

УДК 621.315.176

**МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ. РАСЧЕТ СТРЕЛ ПРОВЕСА ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛЫ В ПРОЛЁТЕ**

Никитин Е.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Гецман Е.М.

По данным ГПО «Белэнерго» протяженность воздушных линий (ВЛ) электропередач различного напряжения в Республике Беларусь на 2020 год равно 239,03 тыс. км, что составляет примерно 85,5% от общего количества линий электропередач в стране. По номинальному напряжению преобладают ЛЭП напряжением 0,4-10 кВ – 202,22 тыс. км. Для того, чтобы создать такое количество воздушных линий электропередач учёные и проектировщики не раз воспользовались механическим расчётом гибких проводов воздушных линий.

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных режимах климатических воздействий. Актуальной проблемой современной электроэнергетики является проектирование РУ с уменьшенными габаритами и компактных ВЛ, что повышает требования к их расчету, обеспечению в любой точке пролета требующихся по ПУЭ минимальных расстояний до различных объектов при всех возможных видах нагрузок, принятых при проектировании (гололед, ветер и др.). В механическом расчете гибких проводов сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, гирлянд изоляторов, шлейфов, отпаек к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету [1].

В приближенных методах провод с равномерно распределенной нагрузкой обычно рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы. Расчет такой нити производится по уравнению состояния, вывод которого основан на сравнении длин нити при разных климатических условиях и разном нагружении [1].

Провод с несколькими различными видами нагрузок должен рассматриваться как комбинированная, т. е. неоднородная гибкая нить, не имеющая плавного очертания параболы по всей длине пролета. Плавность очертания нарушается как в местах примыкания равномерно распределенных нагрузок разной интенсивности, так и в местах приложения сосредоточенных сил. Еще более сложное очертание кривой провисания провода получается при одновременном действии различных нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях — вертикальном и поперечном горизонтальном. Во всех таких случаях длина неоднородной нити должна определяться как сумма длин отдельных участков, на которых сохраняется очертание параболы (или условно сохраняется, например, при нагрузке от действия ветра).

По методике [1] уравнение состояния провода ничем не отличается от обычного уравнения состояния, по которому рассчитываются провода воздушных линий с равномерно распределенными нагрузками. Чтобы уравнение

можно было применить для неоднородной нити, ее заменяют эквивалентной однородной нитью, что производится путем введения эквивалентной равно распределенной нагрузки по длине пролета. Эквивалентная нагрузка устанавливается из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной эквивалентной нагрузкой длине комбинированной нити с распределенными нагрузками разной интенсивности и обобщенно длине нити со сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в различных местах пролета.

Длина неоднородной (комбинированной) нити определяется путем интегрирования дифференциального уравнения нити по участкам. Для перехода от неоднородной нити к эквивалентной однородной при любой схеме загрузки пролета определяется переходный коэффициент  $K$ , называемый коэффициентом нагрузки. Приведенная нагрузка вычисляется как произведение величины равномерно распределенной нагрузки для данного провода на коэффициент нагрузки [2].

На рисунке 1 показана расчетная схема пролета при наличии сосредоточенной силы.

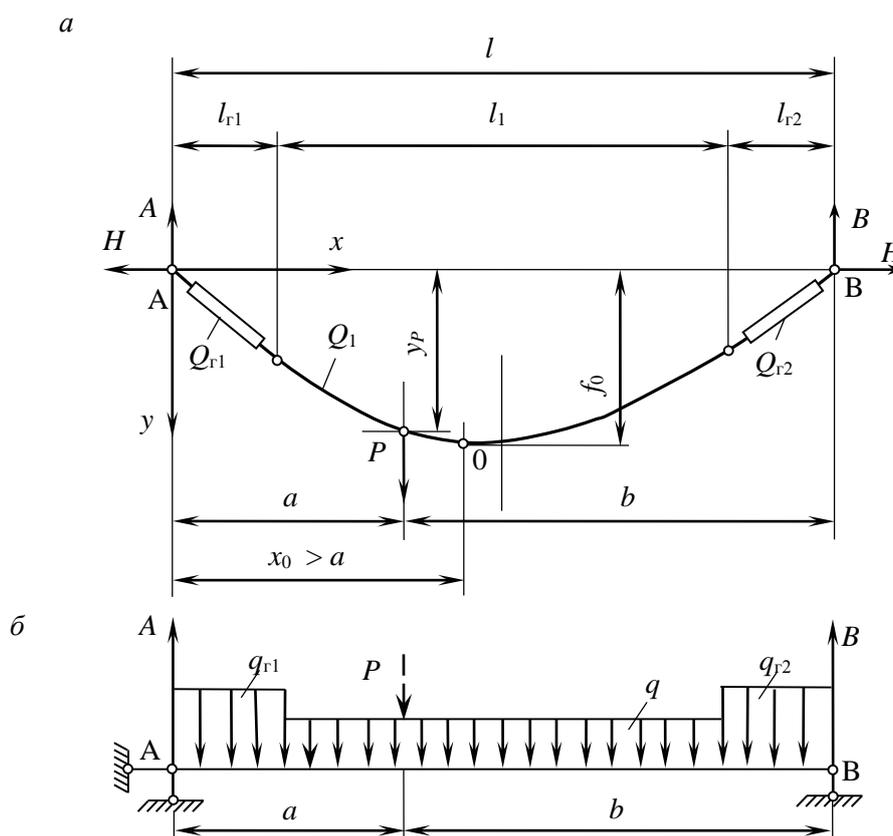


Рисунок 1 – Расчетная схема пролета:

а) пролет с вертикальными нагрузками от провода  $q$ , гирлянд изоляторов  $q_{r1}$ ,  $q_{r2}$  и сосредоточенной силой  $P$ ; б) пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

В [3] приведены формулы для расчета максимальных стрел провеса при одинаковых гирляндах изоляторов и симметричном расположении

сосредоточенных сил вдоль пролета. В этом случае максимум провеса приходится на середину пролета.

Рассмотрим случай, когда в пролете действует одна сосредоточенная сила. В общем случае стрелы провеса определяются на основании формулы:

$$y = \frac{M(x)}{H}.$$

где  $M(x)$  – переменная величина балочного изгибающего момента в зависимости от абсциссы  $x$ ,

где  $x, y$  – координаты провода.

Опорные балочные реакции определяются согласно рисунку 1 по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l} + \frac{Pb}{l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l} + \frac{Pa}{l},$$

где  $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$ ;  $d = q_{r1}l_{r1}^2 - q_{r2}l_{r2}^2$ ;

где  $A, B$  – опорные балочные реакции;

$q$  – погонный вес провода (для расщепленных проводов – погонный вес фазы);

$q_{r1}, q_{r2}$  – погонный вес первой и второй гирлянд изоляторов (с учетом возможного многоцепного исполнения, а также арматуры, зажимов, коромысел, ушек, скоб, серег, промежуточных звеньев и узлов крепления);

$l$  – длина пролета;

$l_{r1}, l_{r2}$  – длины первой и второй натяжных гирлянд изоляторов;

$P$  – вес сосредоточенной нагрузки;

$a, b$  – расстояния до сосредоточенной силы  $P$  от опор  $A$  и  $B$ .

Для построения зависимости стрелы провеса от координаты  $x$  определим  $y(x)$  на всех участках:

$$y_1(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - \frac{q_{r1}x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1}; \quad (1)$$

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - q_{r1}l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a; \quad (2)$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - q_{r1}l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P(x - a) \right] \text{ при } a < x \leq l - l_{r2}; \quad (3)$$

$$y_4(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - q_{r1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - q l_1 \left( x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - P(x - a) \right]$$

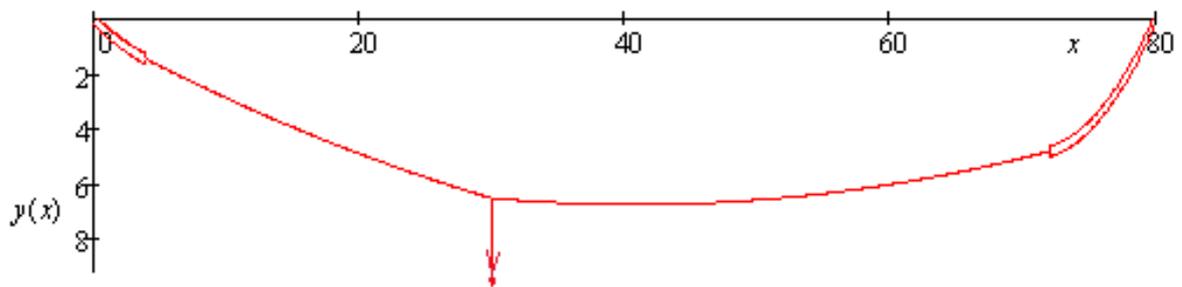
при  $l - l_{r2} < x \leq l$ ,

(4)

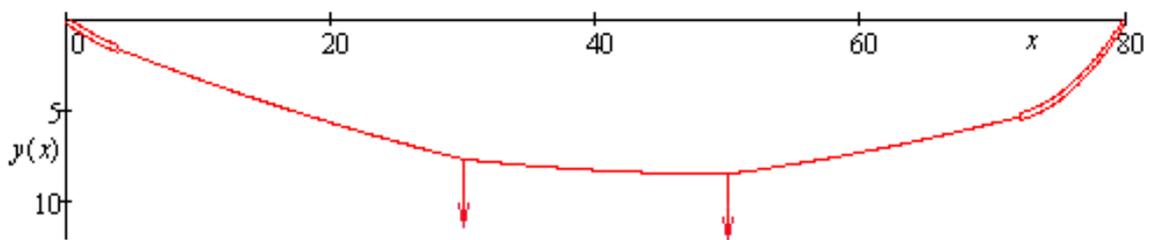
где  $l_1 = l - l_{r1} - l_{r2}$  – длина провода без учета провеса.

По выражениям (1) – (4) строится кривая провеса провода (рисунок2а).

а



б



в

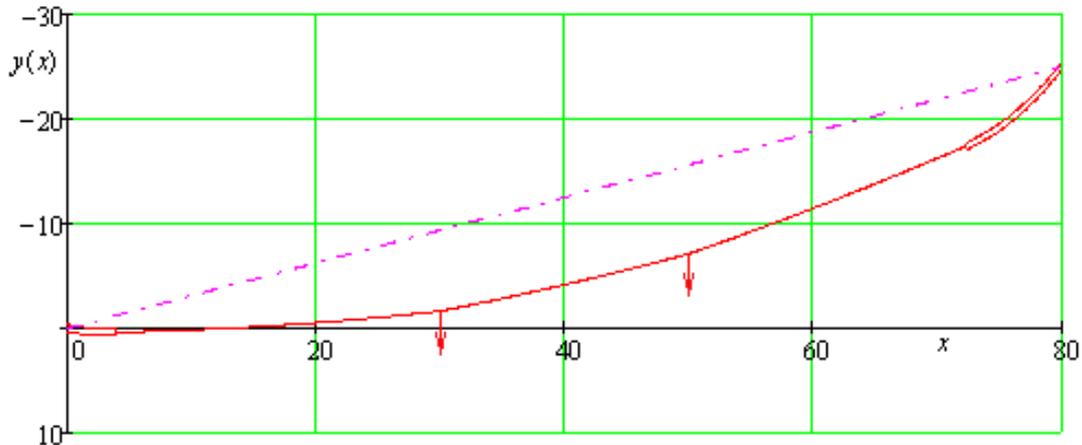


Рисунок 2 – Кривые провисания провода весом  $q = 4$  даН/м в пролете длиной  $l = 80$  м с разными гирляндами изоляторов

( $l_{r1} = 4$  м,  $q_{r1} = 60$  даН/м,  $l_{r2} = 6$  м,  $q_{r2} = 120$  даН/м):

а) с одной сосредоточенной силой  $P = 100$  даН на расстоянии  $a = 30$  м;

б) с двумя сосредоточенными силами  $P_1 = P_2 = 100$  даН на расстоянии  $a_1 = 30$  м,  $a_2 = 50$  м;

в) то же, в наклонном пролете с разностью высот подвеса  $h = 25$  м

Максимальная стрела провеса находится решением уравнения

$$\frac{dy(x)}{dx} = 0,$$

которое дает расстояние  $x_0$  от начала пролета до этой точки:

Для случаев расположения максимальной стрелы провеса на разных участках расстояние до нее рассчитывается по формулам:

$$x_0 = \frac{A}{q_{r1}} \text{ при } 0 \leq x_0 \leq l_{r1}; \quad (5)$$

$$x_0 = \frac{A - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_0 \leq a \quad (6)$$

$$x_0 = \frac{A - P - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a < x_0 \leq l - l_{r2}; \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{A - P - ql_1 - q_{r1}l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } l - l_{r2} < x_0 \leq l. \quad (8)$$

При невыполнении этих неравенств максимальная стрела провеса будет находиться в точке приложения сосредоточенной силы  $x_0 = a$ .

Рассмотрим случай расположения максимальной стрелы провеса на проводе (см. рисунок1) при  $a < x_0 \leq l - l_{r2}$  (рисунок1а), тогда

$$f_0 = y(x_0) = \frac{1}{H} \left[ \frac{(A - P)^2}{2q} - \left( A - P - \frac{q_{r1}l_{r1}}{2} \right) \left( \frac{q_{r1}}{q} - 1 \right) l_{r1} + Pa \right].$$

Коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием натяжных гирлянд и сосредоточенной силы, определяется по выражению:

$$K_f = \frac{8Hf_0}{ql^2}.$$

Полученные выражения (1) – (8) могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок, а результирующая стрела провеса в наклонной плоскости рассчитывается после нахождения составляющих в обеих плоскостях [3].

#### Литература

1. Бошнякович, А.Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Качурин, В. К. Гибкие нити с малыми стрелками / В. К. Качурин. М.: Гостехиздат, 1956. 224 с.
3. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97-107.