

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой

Ю. В. Бладыко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств и воздушных линий является определение стрел провеса и тяжений в различных режимах климатических воздействий. Провод с равномерно распределенной нагрузкой рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы. Сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, шлейфов, отпаяк к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету. На примере пролета без натяжных гирлянд изоляторов рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой. Стрела провеса для эквивалентного провода определяется с помощью коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил. Составлено уравнение состояния, которое позволяет определить тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаяк. Приведена зависимость максимальной стрелы провеса от числа сосредоточенных сил. Дано определение коэффициенту сосредоточенных сил как отношению суммы сосредоточенных нагрузок к весу провода в пролете. Установлена связь между коэффициентами нагрузки, увеличения стрелы провеса и коэффициентом сосредоточенных сил. Выведены формулы определения погрешности замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета как функции от числа сосредоточенных сил и коэффициента сосредоточенных сил. Показано уменьшение погрешности при увеличении числа сосредоточенных сил. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гибкая нить, цепная линия, парабола, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

Для цитирования: 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. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107

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

Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load

Y. V. Bladyko¹⁾

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

Abstract. The objective of mechanical calculation of flexible wires of substations and overhead lines is to determine the sag and tension in different climatic conditions. A wire with a uniformly distributed load is considered as a homogeneous flexible thread having the form of a parabola. Concentrated loads from spacers, barrier balls, stubs, taps to electrical apparatus and other elements are replaced with the one distributed over the span. On behalf of a span without tension springs of insulators the action of concentrated loads on the wire is considered, an error is determined when replacing the concentrated forces with the one uniformly distributed along the span by the load. The sag for the equivalent wire is determined with the aid of the ratio of the increase of the sag, due to the presence of concentrated forces. An equation of state has been drawn up which makes it possible to determine the tension after changing the number of concentrated loads, e.g., after installing spacers, hanging the barrier balls, fixing the taps. The dependence of the maximum sag on the number of concentrated forces is given. The definition of the coefficient of concentrated forces as the ratio of the sum of the concentrated loads to the weight of the wire in the span is presented. A relationship between the load factors, the increase of the sag and the coefficient of concentrated forces is established. The formula has been deduced for determining the error in the replacement of concentrated forces by a uniformly distributed load along the span as a function of the number of concentrated forces and the coefficient of concentrated forces. A decrease in the error with an increase in the number of concentrated forces has been demonstrated. A more accurate calculation of mechanical tensions and sag is possible with the use of a vector-parametric method for calculating the flexible busbar of substations and air-line wires, where the design model of wires in the form of a flexible elastic thread is placed, taking into account the spatial disposition of all structural elements.

Keywords: sag, tension, flexible thread, chain line, parabola, equation of state, span, equivalent wire, load factor

For citation: Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 97–107. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107 (in Russian)

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных режимах климатических воздействий. Актуальная проблема современной электроэнергетики – проектирование РУ с уменьшенными габаритами и компактных ВЛ, что повышает требования к их расчету, обеспечению в любой точке пролета необходимых 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]. Цель статьи – определение погрешности такой замены.

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 различных 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 в местах примыкания равномерно распределенных нагрузок разной интенсивности 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. В 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).

В методике [1] уравнение состояния провода не отличается по структуре от обычного уравнения состояния, по которому рассчитываются провода ВЛ с равномерно распределенными нагрузками. Но для того чтобы уравнение было применимо для неоднородной нити, ее заменяют приведенной (эквивалентной) однородной нитью, что достигается путем введения приведенной (эквивалентной) равномерно распределенной по длине пролета нагрузки. Приведенная нагрузка определяется из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной приведенной нагрузкой длине комбинированной нити с распределенными нагрузками разной интенсивности и в общем случае также длине нити с 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 величин равномерно распределенной нагрузки для данного провода и коэффициента нагрузки.

В большинстве случаев трудоемкого непосредственного интегрирования по участкам можно воспользоваться приемом перемножения эпюр «балочных» поперечных сил – приемом Верещагина [2]. Могут быть использованы и другие приближенные способы [3, 4].

В статье на примере пролета без натяжных гирлянд изоляторов рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой.

Гибкая однородная нерастяжимая тяжелая нить с закрепленными концами в однородном гравитационном поле принимает форму цепной линии [5].

По уравнению цепной линии стрела провеса в середине пролета

$$f_0 = a \left[\operatorname{ch} \left(\frac{l}{2a} \right) - 1 \right],$$

где $a = H/q$; l – длина пролета; H – тяжение в проводе (горизонтальная составляющая); q – погонный вес провода.

Длина провода

$$L = 2a \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{l}{2a} \right).$$

Практически тот же результат дает сумма разложения гиперболической функции в степенной ряд (ряд Маклорена)

$$f_0 = \frac{l^2}{2^2 \cdot 2! \cdot a} + \frac{l^4}{2^4 \cdot 4! \cdot a^3} + \dots = \frac{ql^2}{8H} + \frac{q^3 l^4}{384H^3} + \dots$$

при длине провода

$$L = l + \frac{l^3}{2^2 \cdot 3! \cdot a^2} + \frac{l^5}{2^4 \cdot 5! \cdot a^4} + \dots = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2} + \frac{q^4 l^5}{1920H^4} + \dots$$

Учитывая, что для встречающихся на практике случаев $2a \gg l$, пользуются только первым слагаемым, соответствующим представлению провода параболой [1]:

$$f_0 = \frac{ql^2}{8H},$$

что дает погрешность порядка 0,2 %.

Длина провода определяется при этом как

$$L = l + \frac{q^2 l^3}{24H^2}.$$

Стрела провеса для эквивалентного провода

$$f_0 = \frac{ql^2 K_f}{8H},$$

где K_f – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием сосредоточенных сил, гирлянд изоляторов, распорок, заградительных шаров, отпаяк.

Длина эквивалентного провода

$$L = l + \frac{q^2 l^3 K^2}{24H^2},$$

где K – коэффициент нагрузки.

Расчетная модель пролета показана на рис. 1а.

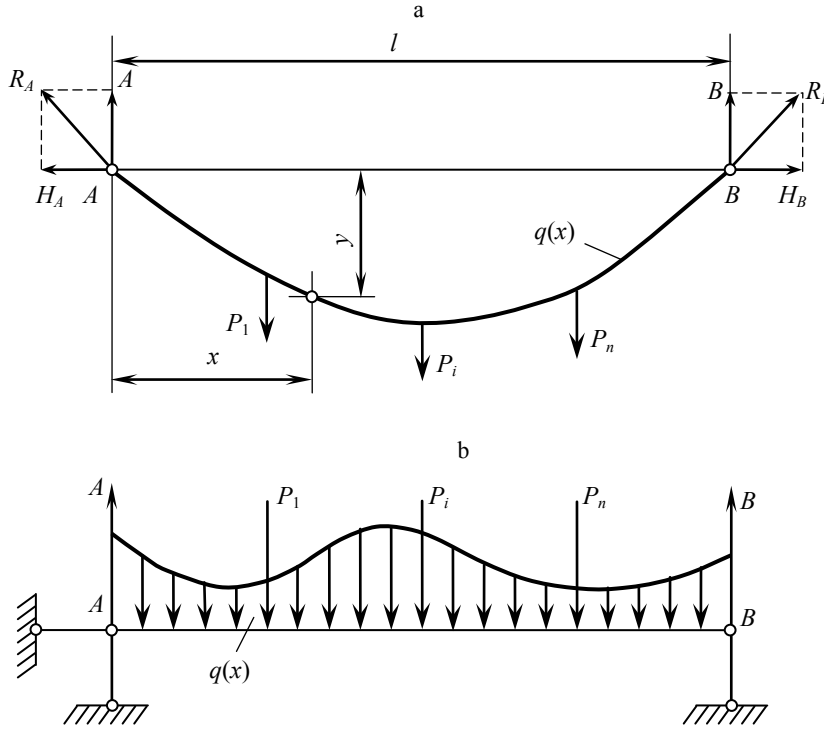


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – провод с вертикальными нагрузками, распределенными $q(x)$ и сосредоточенными P_i ; б – провод в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, нагруженной так же, как и провод

Fig. 1. Estimated span scheme: а – wire with vertical distributed loads $q(x)$ and concentrated loads P_i ; б – wire in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way as the wire

Вертикальные реакции A и B (рис. 1b) можно назвать балочными реакциями, как это принято, например, при определении вертикальных реакций трехшарнирной арки или вантовых систем [5].

Составим уравнение моментов относительно какого-нибудь произвольно выбранного сечения провода с координатами x и y от всех внешних сил, расположенных слева от этого сечения. Учитывая, что изгибающий момент в любом сечении провода (как гибкой нити) равен нулю, получим [1]

$$\sum M = Ax - \sum M_q - \sum M_p - Hy = 0,$$

где A – опорная балочная реакция; x, y – координаты провода; $\sum M_q$ – сумма моментов распределенных нагрузок; $\sum M_p$ – сумма моментов сосредоточенных сил.

Алгебраическая сумма моментов вертикальных сил, входящих в это равенство, численно равна изгибающему моменту, который возник бы в простой однопролетной балке с шарнирными опорами, нагруженной так же,

как провод. Обозначая этот балочный изгибающий момент через $M(x)$, получим

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

Так как $M(x)$ есть переменная величина балочного изгибающего момента в зависимости от абсциссы x , то по формуле (1) может быть определена стрела провеса в любом месте пролета.

В середине пролета $x = l/2$, и максимальная стрела провеса $f_0 = y = M(l/2)/H$.

Приведенная (эквивалентная) нагрузка $\hat{q} = qK$.

Напряжение в проводе $\sigma = H/F$, где F – площадь сечения провода.

Определив для всех режимов эквивалентные погонные \hat{q} и удельные $\hat{\gamma} = \hat{q}/F$ нагрузки, составляется уравнение состояния. При этом следует учитывать упругое и температурное удлинения провода на длине l_1 . Тогда получим разность длин провода в двух режимах, из которых один исходный (с индексом 0):

$$\Delta L = \frac{\hat{\gamma}^2 l_1^2}{24\sigma^2} - \frac{\hat{\gamma}_0^2 l_1^2}{24\sigma_0^2} = \frac{l_1}{E} (\sigma - \sigma_0) + \alpha l_1 (t - t_0),$$

откуда

$$\sigma - \frac{\hat{\gamma}^2 E l^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\hat{\gamma}_0^2 E l^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0), \quad (2)$$

где $\hat{\gamma} = \gamma K$; $\hat{\gamma}_0 = \gamma_0 K_0$; E – модуль упругости провода; α – коэффициент температурного удлинения провода; t – температура провода.

При неизменной температуре $t = t_0 = \text{const}$ уравнение состояния (2) можно записать в виде

$$H - \frac{q^2 l^2 E F K^2}{24H^2} = H_0 - \frac{q_0^2 l^2 E F K_0^2}{24H_0^2}.$$

Уравнение состояния позволяет определить тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаяк.

Коэффициент нагрузки при отсутствии натяжных гирлянд изоляторов и одинаковых высот подвеса проводов на опорах [1]

$$K^2 = 1 + 12 \left\{ \frac{1}{Ql^2} \sum_1^n P_i a_i b_i + \frac{1}{Q^2 l^2} \left[\sum_1^n P_i^2 a_i b_i + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \left(P_1 a_1 \sum_2^n P_i b_i + P_2 a_2 \sum_3^n P_i b_i + \dots + P_{n-2} a_{n-2} \sum_{n-1}^n P_i b_i + P_{n-1} a_{n-1} P_n b_n \right) \right] \right\},$$

где $Q = ql$ – вес провода в пролете без учета провиса; $a_i = li/(n+1)$ – расстояние до опоры A i -й сосредоточенной силы при их равномерной расстановке вдоль пролета; $b_i = l - a_i = l(n+1-i)/(n+1)$ – расстояние до опоры B i -й сосредоточенной силы; $P_i = P/n$ – вес i -й сосредоточенной нагрузки; P – суммарный вес всех сосредоточенных нагрузок; n – число сосредоточенных сил в пролете.

После подстановки получим

$$K^2(n) = 1 + 2 \frac{n+2}{n+1} K_p + \frac{n+2}{n} K_p^2,$$

где $K_p = P/Q$ – коэффициент сосредоточенных сил.

При большом числе сосредоточенных сил коэффициент нагрузки

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} K(n) = 1 + K_p. \quad (3)$$

После расчета опорных балочных реакций

$$A = B = (Q + P)/2 = Q(1 + K_p)/2$$

по (1) можно определить максимальную стрелу провеса

$$f_0(n) = \frac{1}{H} \left[\frac{ql^2}{8} + \frac{Pl}{4} - \frac{Pl}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{i}{n+1} \right) \right].$$

После упрощения получим

$$f_0(n) = \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}, \quad (4)$$

где

$$K_f(n) = 1 + K_p \left(1 + \frac{1}{n} \right).$$

При $n \rightarrow \infty$ провод можно считать загруженным распределенной нагрузкой $q + P/l = q(1 + K_p)$, т. е. коэффициент нагрузки $K = K_f(\infty) = 1 + K_p$, что подтверждает ранее полученное выражение (3).

При разных высотах точек подвеса провода стрелы провеса определяются тем же путем, что и при одинаковой высоте точек подвеса, так как формула балочных реакций в обоих случаях имеет одинаковую структуру, причем вес провода может быть принят с учетом уклона.

При совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок стрелы провеса и горизонтальные отклонения находят независимо в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по формуле (1).

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета ВЛ $l = 400$ м; провод 264/34 АCSR с погонным весом $q = 0,98$ даН/м,

площадью поперечного сечения $F = 297,8 \text{ мм}^2$, модулем упругости $E = 7400 \text{ даН/мм}^2$; тяжение $H = 1608 \text{ даН}$; суммарный вес сосредоточенных нагрузок в пролете $P = 35 \text{ даН}$. Рассматривался пролет без натяжных гирлянд изоляторов, с одинаковыми высотами подвеса, без ветра и гололеда, с неизменным тяжением. Для РУ длина пролета $l = 40 \text{ м}$. Зависимость максимальной стрелы провеса пролета ВЛ от числа сосредоточенных сил приведена на рис. 2, то же для пролета РУ – на рис. 3.

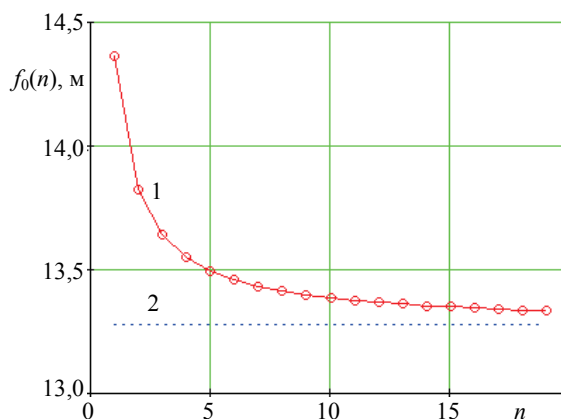


Рис. 2. Зависимость стрелы провеса пролета воздушной линии от числа сосредоточенных сил: 1 – расчет по формуле (4); 2 – стрела провеса эквивалентного провода

Fig. 2. Dependence of the boom of the sag of overhead line span sag on the number of concentrated forces: 1 – calculation by the formula (4); 2 – boom of the sag of the equivalent cable

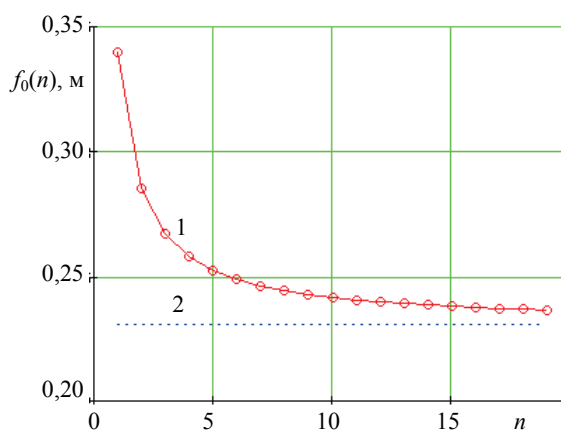


Рис. 3. Зависимость стрелы провеса пролета распределительного устройства от числа сосредоточенных сил: 1 – расчет по формуле (4); 2 – стрела провеса эквивалентного провода

Fig. 3. Dependence of the boom of the sag span of the switchgear on the number of concentrated forces: 1 – calculation by the formula (4); 2 – boom of the sag of the equivalent cable

Как видно из рис. 2, наибольшая абсолютная погрешность при $n = 1$ составляет около одного метра, что не позволительно для проектирования.

Для частного случая, когда в середине пролета действует одна сосредоточенная сила, стрела провеса

$$f_0 = \frac{1}{H} \left[\frac{ql + P}{2} \cdot \frac{l}{2} - \frac{ql^2}{8} \right] = \frac{ql^2 K_f}{8H},$$

где

$$K_f = 1 + 2K_p.$$

Коэффициент нагрузки при одной сосредоточенной силе в середине пролета определяется по формуле

$$K^2 = 1 + 3 \frac{P}{ql} + 3 \left(\frac{P}{ql} \right)^2 = 1 + 3K_p(1 + K_p).$$

Относительная погрешность от замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета

$$\delta_f = \frac{f_0(\infty) - f_0(n)}{f_0(n)} = \frac{\frac{ql^2(1 + K_p)}{8H} - \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}}{\frac{ql^2 K_f(n)}{8H}} = - \frac{1}{1 + n \left(1 + \frac{1}{K_p} \right)}. \quad (5)$$

Как следует из рис. 2, погрешность от замены $n = 1$ сосредоточенной силы равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета ВЛ составляет 7,5 %, при $n = 3$ – до 2,7 %, при $n = 5$ – до 1,6 %, при $n = 7$ – до 1,2 %. Для пролета РУ (рис. 3) при $n = 1$ погрешность возрастает до 32 %. Таким образом, самые большие погрешности замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой будут при их малом числе. Выражение (5) позволяет оценить погрешность при любом числе сосредоточенных сил n и коэффициенте K_p .

При наличии натяжных гирлянд изоляторов, а также при учете ветровой нагрузки погрешность возрастает из-за искажения формы системы «гирлянды изоляторов – провод», отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [6] показано увеличение погрешности с ростом длины гирлянды изоляторов. Наличие отпаек требует учета их реального расположения в РУ. Методика [1] может быть распространена на пролеты с гирляндами изоляторов, заградительными шарами, ветром, гололедом. Однако погрешность замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой возрастает.

Более точный расчет механических напряжений возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки РУ и проводов ВЛ, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити [6–8].

Дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие статику гибкой упругой нити [6], являются нелинейными. Их численное решение производится разностным методом с помощью ЭВМ [8–10]. Система конечно-разностных уравнений решается на основе вложенных друг в друга итераций: относительно координат, тяжения или длины провода. При наличии сосредоточенных нагрузок в виде ответвлений к электрическим аппаратам добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам РУ. Эти координаты являются функцией тяжения в отпайке, а оно в свою очередь зависит от положения провода. Произвольное расположение отпайек дает составляющие сосредоточенных сил, действующие во всех направлениях. Как показано в [6], расхождение результатов по [1] можно снизить при более точном задании этих составляющих. Разработанная программа позволяет учесть до трех отпайек, до двух шлейфов и гирлянд изоляторов, в то время как методика [1] дает при малом числе сосредоточенных нагрузок наибольшую погрешность.

ВЫВОДЫ

1. Дано определение коэффициенту сосредоточенных сил K_p как отношению суммы сосредоточенных нагрузок к весу провода в пролете.
2. Установлена связь между коэффициентом нагрузки K и коэффициентом сосредоточенных сил K_p .
3. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса K_f , обусловленным наличием сосредоточенных нагрузок, и коэффициентом сосредоточенных сил K_p .
4. Выведены формулы определения погрешности замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета как функции от числа сосредоточенных сил n и коэффициента сосредоточенных сил K_p . Показано уменьшение погрешности при увеличении числа сосредоточенных сил n .
5. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

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. Розанов, Г. Н. Некоторые вопросы расчета механической части воздушных линий / Г. Н. Розанов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. 224 с.
4. Тер-Мкртчян, Л. Н. Механический расчет проводов для открытых подстанций / Л. Н. Тер-Мкртчян // Электричество. 1935. № 4. С. 35–45.

5. Глазунов, А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Т. 1: Работа и расчет проводов и тросов / А. А. Глазунов. М; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.
6. 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.
7. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
8. Стрелюк, М. И. Расчет на ЭВМ статики гибкой ошиновки РУ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Научные и прикладные проблемы энергетики: межвед. сб. Вып. 12. Минск: Вышэйш. шк., 1985. С. 75–79.
9. Стрелюк, М. И. Программа механического расчета гибкой ошиновки РУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Инв. № ГосФАП – П007594, инв. № РФАП БССР – 00143. Минск, 1984. 12 с.
10. 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 28.11.2017 Подписана в печать 05.02.2018 Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and of Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energia Publ. 248 (in Russian).
2. Kachurin V. K. (1956) *Flexible Threads with Small Sags*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 224 (in Russian).
3. Rozanov G. N. (1954) *Some Issues of Calculating the Mechanical Part of Air Lines*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 224 (in Russian).
4. Ter-Mkrtchan L. N. (1935) Mechanical Calculation of Wires for Open Substations. *Elektrichestvo [Electricity]*, (4), 35–45 (in Russian).
5. Glazunov A. A. (1956) *Fundamentals of the Mechanical Part of Overhead Transmission Lines. Vol. I. Work and Calculation of Wires and Cables*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 192 (in Russian).
6. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (8), 8–14 (in Russian).
7. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Analysis of the Effect of Ice-Wind and Electrodynamical Loads in Spans with Arbitrary Arrangement of Wires. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Yu. V. (1985) Calculation on the Computer of Statics of a Flexible Busbars of the Switchgear. *Scientific and Applied Problems of Power Engineering*. Minsk, Vysheishaya Shkola [Higher School] Publ., (12), 75–79 (in Russian).
9. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Yu. V. (1984) *Program of Mechanical Calculation of the Flexible Busbars of the Switchgear in Various Types of Climatic Influences*. Accession Number GosFAP – P007594, Accession Number of RFAP of the BSSR – 00143. Minsk. 12 (in Russian).
10. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Plants of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii* [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions], (3–4), 21–29 (in Russian).

Received: 28 November 2017 Accepted: 5 February 2018 Published online: 30 March 2018