $F$  - относительное удлинение за начальный отрезок времени,  
 $T$  - время,  
 $\pi$  - показатель степени.

Коэффициенты  $F$  и  $\pi$ , зависящие от конструкции и материала провода устанавливаются в результате лабораторных испытаний. Вычисленные удлинения учтены автором при корректировке стрел провеса на реальных линиях. Опыт США положен в основу рекомендательного СИГЭЭ метода определения остаточных деформаций проводов [а.8]. К аналогичной зависимости удлинений ползучести проводов от времени приводят исследования в ФРТ [а.12]

Предлагаются и другие зависимости, например [а.13] :

$$\epsilon = kH^m T^n, \quad (2)$$

отличающаяся от (1) дополнительным аргументом  $H$  - величиной тяжести. Зависимость (2) позволяет определять размеры деформаций в период раскатки провода, когда тяжесть ослаблена, и в последующие периоды после регулирования стрел провеса, когда тяжесть равно монтажной.

Достоинством аналитических методов определения остаточных деформаций является возможность прогнозирования их величины в течение всего срока службы линии, выработки способов монтажа, достаточно точно учитывающих размеры этих деформаций как в процессе монтажа, так и во время эксплуатации ВЛ.

Недостатком аналитических методов является необходимость иметь экспериментальные данные об остаточных деформациях проводов всех конструкций, получаемые в результате длительных испытаний. Авторами названных методов отмечается, что получение надежных экспериментальных

Ивв. № 347Итм-с2-7

данных требует длительности испытания образцов проводов от 2000 до 20000 часов.

В СССР аналитический метод учета остаточных деформаций проводов был впервые предложен Отделением дальних передач "Теплоэлектропроекти" при проектировании ВЛ 400 кВ Кузбассовская ГЭС - Москва.

Он основан на использовании понятия монтажного модуля упругости  $E_m$ , величина которого меньше установившегося модуля упругости провода  $E$ , и остаточного удлинения от ползучести  $\epsilon_s$ . Расчет приводит к некоторой перетяжке провода за счет сокращения длины провода в пролете на величину, соответствующую  $\epsilon_s$  и разности относительных удлинений, определяемых модулями  $E_m$  и  $E$ . Этот метод сыграл положительную роль, обеспечив требуемую точность монтажа проводов ВЛ 400 и 500 кВ с расщепленными фазами.

Настоящие руководящие указания основаны на дальнейшем усовершенствовании аналитического метода учета остаточных деформаций проводов. Только аналитический метод позволяет учесть большое разнообразие условий, определяющих величину таких деформаций: конструкцию и материал проводов, условия монтажа, величину пролета и расчетные климатические условия.

Метод заключается в следующем: рассчитываются монтажные напряжения и стрелы провеса в проводе каждого анкерного участка с таким расчетом, чтобы после деформаций провода за весь срок его работы стрелы провеса стали бы равными установившимся, т.е. соответствующими систематическому механическому расчету для данных условий.

При этом предполагается, что все провода в пределах анкерного участка монтируются по одинаковой технологической схеме, т.е. каждый провод до момента регулирования стрел провеса находится в одинаковом положении одно и то же время, благодаря чему последующая деформация проводов будет одинаковой.

В основу количественных рекомендаций настоящих руководящих указаний положены имеющиеся экспериментальные данные по деформациям

проводов в Советском Союзе и некоторые материалы из зарубежных исследований.

В связи с тем, что испытания проводов в СССР проводились на проводах ранее действовавшего ГОСТ 839-59, что при этом каждая ступень тяжения выдерживалась короткий период (10-30 дней), настоящие рекомендации являются временными и подлежат корректировке по мере накопления новых данных о поведении проводов с учетом длительного воздействия тяжений.

## 2. Нагрузочно-разгрузочная диаграмма растяжения провода.

Для вывода уравнений по расчету проводов с учетом остаточных деформаций используется диаграмма растяжения.

Экспериментальные исследования деформаций провода под воздействием растягивающей силы [1,2,3] показывают, что как нагрузочные так и разгрузочные характеристики диаграммы растяжения в системе координат  $\sigma - \epsilon$  (рис.1) близки к прямолинейным в пределах нормальных ПУЭ уровней напряжений в проводах.

Характеристика 0-1 представляет собой нагрузочную характеристику начального нагружения, получаемую при испытаниях, если на каждом уровне напряжения измерять удлинения провода без выдержки времени.

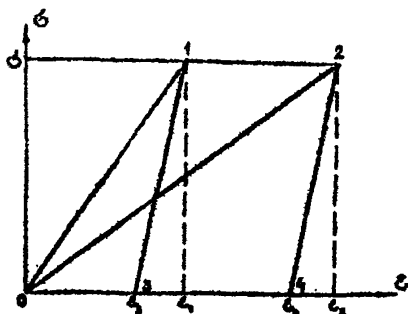


Рис. 1



Характеристика 0-2 представляет собой нагрузочную характеристику предельного растяжения, получаемую при испытаниях, если каждый новый уровень напряжения выдерживать очень длительное время, после чего измерять соответствующие удлинения провода.

Характеристики 1-3 и 2-4 являются разгрузочными характеристиками, получаемыми при снижении напряжения в проводе. Наиболее полно нагрузочно-разгрузочная диаграмма описана в [л.2].

Если провод быстро нагрузить до уровня  $\sigma$  то его удлинение будет соответствовать отрезку 0- $\epsilon_1$  (см. рис.1), после его разгрузки - отрезку 0- $\epsilon_2$ . Остаточное (необратимое) удлинение провода 0 -  $\epsilon_2$  вызывается неупругостью материала провода.

При длительном приложении напряжения величиной  $\sigma$  провод получит дополнительное удлинение, соответствующее отрезку 1-2, полное его удлинение будет соответствовать отрезку 0- $\epsilon_2$ , а после разгрузки - отрезку 0- $\epsilon_4$ . Дополнительное остаточное удлинение провода  $\epsilon_3 - \epsilon_4$  сверх неупругого вызывается ползучестью материала провода. Повторное повышение уровня напряжения в проводе в пределах от 0 до  $\sigma$  вызовет лишь упругое удлинение, соответствующее ветви диаграммы 3-1 и 4-2.

Если провод подвергать растяжению с различными выдержками времени на разных уровнях  $\sigma$  то диаграмма процесса будет иметь вид рис.2.

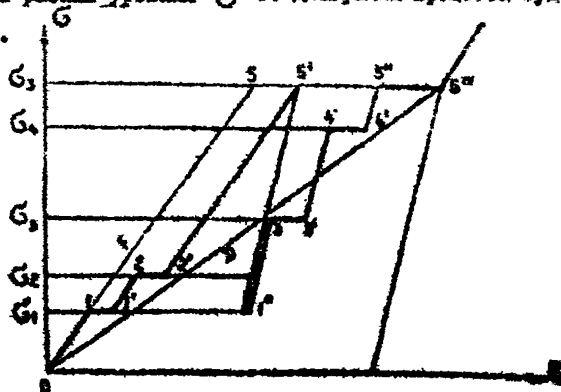


Рис.2

Приложим к проводу растягивающую силу, соответствующую напряжению  $\phi_1$ , тогда его удлинение будет соответствовать точке I; если далее сохранять неизменным напряжение  $\phi_1$ , в течение некоторого времени, удлинение проводов достигнет точки I'; поднимая напряжение до уровня  $\phi_2$ , получим удлинение в проводе, соответствующее точке Z, причем линия I'-Z параллельна характеристике начального нагружения 0-5; отрезок 2-2' - это удлинение за некоторое время действия напряжения  $\phi_2$ ; отрезок 2'-5' соответствует быстрому подъему уровня напряжения от  $\phi_2$  до  $\phi_3$ .

Если провод после этого разгрузить до уровня  $\phi_1$ , то его удлинение будет соответствовать точке I'', причем отрезок 5-I'' соответствует разгрузочной ветви диаграммы. При повторном нагружении, например, до уровня  $\phi_3$ , удлинение провода будет соответствовать точке Z разгрузочной характеристики, а при сохранении длительно напряжения  $\phi_3$ , дополнительное удлинение провода составит отрезок 3-3'.

При дальнейших повышениях нагрузки до уровня  $\phi_3$ , удлинения будут соответствовать точкам на разгрузочной ветви (отрезки 3'-4 и 4'-5''), а при длительной выдержке определенного напряжения удлинения будут выражаться горизонтальными отрезками (4-4', 5''-5'''). При дальнейшем быстром увеличении напряжения сверх  $\phi_3$ , провод снова будет удлиняться соответственно ветви начального нагружения.

На любом уровне  $\phi$  сумма горизонтальных отрезков представляет собой остаточные удлинения ползучести; она не может превышать горизонтального отрезка между ветвями начального и предельного растяжения.

Остаточные удлинения неупругости равны отрезку между прямой начального растяжения и разгрузочной ветвью, если пересечение этих прямых совмещено с уровнем наибольшего напряжения, которое испытал провод, а горизонтальные отрезки (удлинения ползучести) приравнены к нулю.

Таким образом, если неупругие удлинения проявляются практически мгновенно (так же, как и упругие), то удлинения ползучести проявляются медленно и, следовательно, зависят от длительности приложения нагрузки.

В первоначальных советских испытаниях [д.1] на образцах старых марок проводов было установлено, что основная часть удлинений ползучести реализуется в течение 4-5 суток. В исследованиях БИИЭ последних лет [д.3] окончание процесса вытяжки провода фиксировалось на время от 10 дней до 1 мес. после приложения данного напряжения. В зарубежных исследованиях [д.6,7,12] установлена закономерность величины вытяжки провода во времени, имеющая экспоненциальный характер, т.е. деформация ползучести предполагается возможной в течение десятков лет, но ее интенсивность резко уменьшается по мере увеличения времени приложения растягивающей силы.

Величина суммарных остаточных удлинений ( $0 - \epsilon$ , на рис.1) которую провод получит в процессе эксплуатации ВЛ, зависит от того, какое остаточное удлинение получил провод до момента его закрепления на опорах, а также от уровня напряжения, которое провод будет испытывать во время дальнейшей эксплуатации и от скорости провода, т.е. наклона характеристик  $0-1$ ,  $0-2$  и  $2-4$  на диаграмме  $\sigma - \epsilon$  (рис.1).

Эти факторы будут рассмотрены в §§ 4,5.

В дальнейшем для составления уравнений состояния провода необходимо иметь количественные характеристики нагрузочно-разгрузочной диаграммы. Наиболее удобными для расчета являются параметры, характеризующие наклон различных ветвей диаграммы, предложенные в [д.2].

Наклон разгрузочной ветви, как известно, характеризуется модулем упругости  $E$ . Аналогично, наклон нагруженных ветвей характеризуется параметрами, названными Ф.П.Магвезиным модулем неупругости  $F$  (для ветви начального нагружения) и модулем релаксации  $D$  (для ветви конечного нагружения). Так как эти термины не являются

обозначениями, в РУ приняты названия модулей: модуль начального и предельного растяжения. Прямое действие этих параметров является возможностью их аналитического определения для комбинированных проводов например, сталеалюминиевых в целом по модулям компонентов, на имея экспериментальных диаграмм растяжения провода, по формулам [1.2]:

$$E = \frac{E_c + k E_a}{1 + k} \quad (3)$$

$$F = \frac{F_c + k F_a}{1 + k} \quad (4)$$

$$D = \frac{D_c - k D_a}{1 + k}, \quad (5)$$

где индекс "с" и "а" относятся соответственно к модулям стальных и алюминиевых проводов.

k - отношение сечений алюминия и стали.

В настоящих РУ используются равенства (3)-(5), в которых значения параметров алюминиевых и стальных проводов приняты на основании имеющихся экспериментальных данных и равны согласно [1.2] и [1.14]:

$$E_c = 6,3 \cdot 10^3 \text{ кгс/мм}^2; \quad F_c = 5,4 \cdot 10^8 \text{ кгс/мм}^2;$$

$D_c = 4,0 \cdot 10^3 \text{ кгс/мм}^2$  - для алюминиевых проводов диаметром менее либо равных 2,5 - 3 мм;

$D_a = 3,6 \cdot 10^3 \text{ кгс/мм}^2$  - для алюминиевых проводов диаметром более 2,5 - 3 мм

(2,5 мм - в проводах по ГОСТ 839-74; 3 мм - в проводах по ГОСТ 839-59);

$$E_c = 20 \cdot 10^3 \text{ кгс/мм}^2; \quad F_c - D_c = 18,9 \cdot 10^8 \text{ кгс/мм}^2.$$

Вычисления по формулам (3)-(5) и средние значения модулей E, F, D приведены в таблице 1 РУ для проводов по ГОСТ 839-74 и

Иив. № 3471ги-т2-15

в табл.7 стр37 пояснительной записки для проводов по ГОСТ 109-59.

Модуль  $E$  в таблице I РУ скорректирован в соответствии с Решением № Э-12/75 ГТУЭЭ и директивным указанием института "Энергосеть-проект" № 26/1 от 2/IX-1975 г.

Описанная диаграмма растяжения не может служить основой для вывода уравнений состояния по расчету проводов с учетом остаточных деформаций в обычных гололедных районах, где допускается повышение максимального напряжения до 60% временного сопротивления и где необходимо учитывать искажение характеристик начального и последельного растяжения.

### 3. Вывод расчетных формул

Поскольку целью расчета является определение напряжений и отрез провеса провода при монтаже, то для вывода уравнения состояния необходимо связать два состояния провода: при монтаже, и при эксплуатации после полной реализации остаточных деформаций.

Для этого рассмотрим диаграмму рис.3

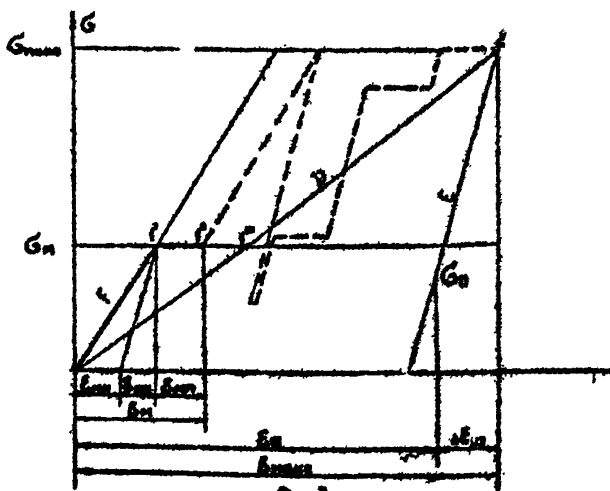


Рис.3

Допустим, нужно определить напряжения в проводе при монтаже учитывающее последующую деформацию провода. Расчетное напряжение определяемое по закону упругого удлинения по режиму наибольшего напряжения, известно и равно  $\hat{\sigma}_n$ .

Длина провода в состояниях "м" и "л" при одной и той же температуре связывается уравнением

$$L_m = L_n (1 + \epsilon_{мек})$$

где  $\epsilon_{мек}$  - разность относительных удлинений провода от механической силы в двух состояниях.

Однако, так как  $\hat{\sigma}_n = \hat{\sigma} - \Delta \hat{\sigma}_m$  (рис.3), т.е. оно может быть выражено только через наибольшее удлинение  $\hat{\epsilon}$  соответствующее режиму наибольшего напряжения (точка 2), то представляется возможным в уравнении состояния связывать режимы "м" и "л", не между собой, а с режимом максимума " $\hat{\sigma}$ " (точкой 2). Тогда напряжение в режиме "л" определяется по известному уравнению (а.5):

$$\hat{\sigma}_n = \frac{\gamma_n^2 l^2 E}{24 \hat{\sigma}_n^2} = \hat{\sigma} - \frac{\gamma^2 l^2 E}{24 \hat{\sigma}^2} - \alpha E (t_n - \bar{t}), \quad (6)$$

где знак " $\hat{\sigma}$ " обозначает величину режима наибольшего напряжения. В правой части уравнения (6) могут использоваться также величины одного из исходных режимов.

Напряжение же в режиме монтажа найдем на основании равенства (а.4)

$$L_m = \hat{L} (1 + \epsilon_{мек} + \epsilon_n), \quad (7)$$

$$\text{где } L_m = l + \frac{\gamma_n^2 l^3}{24 \hat{\sigma}_n^2},$$

$$\hat{L} = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24 \hat{\sigma}^2},$$

$\delta_n$  - удельная нагрузка провода при монтаже, кг/д.мм<sup>2</sup>;

$\bar{\delta}$  - то же, в режиме наибольшего напряжения;

$\ell$  - длина пролета, м;

$$e_{\text{мех}} = e_n - \bar{e}$$

$$e_n = \alpha(t_n - t)$$

Выразим относительные удлинения от механических сил через параметры диаграммы растяжения.

Из рис.3 следует:

$$\bar{e} = \frac{\bar{\sigma}}{D}$$

$$e_n = e_{\text{мн}} + e_{\text{мв}} + e_{\text{мг}}$$

Составляющая  $e_{\text{мн}}$  представляет собой неупругое удлинение (остаточное) на уровне напряжения  $\sigma_{\text{мн}}$ , составляющая  $e_{\text{мв}}$  - упругое удлинение при том же напряжении, их сумма равна

$$e_{\text{мн}} + e_{\text{мв}} = \frac{\sigma_{\text{мн}}}{F}$$

Составляющая  $e_{\text{мг}}$  - относительное удлинение получести, зависящее к моменту монтажа (регулирования отрез провеса), оно равно

$$e_{\text{мг}} = K_p \cdot e_n$$

где  $K_p$  - коэффициент реализации получести на момент монтажа;

Изм. № 3471тм-т2-16.

$\epsilon_n$  - полное удлинение полуволны на уровне  $\phi_m$ , которое равно отрезку  $I-I'$  (см. рис. 3).

Из рис. 3 следует, что

$$\epsilon_n = \frac{\phi_d}{D} - \frac{\phi_m}{F},$$

тогда

$$\phi_m = \phi_n K_p \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{F} \right)$$

Подставляя значения для прогиба и полученные значения удлинения в (7) и пренебрегая малыми величинами высшего порядка, получим

$$\frac{\delta_m^2 \ell^2}{24 \phi_m^2} = \frac{\bar{\delta}^2 \ell^2}{24 \bar{\phi}^2} + \phi_n \left[ \frac{1}{F} + K_p \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{F} \right) \right] \frac{\bar{\phi}}{D} + \alpha (t_m - \bar{t})$$

Умножив левую и правую часть на  $D$  и перегруппировав члены, будем иметь

$$\phi_n \left[ \frac{D}{F} + K_p \left( 1 - \frac{D}{F} \right) \right] - \frac{\delta_m^2 \ell^2 D}{24 \phi_m^2} = \bar{\phi} - \frac{\bar{\delta}^2 \ell^2 D}{24 \bar{\phi}^2} - \alpha D (t_m - \bar{t})$$

Обозначим

$$\Delta = \frac{D}{F} + K_p \left( 1 - \frac{D}{F} \right), \quad (8)$$

тогда окончательный вид уравнения будет:

$$\phi_m - \frac{\delta_m^2 \ell^2 D}{24 \phi_m^2 \Delta} = \frac{1}{\Delta} \left[ \bar{\phi} - \frac{\bar{\delta}^2 \ell^2 D}{24 \bar{\phi}^2} - \alpha D (t_m - \bar{t}) \right] \quad (9)$$



По уравнению (9) определяется напряжение в проводе при монтаже с учетом остаточных деформаций.

Аналогично может быть получено уравнение для нахлестки  $\phi_m$  по напряжению  $\phi_n$  установившегося режима после полной реализации остаточных деформаций провода. Оно имеет вид

$$\phi_m - \frac{\gamma_n^2 \ell^2 D}{24 \phi_m^2 \Delta} = \frac{1}{\Delta} \left[ \bar{\sigma} - \frac{D}{E} (\bar{\sigma} - \phi_n) - \frac{\gamma_n^2 \ell^2 D}{24 \phi_n^2} \right]. \quad (10)$$

В уравнении (10) отсутствует температурный член, так как температура в режимах "м" и "п" одна и та же.

Стрелы провеса провода рассчитываются по известным формулам в установившемся режиме после полной реализации остаточных удлинений провода

$$f_n = \frac{\gamma_n \ell^2}{8 \phi_n} \quad (11)$$

в режиме монтажа

$$f_m = \frac{\gamma_m \ell^2}{8 \phi_m} \quad (12)$$

Так как нагрузка провода в обоих режимах соответствует единственному весу, то

$$\gamma_n = \gamma_m = \gamma.$$

Обращается особое внимание на то, что в (9) и (10)  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\gamma}$ ,  $\bar{\epsilon}$  соответствуют режиму наибольшего напряжения, а не наоборот, и в зависимости от формы огибающей (см. рис. I 87) могут соответствовать

параметрам:

- а)  $\bar{\gamma} = \gamma_r, \bar{t} = t_r$  - режимы наибольшей нагрузки;  
 б)  $\bar{\gamma} = \gamma_1, \bar{t} = t_1$  - режимы наименьшей температуры

Балод уравнений состояния для расчета напряжений с учетом остаточных деформаций и их вид могут быть выполнены другим способом, предложенным Ф.П.Матвеевым [д.15]. Вместо безразмерного коэффициента  $\Delta$  Ф.П.Матвеевым предлагается использовать параметр "монтажный модуль"  $F_m$ , определяемый по формуле

$$F_m = \frac{FD}{K_p F + (1 - K_p) D}$$

Как нетрудно убедиться, коэффициент  $\Delta$  и "монтажный модуль"  $F_m$  связаны между собой соотношением  $F_m \Delta = D$ . С помощью этого соотношения предлагаемые в настоящей РУ уравнения состояния могут быть приведены к виду в [д.15] и наоборот. В РУ отдало предпочтение уравнениям с безразмерным коэффициентом  $\Delta$ , позволяющим отказаться от введения еще одного модуля и более приемлемым для расчетов в случае необходимости использования разных значений коэффициента реализации ползучести для различных условий монтажа.

#### 4. О максимальных деформациях ползучести и ее интенсивности.

Все остаточное удлинение, которое провод получит во время эксплуатации, зависит от наклона характеристики растяжения, т.е. от параметров  $E, F, D$ .

Эти параметры в свою очередь зависят от технологии производства проводов, конструкции проводов, шага скрутки, технологии производства проводов [д.8].

Многочисленные испытания проводов в СССР [д.3] позволяют считать характеристики  $E$  и  $F$  достаточно стабильными и принимать их значение однозначными.

Изм. № 3471тм-т2-19

Модуль упругости  $E$  определяется в процессе исследования зависимости  $\epsilon$  от  $\sigma$  на проводе, ранее подвергнутом действию напряжения, большего чем  $\sigma_1$ , т.е. на его разгрузочной характеристике.

Модуль начального растяжения  $F$  также может быть определен при испытаниях путем быстрого приложения растягивающей силы.

Модуль предельного растяжения  $D$  определить наиболее сложно, так как он зависит от длительности приложения нагрузки каждой ступени при испытаниях.

Если  $D$  находить из соотношения (рис. I).

$$D = \frac{\sigma_1}{\sigma_2},$$

то представляется возможным сравнить данные различных испытаний.

По данным СЭО Энергосетьпроекта (изм. № 1043тм-т1), основывающихся на результатах испытаний Л.В.Торосова [д.1], параметр  $D$  (см. таблицу I) имеет наибольшее значение по сравнению с данными других носов дозаций, что легко объяснимо, если принять во внимание, что в этих испытаниях ползучесть считалась законченной через 4-5 суток.

По данным [д.2] и [д.3] деформация ползучести принималась законченной через месяц для алюминиевых проводов, через 2 недели для стале-алюминиевых марок АС, АСО и через 10 дней - для марки АСУС.

По рекомендации СИГРЭ [д.8] максимальная величина ползучести выбирается в зависимости от предполагаемого срока службы линии из специальных кривых и таблиц. В таблицу I включены данные 10-летней ползучести, взятой из [д. 6,7]

Марка провода	Параметр $D$ по данным			
	[д.1]	[д.2]	[д.3]	[д.4,7]
A	$3,86 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$(2,9+3,6) \cdot 10^{3\text{ж}}$	$(1,75+2,65) \cdot 10^3 \text{жк}$
АСО	$5,54 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	$(5,4+5,5) \cdot 10^3 \text{ж}$	$(3,75+4,21) \cdot 10^3 \text{жк}$
АС	$6,32 \cdot 10^3$	$(5,8+6,0) \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^3 \text{ж}$	$(3,74+5,09) \cdot 10^3 \text{жк}$
АСУ	$7,04 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$	$6,66 \cdot 10^3 \text{ж}$	
Стальные тросы	$18,5 \cdot 10^3$	$18,9 \cdot 10^3$	-	-

ж) провода А-50+ А-185, АСО-300+АСО-400, АС-240+АС-300, АСУ-400.

жк) алюминиевая проволока диаметром 0,188", провод типа АСР -795-ММ (однотипный к АСО-400), провод сталеалюминиевый калибра № 8 (АС-8).

Для окончательного решения вопроса о численном значении параметра  $D$  который следует принимать при расчете стрел провода необходимо принять во внимание нижеследующее.

Принятое для расчетов напряжения в проводе уравнение (9) используется в качестве отправной точки предельную деформацию ползучести в точке 2 (рис.1), соответствующую максимально возможной деформации ползучести в процессе эксплуатации на уровне максимального напряжения.

Но так как климатические условия, вызывающие максимальное напряжение на реальных линиях, не могут существовать весь период эксплуатации, то на уровне  $\sigma$  может реализоваться лишь часть деформации ползучести, соответствующая времени существования максимального напряжения.

В остальное время работы линии будет проявляться деформация ползучести, соответствующая длительности приложения более низких уровней напряжения. Анализ показывает, что эта деформация при среднегодовой температуре за 10-летний период близка к значению при максимальном напряжении за период в несколько месяцев.

Из этого следует, что принятая в качестве расчетных значения параметра  $D$  из таблицы I для советских испытаний, размеры деформации ползучести по крайней мере не будут завышенными, так как время существования максимальных нагрузок не менее продолжительности периода приложения максимального напряжения при испытаниях.

Вопрос о том, не является ли деформация ползучести, получаемая по рекомендуемым значениям параметра  $D$ , заниженной требует дополнительных исследований.

Выполненные расчеты ( § 7) показывают, что для большинства условий сооружаемых в СССР ВЛ (около 76% случаев) уменьшение стрел провеса при монтаже составит 3-15%, а в остальных случаях - еще больше. Это в среднем несколько выше существующей в настоящее время практики. Поэтому в настоящее время нет оснований принимать в расчет большие размеры остаточных деформаций, чем рекомендуемые.

Как показывают исследования ВНИИЗ, размеры деформаций ползучести проводов зависят также от диаметров алюминиевых проводов, используемых для их изготовления, причем меньшим диаметрам соответствуют меньшие значения деформаций (соответственно большие значения модулей  $D$  при тех же значениях модулей  $F$ ). Для оценки этого влияния были использованы как действительные характеристики растяжения, так и аналитические зависимости [а.14] относительных удлинений проводов различных марок от диаметров алюминиевых проводов. Как показывают расчеты, выполненные в соответствии с рекомендациями ВНИИЗ [а.14] для проводов с малыми диаметрами алюминиевых проводов ( $\leq 2,5$ -мм) модуль  $D$  должен быть увеличен по сравнению со значениями, рекомендуемыми в [а.2].

С учетом указанных замечаний рекомендуемые значения параметра для проводов по ГОСТ 889-74 приведены в таблице I РУ, в которой провода, выполненные с использованием алюминиевых проводов диаметром до 2,5 мм и более 2,5 мм имеют различные значения модуля  $D$ . Аналогичные

параметры проводов по ГОСТ 839-59, п. введения в т. 3д.7 настоящей записки, различаются значением модуля  $D$  при диаметре алюминиевых проволок до и с. д.с. 3 мм.

### 5. Параметр $K_p$

Величина реализованной части деформаций ползучести на момент монтажа провода зависит от величины напряжения и времени и от приложения за период раскатки, установки соединителей, регулировка стрел провода. Суммарное время монтажа провода в анкерном участке может колебаться от нескольких часов до нескольких суток. Иногда этот период продолжается неделями.

Коэффициент реализации ползучести — это отношение реализованной части удлинения ползучести на момент монтажа  $\epsilon_{\text{ре}}$  к полному удлинению на уровне монтажного напряжения (рис.3). Следовательно,  $K_p$  при одной и той же длительности монтажных операций не будет зависеть от уровня монтажного напряжения  $\sigma_m$ .

Для оценки соответствия величины  $K_p$  определенному периоду приложения данного напряжения во время монтажа, воспользуемся зависимостью из [1.6]:

$$\epsilon_{\tau} = \epsilon_{1\text{час}} \cdot \tau^n, \quad (13)$$

где  $\epsilon_{\tau}$  — относительное удлинение ползучести за время  $\tau$ ,

$\epsilon_{1\text{час}}$  — то же, за первый час работы провода,

$n$  — показатель степени, принимаемый ориентировочно для стале-алюминевых проводов 0,18 (по данным [1.6]).

Коэффициент  $K_p$  может быть представлен зависимостью

$$K_p = \frac{\epsilon_{\tau}}{\epsilon_T},$$

где  $T$  — период, в течение которого деформация ползучести реализуется полностью

Тогда с учетом (13) получим:

$$K_p = \frac{C_{\text{нвс}} \tau^n}{C_{\text{вс}} T^n} = \left( \frac{\tau}{T} \right)^n \quad (14)$$

Параметр  $D$  в таблице I РУ соответствует времени  $T = 700$  часов. Вычислим по (14)  $K_p$  при разных значениях  $\tau$  принимая  $T = 700$ , а  $n = 0,18$ . Получим следующие значения:

$\tau$ часов	1	10	24	100	400	700
$K_p$	0,3	0,46	0,54	0,7	0,9	1,0

Заниженное значение коэффициента  $K_p$ , принимаемое в расчетах по уравнению (9) приводит к некоторой перетяжке провода по сравнению с предлагаемой, заниженное же значение коэффициента  $K_p$  приведет к избыточной слабине, что связано с некоторой нехваткой габарита от провода до земли. Поэтому рекомендуется из осторожности брать несколько заниженные значения  $K_p$ .

Были выполнены расчеты монтажных стрел провода для нескольких марок проводов при  $K_p$  равных 0,3 и 0,5. При  $K_p = 0,5$  уедличение стрел провода по сравнению с  $K_p = 0,3$  составляет для проводов малых сечений (до АС-150) 0-2,8%, для проводов больших сечений 0-3,7%.

В связи со слабым влиянием изменения  $K_p$  в небольших пределах на результаты расчетов, что было показано и в [1.4], рекомендуется при проектировании принимать для всех марок проводов  $K_p = 0,3$ .

Таким образом, при расчете монтажных стрел провода по настоящей РУ, предполагается, что процесс монтажа производится по единой технологической схеме для всех ВЛ: провод разматывается по монтажным ролям, далее регулируется тугине или стрела провода рассчитанные с учетом последующей вытяжки, после чего производится окончательное закрепление провода в зажимах.

Предполагается, что длительность монтажных операций с проводом от

момента раскати его по монтажным ролям до закрепления в зажимах находится в пределах до одной - двух суток. Предварительная вытяжка провода под большим давлением, чем монтажное, как это иногда практикувалось монтажными организациями, не требуется.

Если монтаж проводов производится по специальной технологической схеме, отличной от указанной, то следует рассчитывать монтажные нагрузки и стрелы провеса, принимая другое значение коэффициента  $K_p$ .

В частности, если провод находится под напряжением близким к монтажному длительно, например неделю или месяц, коэффициент  $K_p$  необходимо принимать равным соответственно 0,6 и 0,8.

#### 6. Перегрузка провода

Под перегрузкой провода в одном из исходных режимов понимается превышение напряжения в проводе над допустимым в этом режиме, когда к проводу, смонтированному с монтажным напряжением  $\sigma_m$ , непосредственно после монтажа приложить сочетание условий, соответствующее этому исходному режиму:

Перегрузка определяется в следующих режимах:

1.  $\gamma_r; t_r$  - в режиме наибольшей нагрузки;
2.  $\gamma_1; t_1$  - в режиме наибольшей температуры;
3.  $\delta_1; t_3$  - в режиме среднегодовой температуры.

Если напряжение в проводе в условиях перегрузки увеличивается по сравнению с монтажным, то провод работает по характеристике  $F(\sigma_m, \sigma_{a1})$ , если уменьшается - по характеристике  $E(\sigma_{a2})$  (рис.4).



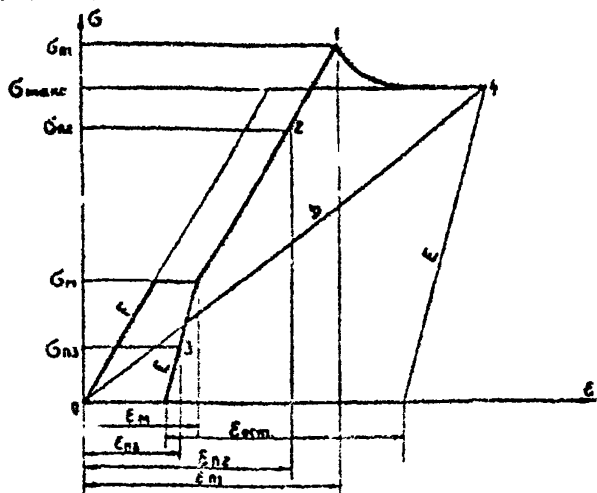


Рис. 4

При работе провуда по характеристике  $F$  он будет получать механические удлинения, которые определяются по формуле:

$$\varepsilon_{\text{мех}} = \varepsilon_n - \varepsilon_m = \frac{G_n - G_m}{F}$$

При работе провуда по характеристике  $E$  механические удлинения будут определяться по формуле:

$$\varepsilon_{\text{мех}} = \varepsilon_n - \varepsilon_m = \frac{G_n - G_m}{E}$$

Из равенства  $L_n = L_m(1 + \varepsilon_{\text{мех}} + \varepsilon_t)$  после соответствующих подстановок получим уравнение для расчете напряжений в режимах перегрузки.

$$G_n - \frac{\gamma_n^2 \rho^2 F}{24G_n^2} = G_m - \frac{\gamma_m^2 \rho^2 F}{24G_m^2} - \alpha F(t_n - t_m), \quad (15)$$

$$\sigma_n - \frac{\gamma_n^2 \rho^2 E}{24 \sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{\gamma_m^2 \rho^2 E}{24 \sigma_m^2} - \alpha E (t_n - t_m), \quad (16)$$

где  $\sigma_n, \gamma_n, t_n$  - параметры рассматриваемого режима перегрузки

Критерием правильного применения уравнения (15) и (16) является величина полученного значения  $\sigma_n$  - рассчитанная по у-нию (15) должна быть  $\sigma_n > \sigma_m$ , а по (16)  $\sigma_n < \sigma_m$ .

Исходя из этого критерия, напряжение перегрузки  $\sigma_{ар}$  в режиме наибольшей нагрузки необходимо определять по уравнению (15) и в тех случаях, когда полученное значение  $\sigma_{ар}$  окажется меньше  $\sigma_m$ , его необходимо пересчитать по уравнению (16);

Напряжение перегрузки  $\sigma_n$  в режиме наименьшей температуры определяется только по уравнению (15);

напряжение перегрузки в режиме среднегодовой температур  $\sigma_{ср}$  определяется по уравнению (15), если  $t_s < t_m$ , и по (16), если  $t_s > t_m$ . В случае, если  $t_s = t_m$ , то  $\sigma_{ср} = \sigma_m$ .

Напряжения перегрузки, как показано ниже (см. § 7), имеют наименьшие значения для наибольшей температуры монтажа. Поэтому в РУ с целью сокращения числа расчетов рекомендовано для большинства случаев определять напряжения и коэффициенты перегрузки только для наибольшей температуры монтажа, используя уравнение (15).

Как видно из (15) и (16)  $\sigma_n$  зависит лишь от величины монтажного напряжения и не зависит от коэффициента реализации прочности на момент монтажа, т.к. этот коэффициент учитывается в величине монтажного напряжения  $\sigma_m$ .

Перегрузка провода в режимах гололеда с ветром и наименьшей температуры уменьшает коэффициент запаса прочности самих проводов и вызывает спор.

Перегрузка в режиме среднегодовой температуры связана с увеличенной усталостью провода и возможностью повреждений от вибрации.

Расчеты проводов по ГОСТ 839-59 с допускаемыми напряжениями по ПУЭ-66 <sup>показывают (17)</sup>, что перегрузка сталеалюминевых проводов достигает величины 22,6%. Расчеты же проводов по ГОСТ 839-74 с допускаемыми напряжениями согласно Решению № Э-12/75 дали коэффициенты перегрузки до 27,2%.

Из рис.4 кривая I-4 показывает характер изменения напряжения перегрузки во времени.

Перегрузка исчезнет, как только провод получит полное остаточное удлинение  $\epsilon_{ост}$  (рис.4).

Стальные тросы не имеют удлинений ползучести, но обладают неупругостью. Неупругость, как было указано ранее, реализуется мгновенно по мере увеличения напряжения и, таким образом, при изменении атмосферных условий до проявления наибольшей нагрузки или какой-либо температуры, напряжение в тросе либо будет равно установленному либо близким к нему, т.е. перегрузки в этих режимах не будет. Некоторая перегрузка в тросе была бы возможна в режиме среднегодовой температуры, но при проектировании ВЛ тросы применяются со сниженными максимальными напряжениями, что обусловлено стремлением иметь запас прочности в них более 2-х и обеспечить минимальный вес опор. Следовательно, и в этом режиме перегрузки троса не будет.

Для выбора допустимых величин перегрузки следует учесть два фактора: 1) какова продолжительность периода перегрузки; 2) каковы запасы прочности в проводах и опорах в период перегрузки.

Расчеты показывают, что максимальный размер перегрузки будет обрывать в течении нескольких часов, после чего перегрузка уменьшится примерно в 1,5 раза, а через 1-2 суток - примерно в 2 раза по сравнению с первоначальной.

На кратковременный период максимальной перегрузки позволительно использовать имеющиеся запасы прочности в проводах и опорах.

Так как провода имеют запас прочности не менее 2, то для них

перегрузки в максимально-возможных размерах изоплана. В опорах имеется запас, соответствующий коэффициенту перегрузки при определенных расчетных нагрузках на опоры, который для талканя в проводе равен  $1,3+1,4$ .

При использовании опор действующей унификации безопасна величина перегрузки в пределах до 25% при напряжениях в проводах, принятых согласно ПУЭ-66. Такая перегрузка тем более, допустима, если учесть, что а) в течение десятков часов эта перегрузка резко снижается, и б) малую вероятность того, что сразу после монтажа наступят климатические условия, вызывающие максимальное напряжение.

Некоторую опасность представляет перегрузка провода в режиме среднегодовой температуры. Так как этот режим может существовать длительно, то имеется некоторая вероятность повреждения проводов от вибрации при направленных перегрузках, превышающих  $0,3 \text{ С}_{\text{н}}$ . По согласованию с НИИИ (протокол от 24 июля 1976 г.), вплоть до проведения проверки уровня вибрации проводов при величине напряжения при среднегодовой температуре до 37% ( $1,25 \cdot 0,3 \cdot 100$ ) от временного сопротивления, перегрузка при среднегодовой температуре ограничивается величиной 15% от нормированных величин.

На основании изложенного в ПУ рекомендуется ограничивать перегрузку провода в режимах наибольшей нагрузки и наименьшей температуры величиной 25%, а в режиме среднегодовой температуры - величиной 15% от нормированных величин напряжений в соответствующих режимах.

Естественно, снижая монтажное напряжение и, следовательно, допустимых напряжений перегрузки, в процессе эксплуатации может оказаться, что установившаяся стрела провеса превысит рассчитанную в систематическом механическом расчете провода. Однако, вероятность таких случаев весьма мала, так как во-первых по данным § 7 число таких случаев составляет всего 9-16%, во-вторых, вероятность совпадения во времени условий режима перегрузки с условиями, наступившими непосредственно после монтажа провода, также мала.

Напряжение перегрузки провода определялось исходя из того, что монтаж производился при температуре  $+30^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, и сниженное монтажное напряжение необходимо найти при этой температуре. Для этого достаточно использовать уравнение состояния, в котором используется модуль неупругости  $F$ , так как именно по такому уравнению определялось напряжение перегрузки. То - есть, используется уравнение (15), в котором неизвестным является напряжение  $\sigma_{м}$ , а  $\sigma_{п}$  известно и равно допускаемому напряжению пер.грузки ( $1,25 \sigma_{п}$ , или  $1,25 \sigma_{п}$ , или  $1,15 \sigma_{п}$ ).

Для определения сниженного монтажного напряжения при других температурах можно поступить двояко. 1) Следует также, как и для наибольшей температуры ( $30^{\circ}$ ), найти напряжения перегрузки и в случае их превышения над установленными значениями, произвести снижение соответствующего монтажного напряжения.

Причем, для этих расчетов используется уравнение (15), если напряжение перегрузки выше монтажного напряжения, или уравнение (16), если напряжение перегрузки ниже монтажного (последнее, в основном, для случая перегрузки в режиме среднегодовой температуры).

Напряжение перегрузки достаточно рассчитывать только в том режиме перегрузки, в котором это напряжение было наибольшим при температуре монтажа  $+30^{\circ}$ , что подтверждается выполненными расчетами.

2) Новые величины напряжения перегрузки не определяются, а сниженные монтажные напряжения находятся по ранее вычисленной величине сниженного монтажного напряжения при  $t_{м} = 30^{\circ}$ . В этом способе сниженное напряжение получается меньшим, чем требуется в действительности по I-му способу, так как она обусловлена максимальным размером перегрузки.

Пересчет сниженного монтажного напряжения по второму способу производится с помощью уравнения состояния:

$$\sigma_{\text{м.м.н}(t)} = \frac{\gamma^2 \ell^2 D}{24 \sigma_{\text{м.м.н}(t)}^2 \Delta} = \sigma_{\text{м.м.н}(t_0)} \frac{\gamma^2 \ell^2 D}{24 \sigma_{\text{м.м.н}(t_0)}^2 \Delta} = \alpha \frac{D}{\Delta} (t_0 - t), \quad (17)$$

в котором обозначено

$\sigma_{\text{м.м.н}(t)}$  — величина монтажного напряжения при температуре монтажа  $t$ ,  
 $\sigma_{\text{м.м.н}(t_0)}$  — сниженное монтажное напряжение при температуре монтажа  $t_0$ ,  
 найденное по (15) при сниженном напряжении перегрузки.

Уравнение (17) соответствует условию попадания всех монтажных напряжений на одну характеристику растяжения, проходящую через начало координат и имеющей наклон, соответствующий принятому коэффициенту релаксации деформация ползучести ( $K_p = 0,3$ ).

В РУ принят в качестве основного первый способ снижения, как более соответствующий физическому смыслу — при каждой температуре монтажа возможна своя величина максимальной перегрузки.

Однако, допускается использовать и второй способ, дающий несколько меньшие напряжения.

#### § 7. Анализ размеров перестанки и перегрузки проводов в тросов

Для наиболее общей оценки возможных величин уменьшения стрел провеса и перегрузки проводов на ЭВМ БЭСМ-4М были выполнены расчеты напряжений, а также коэффициентов уменьшения стрел провеса и коэффициентов перегрузки для возможно большего числа типов опор и проводов. Для расчетов использовались исходные данные применительно к ЛД с укреплёнными деревянными, стальными и железобетонными опорами 35-500 кВ и проводами по ГОСТ 830-59, на подвеску которых расч. для эти опоры: АС-50, АС-70, АС-95, АС-120, АС-150, АС-185, АС-240, АС-300, АС-400, АС-500. Наибольшие напряжения в проводах принимались такими же, как при расчете укреплённых опор, т.е. по ПЭ-66.

Инв. № 34701тм-т2-31

Кроме того, с целью выявления влияния изменяющихся конструктивных особенностей и новых значений допускаемых напряжений согласно Решению в 3-12/75, были дополнительно выполнены расчеты проводов по ГОСТ 839-74, предполагая, что они подвешены на те же укреплённые опоры с новыми тяжениями.

Климатические условия соответствовали I+IV районам гололедности ( $\delta = 5, 10, 15, 20$  мм) с максимальным скоростным напором ветра 50, 55 и 60 кгс/м<sup>2</sup>.

Длины пролетов принимались равными 90% от габаритных, что соответствует большинству реальных линий. Коэффициент 0,9 к габаритному пролету соответствует обосновываемым условиям действующего предекрета на строительство воздушных линий электропередачи 35-500 кВ М.1970".

Для расчетов проводов по ГОСТ 839-74 были приняты три значения монтажной температуры  $t_m = -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ , а проводов по ГОСТ 839-74 только  $+30^\circ$ .

Модули упругости, начального и предельного растяжения, коэффициенты температурного линейного расширения принимались соответственно по табл.7 настоящей пояснительной записки или табл.1 РУ.

Коэффициент реализации ползучести принят для всех проводов  $K_p = 0,3$

Были выполнены также расчеты для стальных тросов по ГОСТ 3062-69, 3063-66.

Все расчеты произведены в соответствии с РУ.

Ука. в 3471гм-т2-32

Сводная количественная произведенных расчетов дана в табл.2

Таблица 2

Монтажная температура	Общее количество расчетов	Количество расчетов, выполненных применительно к различным опорам ВЛ, напряжением, кВ					
		35	110	150	220	350	600
<u>С проводами по ГОСТ 839-59</u>							
40	410	III	131	72	42	23	31
0	410	III	131	72	42	23	31
30	410	III	131	72	42	23	31
<u>С проводами по ГОСТ 839-74</u>							
30	360	III	122	48	42	25	33

В таблице 3 приведен образец расчета для провода АС 300/39.

В результате расчетов были получены следующие данные: относительное уменьшение стрел провеса провода при монтаже, (перетяжка), т.е. относительное

$$\frac{f_m - f_{уст}}{f_{уст}} \cdot 100 ,$$

для всего диапазона условий составляет от 3,0 до 26,8% для проводов по ГОСТ 839-59 и от 4,1 до 31,7% для проводов по ГОСТ 839-74.

Оно возрастает по мере уменьшения монтажной температуры.

В табл.4 приведено число случаев от общего с разбивкой по градациям.



Таблица 3.

№: в.р.	Марка провода	Типы опор	Средняя нагрузка кВт	0,9 P <sub>н</sub> М	Граничные напряжения См кгс/мм <sup>2</sup>	Нагрузка в усреднённом режиме С кгс/мм <sup>2</sup>	Коэффициент деформации провода Кот %	Напряжения перегрузки в режиме С А кгс/мм <sup>2</sup>			Коэффициент пере- грузки в режиме К П %		
								8	10	11	12	13	14
1	АС-300/30	ПД220-1, ПБ-220-3	I	240	7,22	5,75	20,3	14,15	11,38	9,72	20,9	-	24,6
2		П220-1, П220-3	I	400	7,47	6,80	8,1	10,74	11,20	8,59	-	-	10,1
3		П220-2	I	409	7,40	6,71	9,3	11,33	11,19	8,73	-	-	11,9
4		П330-3, П330-5	I	433	7,43	6,78	8,7	11,03	11,19	8,66	-	-	11,0
5		П330-2	I	380	7,35	6,60	10,3	11,72	11,18	8,83	0,2	-	13,2
6		ПБ 220-1	I	274	7,37	6,06	17,5	13,76	11,48	9,63	17,6	-	23,4
7		ПБ 220-1	I	310	7,35	6,28	14,5	13,03	11,35	9,34	11,4	-	19,3
8		ПБ 330-1	I	321	7,35	6,34	13,7	12,81	11,37	9,77	4,3	-	16,2
9		ПД 220-1, ПБ-220-3	II	240	7,22	5,75	20,3	14,15	12,73	9,72	20,9	8,8	24,6
10		П220-1, П220-3	II	429	6,72	6,09	9,4	9,61	12,54	7,70	-	7,1	-
11		П220-2	II	386	6,86	6,10	11,2	10,36	12,67	8,10	-	8,3	3,8
12		П330-3, П330-5	II	407	6,79	6,09	10,3	10,07	12,60	7,89	-	7,7	1,2
13		П330-2	II	361	6,97	6,10	12,4	11,72	12,70	8,39	-	9,1	7,5
14		ПБ 220-1	II	271	7,36	6,06	17,6	13,84	13,04	9,67	18,3	11,4	24,0
15		ПБ 220-1	II	302	7,29	6,12	16,0	13,00	13,03	9,28	11,6	11,3	16,9

Монтаж- : Число случаев в процентах от общего количества расчетов,  
ная тем- : в которых уменьшение с реж провеса составляет

пература : Менее : 10-15% : 15-20% : 20-25% : 25-30% : 30-35%  
10%

Провода по ГОСТ 839-59

+30	43,7	42,2	11,7	2,4	-	-
0	29,3	43,0	22,3	4,7	0,7	-
-30	26,0	44,0	21,8	7,0	1,2	-

Провода по ГОСТ 839-74

+30	19,0	33,0	23,0	20,0	3,7	1,3
-----	------	------	------	------	-----	-----

Из табл.4 видно возрастание размера перетяжки проводов по ГОСТ 839-74 по сравнению с таковой для проводов по ГОСТ 839-59, что обусловлено более высокими допускаемыми напряжениями, принятыми для них.

Анализ расчетов показывает, что перетяжка при прочих равных условиях увеличивается с увеличением длины пролета и с ростом гололедного района.

Перетяжка грозозащитного троса, как правило, не превышает 5%.

Перегрузка провода рассчитывалась в трех режимах - наибольшей нагрузке, наименьшей температуре, среднегодовой температуры. Коэффициент перегрузки ( $K_n = \frac{\sigma_{перегрузки}}{\sigma_{допустимое}}$ ) для всего диапазона условий лежит в пределах 1,019-1,226 для проводов по ГОСТ 839-59 и 1,030 - 1,272 для проводов по ГОСТ 839-74. По мере понижения монтажной температуры коэффициент перегрузки уменьшается. Перегрузка возникает не обязательно во всех трех проверяемых режимах (г, -, в). Она может иметь место лишь в одном или двух из этих режимов. В табл.5 приведено обобщенное число случаев перегрузки и с разбивкой по градусам.

Таблица 5

Мо тапчай температура	Режим перегрузки	Процент случаев перегрузки при наступлении условий данного режима перегрузки	Число случаев в процентах от общего со значительными коэффициентами перегрузки в пределах				
			менее 1,1	1,1-1,15	1,15-1,20	1,20-1,25	1,25-1,30
<u>Провода по ГОСТ 639-59</u>							
+30°	г	32	5	2	-	-	-
	-	30	11	9	9	1	-
	э	42	15	18	7	2	-
0	г	73	76	2	-	-	-
	-	29	12	11	5	1	-
	э	41	14	16	6	1	-
-30°	г	77	77	-	-	-	-
	-	29	16	9	4	-	-
	э	38	28	9	1	-	-
<u>Провода по ГОСТ К.9-74</u>							
+30	г	90	77	17	1	-	-
	-	33	12	8	6	7	-
	э	38	13	9	9	4	3

Как видно из табл.5, самое большое число случаев перегрузки имеет место в режиме наибольшей нагрузки, но размеры ее невелики и коэффициенты перегрузки не превышают 1,10-1,15. Наибольшие размеры перегрузки имеет место в режиме среднегодовой температуры - 1,226 и 1,272 соответственно для проводов по ГОСТ 639-59 и 639-74.

Как указывалось выше, все расчеты выполнялись для пролетов длиной 0,9  $l_{\text{рас}}$ . Для выяснения вопроса об изменении коэффициента перегрузки с изменением длины пролета был рассчитан случай (провод АСО-400, 0,9  $l_{\text{рас}}$  -430 м, I-й гололедный район), для которого длина

пролета уменьшалась до 50 м. Результаты расчетов приведены в табл.6.

Таблица 6

Монтажная температура	Длина пролета	Коэффициент перегрузки в режимах			
		г	б	в	д
30°	430	-	-	1,076	
	200	-	1,121	1,162	
	100	-	1,251	1,101	
	50	-	1,215	1,007	
0	430	-	-	1,073	
	200	-	1,192	1,147	
	100	-	1,201	1,012	
	50	-	1,236	1,037	
-30	430	-	-	1,055	
	200	-	0,171	1,019	
	100	-	0,195	1,034	
	50	-	0,202	-	

Как видно из табл.6,  $K_{II}$  не превышает 1,251 при любых данных пролетов, однако тенденция к увеличению имеется. В реальных расчетах для сталеалюминиевых проводов превышение коэффициента перегрузки сверх 1,25 следует ожидать весьма редко.

Таблица 7

по ГОСТ 839-59

Расчетные параметры сталеалюминиевых и алюминиевых проводов и стальных тросов

Наименование провода и троса	Модуль упругости E, кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль начального растяжения F, кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль предельного растяжения D, кгс/мм <sup>2</sup>	Коэффициент температурного линейного расширения 1/град
А-16 — А-35	6,3 · 10 <sup>3</sup>	5,4 · 10 <sup>3</sup>	4,0 · 10 <sup>3</sup>	23,0 · 10 <sup>-6</sup>
А-50 — А-600			3,6 · 10 <sup>3</sup>	
ААО-150 — ААО-700	7,85 · 10 <sup>3</sup>	6,9 · 10 <sup>3</sup>	5,3 · 10 <sup>3</sup>	19,6 · 10 <sup>-6</sup>
АА-16 — АА-35	8,25 · 10 <sup>3</sup>	7,3 · 10 <sup>3</sup>	6,2 · 10 <sup>3</sup>	19,2 · 10 <sup>-6</sup>
АА-50 — АА-95			5,8 · 10 <sup>3</sup>	
АА-120 — АА-185	8,45 · 10 <sup>3</sup>	7,5 · 10 <sup>3</sup>	6,4 · 10 <sup>3</sup>	18,9 · 10 <sup>-6</sup>
АА-240 — АА-400			6,0 · 10 <sup>3</sup>	
ААУ-120 — ААУ-185	8,9 · 10 <sup>3</sup>	8,0 · 10 <sup>3</sup>	6,8 · 10 <sup>3</sup>	18,3 · 10 <sup>-6</sup>
ААУ-240 — ААУ-400			6,5 · 10 <sup>3</sup>	
Стальные тросы всех наименований	20,0 · 10 <sup>3</sup>	18,9 · 10 <sup>3</sup>	18,9 · 10 <sup>3</sup>	12 · 10 <sup>-6</sup>

3471ТМ - 12-57

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.В. Торосян. Исследование механических свойств проводов. Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации Лх, ОНТИ, 1935г.
2. Ф.П. Мафеев. Работа на растяжение сталеалюминевых проводов и их компонентов. "Электрические станции", № II, 1969г., стр. 60-65.
3. Е.П. Никифоров. Экспериментальное исследование механических характеристик сталеалюминевых проводов. Труды ВНИИЭ, вып. XXXIX "Энергия", 1969г., стр. 124-136.
4. А.М. Косельман. О расчете проводов с учетом вытяжки. "Электрические станции", №4, 1971г. стр. 46-48.
5. Руководящие указания по расчету проводов и тросов воздушных линий электропередачи, М.Л. "Энергия", 1965г.
6. F.F. Winkelmann. Механические расчеты и полевые измерения, проведенные Бонневильским Энергоуправлением. - Sag-tension computations and field measurements of Bonneville Power Administration. - IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1960, pp. 15 - 16.
7. Ограничения при растяжении и регулировке стропы проводов. Отчет комитета IEEE, ноябрь, 12, 1964, стр. 73-76. Limitations on stringing and sagging conductors, - IEEE Committee Report (1230). IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1964, No. 24.
8. Практический метод определения вытяжки проводов ИЭП. Une methode pratique de determination du fluage des conducteurs. "Electra" (France), 1972, №24, стр. 105-108, 110-117 (РХ "Электротехника и энергетика" ЭИВ, 1973, № 265).

9. Измерение вытяжки проводов "ЭИ № 5283, стр. 105 (Ж "Электротехника и энергетика", 218, 1968, 2E195).
10. Строительство участка ЛЭП 500 кВ Бонавиллокая энергосистема-Калифорния. 1967, 19, № 7, стр.42-46 (Ж "Электротехника и энергетика" 218, 1968, 3E215).
11. Монтаж на линии электропередачи второго провода в фазе с применением предварительной форсированной вытяжки. Титаренко М.И., Шапиро И.М., Сырова И.А. В сб. "Энерг.стр.-во" № 4 (118). М., "Энергия", 1971, стр.47-49 (Ж "Электротехника и энергетика" 218, 1971, 9E298).
12. Рабочая группа 5 СНПЭ. Вытяжка проводов, 1972, № 24, стр.54-56 (Ж "Электротехника и энергетика", 1972, 4E266).
13. Учет вытяжки при монтаже проводов, 1972, 177, № 10, стр. 66-68 (Ж "Электротехника и энергетика", 1972, 11E171).
14. Б.П.Никифоров. Исследования механических характеристик сталеалюминевых проводов новых конструкций. Научно-технический отчет по теме 4-20/64, БЭИЭ, 1969 г.
15. Ф.П.Матвеев. Механический расчет сталеалюминевых проводов с учетом остаточных удлинений. "Электрические станции" № 4, 1971.