

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115>

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками

Ю. В. Бладыко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Расчет стрел провеса провода и тяжений в различных режимах – это задача механического расчета. В статье приведены формулы для кривой провисания провода при наличии одной или нескольких сосредоточенных сил и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены уравнения для нахождения расстояния до максимальной стрелы провеса. Исходя из длины системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов», зависящей от опорных балочных реакций и балочных поперечных сил на соответствующих участках, определяется коэффициент нагрузки системы, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок. Выведены формулы расчета коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при одной и нескольких сосредоточенных силах. Полученные выражения могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок; тогда уравнение состояния должно учитывать эту составляющую при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости. Достоверность формул доказана совпадением результатов для частного случая расположения гирлянд. Приводится алгоритм расчета стрел провеса при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также в случае расположения точек подвеса провода на разных высотах. Предложена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета, и разных гирлянд изоляторов в пролете. Построена зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до сосредоточенной силы при наличии одной и двух сил в пролете.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гибкая нить, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115>

Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads

Y. V. Bladyko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Calculating of wires sag and tension under various modes is the task of mechanical calculation. The article derived formulas for the curve of the wire sag under the action of one or several concentrated forces and with various tensioning insulators strings in the span. Formulas for

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

Address for correspondence

Bladyko Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

estimating the distance to the maximum sag have been obtained. Based on the length of the system of “first tension insulators string – conductors – second tension insulators string” that depends on the supporting beam reactions and beam lateral forces in the corresponding sections, the system load factor was determined taking into account structural elements for different climatic loads. The formulas to calculate the load factor for solving the equation of state in the case of different insulators strings in span loaded with one or several concentrated forces have been obtained. The resulting expressions can also be applied in case of horizontal wind loads; in this case the equation of state should take this component into account when calculating the resulting reduced load on the wire in an inclined plane. The reliability of the formulas was proved by the coincidence of the results for the particular case of the arrangement of the insulators strings. An algorithm for calculating sag under the combined action of vertical and horizontal loads, as well as in the case of the location of wire suspension points at different heights, is given. A formula has been proposed for estimating the sag increase factor due to the presence of concentrated forces uniformly distributed along the span and various insulator strings in the span. The dependence of the coefficient of increase of the sag on the distance to the concentrated force in the presence of one and two forces in the span is drawn.

Keywords: sag, tension, flexible string, insulator strings, equation of state, span, equivalent wire, load factor

For citation: Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2), 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115> (in Russian)

Введение

Механическому расчету гибких токопроводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) посвящены работы [1–10]. В [1] предлагается использовать параболу для описания кривой провисания провода, там же приведены формулы для расчета стрел провеса и коэффициентов нагрузки с учетом сосредоточенных сил. Рассматривается пролет с одной или двумя одинаковыми гирляндами изоляторов в нем. В [2] показана погрешность от замены сосредоточенной нагрузки распределенной, в [3] – с учетом конструктивных элементов. В [4, 5] сосредоточенной нагрузкой являются заградительные шары, в [6] – распорки. В [7] учитываются разные гирлянды изоляторов в пролете. Тяжение провода при наличии сосредоточенной нагрузки вычислялось по уравнению состояния и совпадало с результатами расчета по программе MR2.20 [8–11]. В компьютерной программе учитывается реальное расположение в РУ до трех отпаяк к электрическим аппаратам в одном пролете. В [8] сделан вывод, что при известных значениях составляющих сосредоточенных сил можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Цель исследований – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при сосредоточенных нагрузках и наличии в пролете разных гирлянд изоляторов.

Стрела провеса (рис. 1) в любом месте пролета может быть определена по формуле

$$y = \frac{M(x)}{H}, \quad (1)$$

где $M(x)$ – балочный изгибающий момент в точке x ; H – горизонтальная проекция тяжения в проводе.

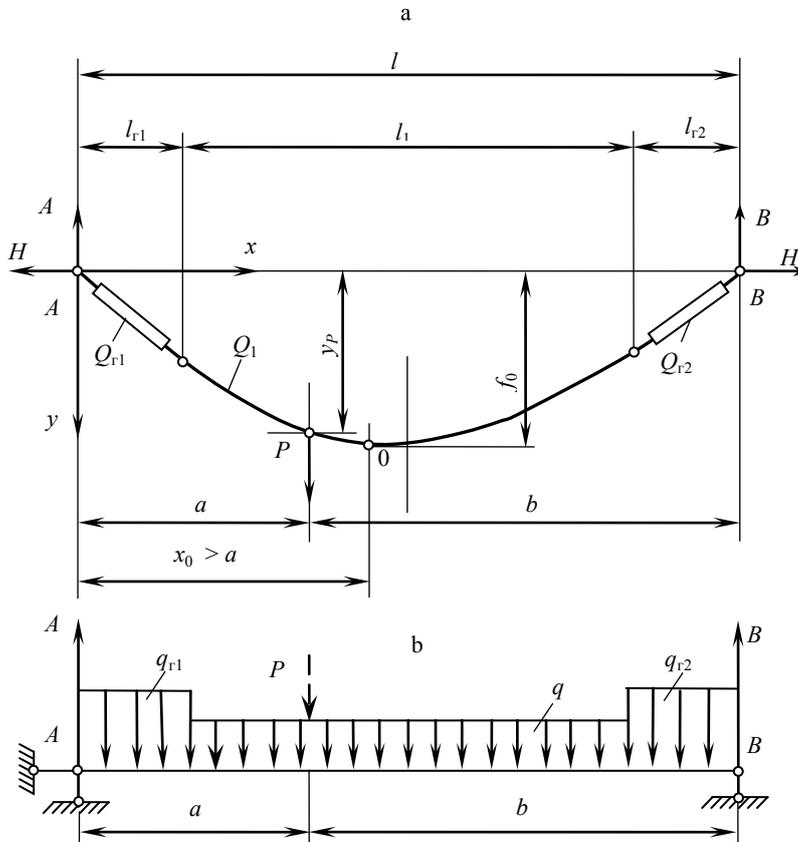


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с вертикальными нагрузками от провода q , гирлянд изоляторов q_{r1} , q_{r2} и с сосредоточенной силой P ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

Fig. 1. The estimated span scheme: а – span under vertical loads from the wire q , insulator strings q_{r1} , q_{r2} and under concentrated force P ; б – span in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way

Расчет стрел провеса при наличии одной сосредоточенной силы в пролете

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 вариант, когда в пролете действует одна сосредоточенная сила. В общем случае стрелы провеса можно вычислить на основании (1). Опорные балочные реакции определяются, согласно рис. 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 $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$; $d = q_{r1}l_{r1}^2 - q_{r2}l_{r2}^2$; q – погонный вес провода (для расщепленных проводов – погонный вес фазы); q_{r1} , q_{r2} – то же 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} – то же первой и второй натяжных гирлянд изоляторов; P – вес сосредоточенной нагрузки; a , b – расстояние до сосредоточенной силы P от опор A и B .

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

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

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a; \quad (3)$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P(x - a) \right] \text{ при } a < x \leq (l - l_{r2}); \quad (4)$$

$$y_4(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - ql_1 \left(x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - P(x - a) \right] \text{ при } (l - l_{r2}) < x \leq l, \quad (5)$$

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

По (2)–(5) строится кривая провисания провода (рис. 2а).

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:

$$x_0 = \frac{A}{q_{r1}} \text{ при } 0 \leq x_0 \leq l_{r1}; \quad (6)$$

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

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

$$x_0 = \frac{A - P - ql_1 - q_{r1}l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } (l - l_{r2}) < x_0 \leq l. \quad (9)$$

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

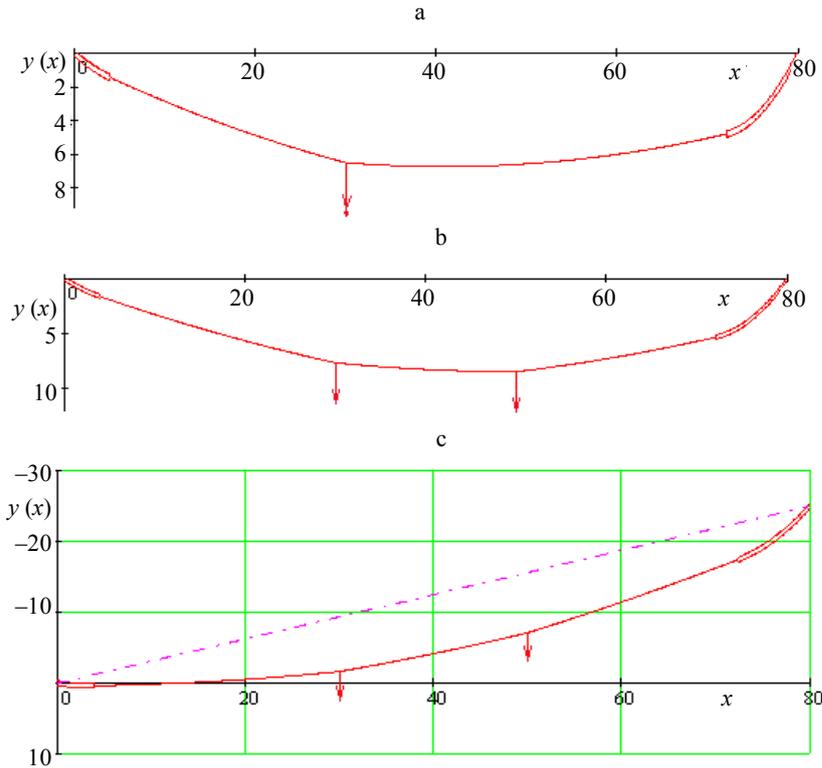


Рис. 2. Кривые провисания провода весом $q = 4$ даН/м в пролете длиной $l = 80$ м с разными гирляндами изоляторов ($l_{r1} = 4$ м, $q_{r1} = 60$ даН/м; $l_{r2} = 6$ м, $q_{r2} = 120$ даН/м):
 а – с одной сосредоточенной силой $P = 100$ даН на расстоянии $a = 30$ м;
 б – с двумя сосредоточенными силами $P_1 = P_2 = 100$ даН на расстоянии $a_1 = 30$ м, $a_2 = 50$ м;
 с – то же, в наклонном пролете с разностью высот подвеса $h = 25$ м

Fig. 2. Curves of sagging of wires of the weight $q = 4$ daN/m in a span of $l = 80$ m with different insulator strings ($l_{r1} = 4$ m, $q_{r1} = 60$ daN/m; $l_{r2} = 6$ m, $q_{r2} = 120$ daN/m):
 а – under one concentrated force $P = 100$ daN at a distance of $a = 30$ m;
 б – under two concentrated forces $P_1 = P_2 = 100$ daN at a distance of $a_1 = 30$ m, $a_2 = 50$ m;
 с – the same, in an inclined span with a height of the suspension difference $h = 25$ m

Рассмотрим случай расположения максимальной стрелы провеса на проводе (рис. 1) при $a < x_0 \leq (l - l_{r2})$ (рис. 2а). 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 формулы (2)–(9) могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок, а результирующая стрела провеса в наклонной плоскости может рассчитываться после нахождения составляющих в обеих плоскостях [3].

Расчет коэффициента нагрузки при наличии одной сосредоточенной силы в пролете

Длина эквивалентного провода (системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов») определяется [1]

$$L = l + \frac{q^2 l^2 l_1 K^2}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (10)$$

где K – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок, $K^2 = \frac{12D}{q^2 l^2 l_1}$; D – интеграл,

$$D = \int_0^l Q^2(x) dx; \quad Q(x) – \text{балочная поперечная сила.}$$

Для рис. 1 интеграл D определяется как

$$D = \int_0^{l_1} Q_1^2(x) dx + \int_{l_1}^a Q_2^2(x) dx + \int_a^{l-l_2} Q_3^2(x) dx + \int_{l-l_2}^l Q_4^2(x) dx,$$

где $Q_1(x)$, $Q_2(x)$, $Q_3(x)$, $Q_4(x)$ – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде:

$$Q_1(x) = A - q_{r1}x;$$

$$Q_2(x) = A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_3(x) = A - P - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_4(x) = A - P - q_{r1}l_{r1} - ql_1 - q_{r2}(x - l + l_{r2}).$$

Коэффициент нагрузки при одинаковых гирляндах ($q_{r1} = q_{r2} = q_r$; $l_{r1} = l_{r2} = l_r$) совпадает с формулой [1]

$$K^2 = \frac{l_1(l + 4l_r)}{l^2} + \frac{12}{q^2 l^2 l_1} \left[q_r l_r^2 \left(ql_1 + \frac{2q_r l_r}{3} + P \right) + Pq(ab - l_r^2) + \frac{P^2 ab}{l} \right].$$

Полученные выражения могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок. Тогда уравнение состояния должно учитывать эту составляющую при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости [3].

Расчет стрел провеса при наличии нескольких сосредоточенных сил в пролете

Пусть в пролете действуют n сосредоточенных сил. Тогда опорные балочные реакции определяются по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i b_i}{l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i a_i}{l},$$

где P_i – вес i -й сосредоточенной нагрузки; a_i, b_i – расстояние до i -й сосредоточенной силы P_i от опор A и B .

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

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

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a_1;$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P_1(x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

...

$$y_{k+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^k P_i(x - a_i) \right]$$

при $a_k < x \leq a_{k+1}$ ($k = 2 \dots n-1$);

...

$$y_{n+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i(x - a_i) \right]$$

при $a_n < x \leq (l - l_{r2})$;

$$y_{n+3}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - ql_1 \left(x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i (x - a_i) \right]$$

при $(l - l_{r2}) < x \leq l$.

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

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

$$x_0 = \frac{A - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_0 \leq a;$$

$$x_0 = \frac{A - P_1 - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_1 < x_0 \leq a_2;$$

...

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_k < x_0 \leq a_{k+1} \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{);}$$

...

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1} l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_n < x_0 \leq (l - l_{r2});$$

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - ql_1 - q_{r1} l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } (l - l_{r2}) < x_0 \leq l.$$

Если эти неравенства не выполняются, то максимальная стрела провеса будет находиться в точке приложения одной из сосредоточенных сил $x_0 = a_i$, дающей $f_0 = \max[y(a_i)]$. На рис. 2b $x_0 = a_2$.

Расчет коэффициента нагрузки при наличии нескольких сосредоточенных сил в пролете

Интеграл D для формулы (10) определяется как

$$D = \int_0^{l_{r1}} Q_1^2(x) dx + \int_{l_{r1}}^{a_1} Q_2^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_3^2(x) dx + \dots + \int_{a_k}^{a_{k+1}} Q_{k+2}^2(x) dx + \dots +$$

$$+ \int_{a_n}^{l-l_{r2}} Q_{n+2}^2(x) dx + \int_{l-l_{r2}}^l Q_{n+3}^2(x) dx \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{),}$$

где $Q_1(x) - Q_{n+3}(x)$ – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде,

$$\begin{aligned}
Q_1(x) &= A - q_{r1}x; \\
Q_2(x) &= A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
Q_3(x) &= A - P_1 - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
&\dots \\
Q_{k+2}(x) &= A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
&\dots \\
Q_{n+2}(x) &= A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1}); \\
Q_{n+3}(x) &= A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - ql_1 - q_{r2}(x - l + l_{r2}).
\end{aligned}$$

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок

Появление горизонтальных нагрузок связано с действием ветра и реальным расположением отпаяк к электрическим аппаратам. Расчет горизонтальных отклонений ведется независимо от расчета стрел провеса, в формулы (2)–(9) подставляются нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости [3]. Необходимо учитывать возрастание нагрузок от действия ветра при покрытии гололедом проводов, отпаяк, гирлянд изоляторов, распорок и заградительных шаров [5]. Коэффициенты нагрузки также определяются в двух плоскостях, но в выражение (10) подставляется результирующий коэффициент [3].

Расположение точек подвеса провода на разных высотах

Всеми вышеприведенными выражениями можно пользоваться после замены в формулах длин гирлянд изоляторов l_{r1} и l_{r2} на $l_{r1}\cos\theta$ и $l_{r2}\cos\theta$, погонных нагрузок q – на $q/\cos\theta$, q_{r1} – на $q_{r1}/\cos\theta$ и q_{r2} – на $q_{r2}/\cos\theta$, где θ – угол наклона пролета, $\operatorname{tg}\theta = h/l$; h – разность высот подвеса проводов.

Учет разности высот подвеса приводит к корректировке выражений (2)–(5) для определения провеса провода $y(x) - \frac{xh}{l}$.

Максимальные стрелы провеса и расстояния до них определяются по (6)–(9) относительно линии, соединяющей точки подвеса (рис. 2с). Нахождение их относительно горизонтальной оси приводит к корректировке $x_0 - \frac{Hh}{ql}$.

ровке $x_0 - \frac{Hh}{ql}$.

Оценка коэффициента увеличения стрелы провеса

В [3] получено выражение для определения коэффициента увеличения стрелы провеса. После учета разных гирлянд изоляторов в пролете, как в [7], его можно записать следующим образом:

$$K_f = \frac{1 + 2\delta_1 + 2\delta_2 + (\delta_1 - \delta_2)^2 + K_p(1 + 1/n)}{\cos \theta}, \quad (11)$$

где $\delta_1 = (K_{B1} - 1)K_{r1}^2$; $\delta_2 = (K_{B2} - 1)K_{r2}^2$ – коэффициент, учитывающий наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов; $K_{B1} = \frac{q_{r1}}{q}$, $K_{B2} = \frac{q_{r2}}{q}$ – кратность веса первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно веса провода; $K_{r1} = \frac{l_{r1} \cos \theta}{l}$, $K_{r2} = \frac{l_{r2} \cos \theta}{l}$ – то же для первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно длины пролета; $K_p = \frac{P \cos \theta}{ql}$ – коэффициент сосредоточенных сил; $P = \sum_{i=1}^n P_i$ – суммарный вес n сосредоточенных нагрузок.

Выражение (11) было получено для симметричного расположения сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета [3]. Оно дает хороший результат при отсутствии сосредоточенной нагрузки при разных гирляндах изоляторов в пролете [7], в общем же случае может служить оценкой максимальной стрелы провеса. Рассмотрим это на примерах рис. 3, 4.

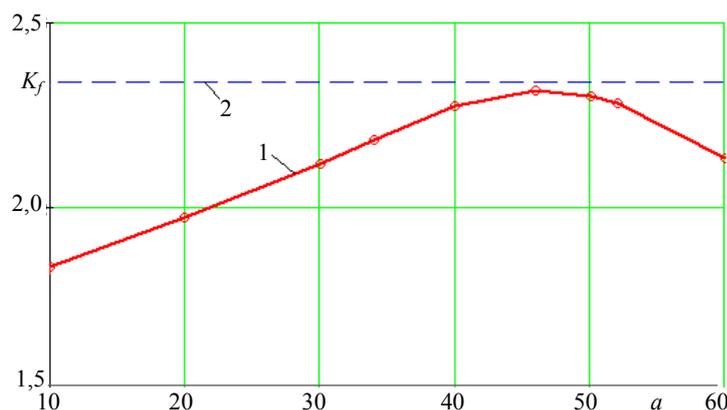


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до сосредоточенной силы для данных рис. 2а: 1 – зависимость $K_f(a)$; 2 – расчет по (11) для $n = 1$

Fig. 3. The dependence of the sag increase factor on the distance to the concentrated force for the data of Fig. 2a: 1 – dependence $K_f(a)$; 2 – calculation by (11) for $n = 1$

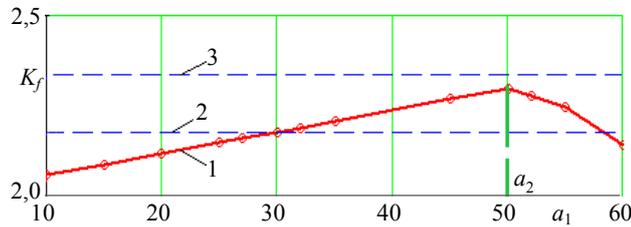


Рис. 4. Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до первой сосредоточенной силы a_1 для данных рис. 2 с двумя сосредоточенными силами $P_1 = P_2 = 50$ даН на расстоянии $a_2 = 50$ м: 1 – зависимость $K_f(a_1)$; 2, 3 – расчет по (11) для $n = 2$ и $n = 1$ соответственно

Fig. 4. The dependence of the sag increase factor on the distance to the first concentrated force a_1 for data of Fig. 2 under two concentrated forces $P_1 = P_2 = 50$ daN at a distance of $a_2 = 50$ m: 1 – dependence $K_f(a_1)$; 2, 3 – calculation by (11) for $n = 2$ and for $n = 1$

Как видно из рис. 3, коэффициент увеличения стрелы провеса зависит от расстояния до сосредоточенной силы, а формула (11) является асимптотой зависимости $K_f(a)$. Рис. 4 показывает, что при равномерной расстановке сосредоточенных сил вдоль пролета оценить увеличение стрелы провеса можно по (11). В случае совпадения точек приложения сил $a_1 = a_2$ кривая $K_f(a_1)$ приближается к асимптоте при $n = 1$.

ВЫВОДЫ

1. Выведены формулы (2)–(5) для построения кривой провисания провода при наличии одной сосредоточенной силы в любой точке пролета и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены уравнения (6)–(9) для нахождения расстояния до максимальной стрелы провеса. Те же выражения можно использовать для любого числа сосредоточенных сил.

2. Приведены выражения расчета коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при одной и нескольких сосредоточенных силах. Достоверность формул доказана совпадением результатов для частного случая расположения гирлянд.

3. Представлен алгоритм расчета стрел провеса при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также в случае расположения точек подвеса провода на разных высотах.

4. Предложена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета, и разных гирлянд изоляторов в пролете.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. за-

- ведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
3. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
 4. Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
 5. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>.
 6. Бладыко, Ю. В. Учет распорок в механическом расчете гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231>.
 7. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разными натяжными гирляндами изоляторов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 55–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65>.
 8. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
 9. Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпози. / Польская Академия наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988. № 3–19. С. 173–181.
 10. Streljuk, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streljuk, I. I. Sergey, Y. V. Bladyko // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. P. 15–19.
 11. Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1995. № 3–4. С. 21–29.

Поступила 08.02.2019 Подписана в печать 30.05.2019 Опубликована онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energia Publ. 248 (in Russian).
2. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Loads are Replaced by Distributed Ones Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.

4. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
5. Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Barrage Balls in Different Climatic Regimes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 24–36 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>.
6. Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Substations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231>.
7. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tension Insulator Strings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 55–65 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65>.
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions*, (8), 8–14 (in Russian).
9. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Polish Academy of Sciences. Zakopane, 10–12 Nov. 1988. Zakopane* (3–19), 173–181 (in Russian).
10. Streliuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin (Poland), 7–8 Sept. Lublin: Lublin Technical University*, 15–19.
11. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Units of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).