

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514>

УДК 621.315.176

## **Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок**

**Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу, зависит от угла между направлением ветра и осью воздушной линии. В методике механического расчета проводов и тросов ветер рекомендуется принимать направленным под углом  $90^\circ$  к оси пролета и не сказано, с какой стороны дует ветер. Для пролетов воздушных это не так важно, как для пролетов распределительных устройств, где отклонения проводов зависят от направления действия отпаяк к электрическим аппаратам. В статье рассматриваются различные варианты расположения отпаяк и их действие на токопровод, а также изменение направления ветра. Приведен алгоритм расчета горизонтального отклонения гибкого провода и коэффициентов его увеличения при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок, обусловленных действием ветра на распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам и другие конструктивные элементы распределительных устройств и воздушных линий. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк. Выведены формулы расчета горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния при наличии горизонтальных сосредоточенных сил, действующих в любых направлениях. Получены результаты механического расчета для случаев одной и двух горизонтальных сосредоточенных сил, по-разному ориентированных относительно ветровой распределенной нагрузки. Рекомендуется в проектной практике принимать направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки. Снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил. При отсутствии ветра предлагается пользоваться формулами расчета горизонтальных отклонений и нагрузки после нахождения произведений коэффициента увеличения горизонтальных отклонений и горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки на погонную нагрузку.

**Ключевые слова:** горизонтальное отклонение, тяжение, гибкий провод, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, отпайка, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514>

---

### **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](mailto: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](mailto:eie@bntu.by)

---

## Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads

Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The linear wind load on the wires and cables acting perpendicular to the wire depends on the angle between the direction of the wind and the axis of the overhead line. In the methodology of mechanical calculation of wires and cables, it is recommended to take the wind directed at an angle of 90° to the axis of span and it is not specified which side the wind blows from. For spans of air, this is not so much significant as for switchgear spans, where the deviations of the wires depend on the direction of action of the taps to the electrical apparatus. The article discusses various options for the location of taps and their effect on the wire, as well as changing the direction of the wind. An algorithm for calculating the horizontal deviation of a flexible wire and its increase coefficients in the presence of horizontal concentrated loads due to the action of wind on spacers, barriers, taps to electrical apparatuses and other structural elements of substations and overhead lines is given. In the absence of wind, horizontal concentrated loads and deviations occur when an arrangement of the taps is non-keel. The formulas for calculating the horizontal component of the load coefficient to solve the equation of state in the presence of horizontal concentrated forces acting in any direction have been derived. The results of the mechanical calculation are obtained for the cases of one and two horizontal concentrated forces, differently oriented with respect to the distributed wind load. In design practice it is recommended to take the wind flow in the direction of the action of horizontal concentrated forces, since in this case the greatest horizontal deviations and load factors are obtained. The reduction in the coefficients of the horizontal load occurs when the current lead is unloaded because of the opposite directions of the wind and horizontal concentrated forces. In the absence of wind, it is proposed to use the formulas for calculating horizontal deviations and load after finding the product of the coefficient of increase in horizontal deviations and the horizontal component of the coefficient of load per linear load.

**Keywords:** horizontal deviation, tension, flexible wire, insulator strings, equation of state, span, tap, load factor

**For citation:** Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514> (in Russian)

### Введение

Задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) является определение стрел провеса и тяжений в различных климатических режимах. Провод с равномерно распределенной нагрузкой рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая очертание параболы [1]. Стрела провеса для эквивалентного провода определяется с помощью коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием сосредоточенных сил [2]. Составлено уравнение состояния, которое позволяет рассчитать тяжение после изменения числа сосредоточенных нагрузок, например после установки распорок, подвешивания заградительных шаров, крепления отпаек к электрическим аппаратам. В [2] 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. На примере пролета с натяжными гирляндами изоляторов в [3] рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой с учетом разных высот подвеса проводов и действия горизонтальных нагрузок. В [4, 5] исследуется механический расчет гибких проводов пролета ВЛ, в котором устанавливаются заградительные шары. Приведены формулы определения стрел провеса при различном числе заградительных шаров как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При этом учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Получены уравнения состояния, учитывающие весовые и ветровые нагрузки на провод, а также коэффициенты нагрузки в двух плоскостях, зависящие от числа заградительных шаров.

В [6] рассматривается механический расчет гибких проводов пролетов ВЛ и РУ, в которых устанавливаются дистанционные внутрифазные или междуфазные распорки как сосредоточенные нагрузки, действующие на расщепленную фазу. Предложены формулы определения стрел провеса при различном числе распорок как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При вычислениях принимаются во внимание разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Эти формулы, представленные в удобном для потребителей виде, могут быть использованы для компьютерной реализации механического расчета гибких проводов ВЛ и РУ в различных климатических режимах как при наличии, так и при отсутствии расщепления. Показаны погрешности замены распорок распределенной нагрузкой.

В проектной практике встречаются решения, когда в одном пролете используются различные натяжные гирлянды изоляторов. В [7] приведен расчет стрел провеса и коэффициентов нагрузки для пролета с двумя разными натяжными гирляндами изоляторов при одинаковой высоте подвеса. Система «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов» описана уравнениями параболы. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса и коэффициентами, учитывающими наличие натяжных гирлянд изоляторов. Полученная компактная формула коэффициента увеличения стрелы провеса подходит в общем случае для любого сочетания гирлянд в пролете. Показано совпадение расчета для частных случаев, известных из литературных источников. Представлена формула расчета коэффициента нагрузки для уравнения состояния, учитывающая наличие разных гирлянд в пролете. Ее достоверность доказана совпадением результатов для частных случаев расположения гирлянд.

В [8] выведены формулы для кривой провисания провода при наличии одной или нескольких сосредоточенных сил и при различных натяжных гирляндах изоляторов в пролете. Получены формулы для нахождения рас-

стояния до максимальной стрелы провеса, а также 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. 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.

Численному методу механического расчета гибких токопроводов РУ и ВЛ посвящены статьи [9–11]. Разработанная компьютерная программа позволяет учитывать до трех отпаяк, принимая во внимание их реальное расположение в 12 климатических режимах, строить монтажные кривые, определять начальный режим исходя из наибольших нагрузок.

Цель статьи – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при горизонтальных сосредоточенных нагрузках. Они появляются при действии ветра на конструктивные элементы РУ и ВЛ: распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и, следовательно, отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк.

В [12] показано, что нормативная погонная ветровая нагрузка на провода и тросы, действующая перпендикулярно проводу (тросу), зависит от угла  $\varphi$  между направлением ветра и осью ВЛ. Причем в методике механического расчета проводов и тросов ветер рекомендуется принимать направленным под углом  $90^\circ$  к оси ВЛ и не сказано, с какой стороны дует ветер. Для пролетов ВЛ это не так важно, как для пролетов РУ, где отклонения проводов зависят от направления действия отпаяк. В статье рассматриваются различные варианты расположения отпаяк и их действие на токопровод, а также изменение направления ветра.

Расчетная схема горизонтальной проекции пролета представлена на рис. 1. Показано положительное направление скорости ветра  $v$ , совпадающее с направлением горизонтальной оси  $z$ . Ветровые нагрузки действуют на провод и гирлянды изоляторов с силой:

$$Q_{z1} = q_z l_1; \quad Q_{zr1} = q_{zr1} l_{r1}; \quad Q_{zr2} = q_{zr2} l_{r2},$$

где  $q_z$  – погонная горизонтальная нагрузка проводов фазы;  $q_{zr1}$ ,  $q_{zr2}$  – то же первой и второй гирлянд изоляторов;  $l$  – длина пролета;  $l_{r1}$ ,  $l_{r2}$  – то же первой и второй натяжных гирлянд изоляторов;  $l_1 = l - l_{r1} - l_{r2}$ .

В горизонтальной плоскости действуют  $n$  сосредоточенных усилий  $P_{zi}$  ( $i = 1 \dots n$ ) от распорок, заградительных шаров или отпаяк к электрическим аппаратам.

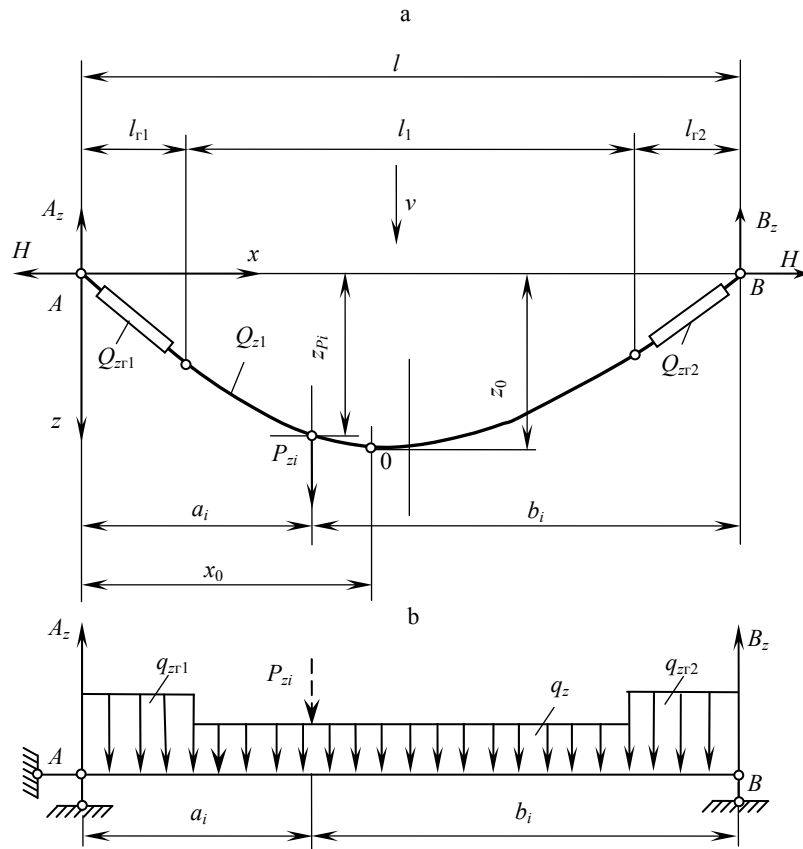


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с горизонтальными нагрузками от провода  $q_z$ , гирлянд изоляторов  $q_{zr1}$ ,  $q_{zr2}$  и с горизонтальными сосредоточенными силами  $P_{zi}$ ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, нагруженной так же

Fig. 1. The estimated span scheme: а – span with horizontal loads of the wire  $q_z$ , insulator strings  $q_{zr1}$ ,  $q_{zr2}$  and horizontal concentrated forces  $P_{zi}$ ;

б – span in the form of a simple split beam with hinged supports, loaded in the same way

### Расчет горизонтальных отклонений при наличии сосредоточенных сил в пролете

Отклонения провода в двух плоскостях находятся независимо друг от друга. Полученные в [2–8] выражения могут применяться и для горизонтальных составляющих нагрузок. В [8] выведена формула для оценки коэффициента увеличения стрелы провеса в вертикальной плоскости. Для горизонтальной плоскости при равномерно распределенных вдоль пролета одинаковых по величине и направлению сосредоточенных нагрузках коэффициент увеличения можно записать так:

$$K_{fz} = \frac{1 + 2\delta_{z1} + 2\delta_{z2} + (\delta_{z1} - \delta_{z2})^2 + K_{Pz}(1 + 1/n)}{\cos \theta},$$

где  $\delta_{z1} = (K_{z1} - 1)K_{r1}^2$ ,  $\delta_{z2} = (K_{z2} - 1)K_{r2}^2$  – коэффициенты, учитывающие наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов при действии на

них ветровой нагрузки;  $K_{z1} = \frac{q_{zr1}}{q_z}$ ,  $K_{z2} = \frac{q_{zr2}}{q_z}$  – кратности горизонтальных погонных нагрузок первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно горизонтальной погонной нагрузки 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;  $K_{Pz} = \frac{P_z \cos \theta}{q_z l}$  – коэффициент горизонтальных сосредоточенных сил;  $P_z = \sum_{i=1}^n P_{zi}$  – суммарная сила  $n$  горизонтальных сосредоточенных нагрузок;  $\theta$  – угол наклона пролета ( $\operatorname{tg} \theta = h/l$ );  $h$  – разность высот подвеса проводов.

Максимальное горизонтальное отклонение в этом случае рассчитывается как

$$z_0 = \frac{q_z K_{fz} l^2}{8H}, \quad (1)$$

где  $K_{fz}$  – коэффициент увеличения горизонтального отклонения;  $H$  – горизонтальная проекция тяжения в проводе.

Коэффициент увеличения отклонения, обусловленный наличием натяжных гирлянд и горизонтальных сосредоточенных сил, определяется по выражению

$$K_{fz} = \frac{8Hz_0}{q_z l^2}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ( $q_z = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_{fz}$

$$q_z K_{fz} = \frac{8Hz_0}{l^2}. \quad (2)$$

Результирующая стрела провеса в наклонной плоскости рассчитывается после нахождения составляющих в обеих плоскостях [5].

### Расчет коэффициента нагрузки при наличии горизонтальных и вертикальных нагрузок в пролете

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

$$L = l + \frac{l^2 l_1 \left[ (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2 \right]}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (3)$$

где интеграл  $D$  рассчитывается как:

$$D = D_y + D_z; D_y = \frac{l^2 l_1 (q_y K_y)^2}{12}; D_z = \frac{l^2 l_1 (q_z K_z)^2}{12},$$

$K_y, K_z$  – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок, определяемый для двух плоскостей:

$$K_y^2 = \frac{12 D_y}{q_y^2 l^2 l_1}; K_z^2 = \frac{12 D_z}{q_z^2 l^2 l_1}.$$

При отсутствии горизонтальных распределенных нагрузок ( $q_z = q_{zr1} = q_{zr2} = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_z$

$$q_z K_z = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{12 D_z}{l_1}}. \quad (4)$$

При известных конфигурациях приложения распределенных и сосредоточенных сил интеграл определяется в общем виде по формулам:

$$D_y = \int_0^l Q_y^2(x) dx; D_z = \int_0^l Q_z^2(x) dx,$$

где  $Q_y(x), Q_z(x)$  – балочная поперечная сила в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

### Расчет горизонтальных отклонений при наличии двух сосредоточенных сил в пролете

Пусть в пролете действуют две горизонтальные сосредоточенные силы. Тогда опорные балочные реакции в горизонтальной плоскости определяются по формулам:

$$A_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr1} - q_z) l_{r1} + \frac{q_z c - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^2 P_{zi} b_i}{l};$$

$$B_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr2} - q_z) l_{r2} - \frac{q_z c - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^2 P_{zi} a_i}{l},$$

где  $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$ ;  $d = q_{zr1} l_{r1}^2 - q_{zr2} l_{r2}^2$ ;  $P_{zi}$  – сила  $i$ -й сосредоточенной нагрузки, действующая в горизонтальной плоскости;  $a_i, b_i$  – расстояния до  $i$ -й сосредоточенной силы  $P_{zi}$  от опор  $A$  и  $B$ .

Для построения зависимости горизонтальных отклонений от координаты  $x$  определим  $z(x)$  на всех участках:

$$z_1(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - \frac{q_{zr1} x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1};$$

$$z_2(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a_1;$$

$$z_3(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} - P_{z1} (x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

$$z_4(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^2 P_{zi} (x - a_i) \right] \\ \text{при } a_2 < x \leq l - l_{r2};$$

$$z_5(x) = \frac{1}{H} \left[ A_z x - q_{zr1} l_{r1} \left( x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - q_z l_1 \left( x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - \right. \\ \left. - q_{zr2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - \sum_{i=1}^2 P_{zi} (x - a_i) \right] \text{ при } l - l_{r2} < x \leq l.$$

Для случаев расположения максимального отклонения провода на разных участках расстояние до него рассчитывается по формулам:

$$x_{z0} = \frac{A_z}{q_{zr1}} \text{ при } 0 \leq x_{z0} \leq l_{r1}; \quad x_{z0} = \frac{A_z - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_{z0} \leq a_1;$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - P_{z1} - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } a_1 < x_{z0} \leq a_2;$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - \sum_{i=1}^2 P_{zi} - q_{zr1} l_{r1}}{q_z} + l_{r1} \text{ при } a_2 < x_{z0} \leq l - l_{r2};$$

$$x_{z0} = \frac{A_z - \sum_{i=1}^2 P_{zi} - q_z l_1 - q_{zr1} l_{r1}}{q_{zr2}} + l - l_{r2} \text{ при } l - l_{r2} < x_{z0} \leq l.$$

После нахождения расстояния до максимального отклонения последнее можно рассчитать по формуле  $z_0 = z(x_{z0})$ . Если не выполняются вышеприведенные неравенства, то максимальное горизонтальное отклонение провода будет находиться в точке приложения одной из сосредоточенных сил  $x_{z0} = a_i$ , дающей  $z_0 = \max [z(a_i)]$ .



При отсутствии ветра ( $q_z = 0$ ) лучше пользоваться формулой нахождения произведения  $q_z K_{fz}$ , тогда максимальное отклонение без проблем определяется по (1).

### Расчет коэффициента горизонтальной нагрузки при наличии двух сосредоточенных сил

Интеграл  $D_z$  для формулы (3)

$$D_z = \int_0^{l_{r1}} Q_1^2(x) dx + \int_{l_{r1}}^{a_1} Q_2^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_3^2(x) dx + \int_{a_2}^{l-l_{r2}} Q_4^2(x) dx + \int_{l-l_{r2}}^l Q_5^2(x) dx,$$

где  $Q_1(x)$ – $Q_5(x)$  – балочная поперечная сила соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде:

$$Q_1(x) = A_z - q_{zr1}x;$$

$$Q_2(x) = A_z - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_3(x) = A_z - P_{z1} - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_4(x) = A_z - P_{z1} - P_{z2} - q_{zr1}l_{r1} - q_z(x - l_{r1});$$

$$Q_5(x) = A_z - P_{z1} - P_{z2} - q_{zr1}l_{r1} - q_z l_1 - q_{zr2}(x - l + l_{r2}).$$

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета  $l = 80$  м, провод 264/34 ACSR подвешен на одинаковой высоте, тяжешие  $H = 1000$  даН, длины натяжных гирлянд изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м. Рассматривалось влияние на горизонтальные отклонения и составляющую коэффициента нагрузки горизонтальных сосредоточенных нагрузок, расположенных на расстоянии  $a_1 = 25$  м и  $a_2 = 55$  м от начала пролета. Результаты расчета приведены на рис. 2 и в табл. 1.

Как видно из расчетов, расстояние до максимального горизонтального отклонения зависит от расположения и направления сосредоточенных сил, их величины, а также от различия натяжных гирлянд изоляторов. При отсутствии ветра (рис. 2а, б) наибольшее горизонтальное отклонение наблюдается в точках приложения сосредоточенных сил. Для одинаковых гирлянд изоляторов в случае сонаправленного действия ветра и сосредоточенных сил максимальное горизонтальное отклонение будет близко к центру пролета (рис. 2с). При совпадении направления ветра и одной из сосредоточенных сил максимальное горизонтальное отклонение будет близко к точке приложения последней (рис. 2е, ф, г). При встречном действии ветра и сосредоточенных сил максимум отклонения приходится на точку их приложения (рис. 2д). В остальных случаях отклонение зависит от сочетания исходных данных (рис. 2h).

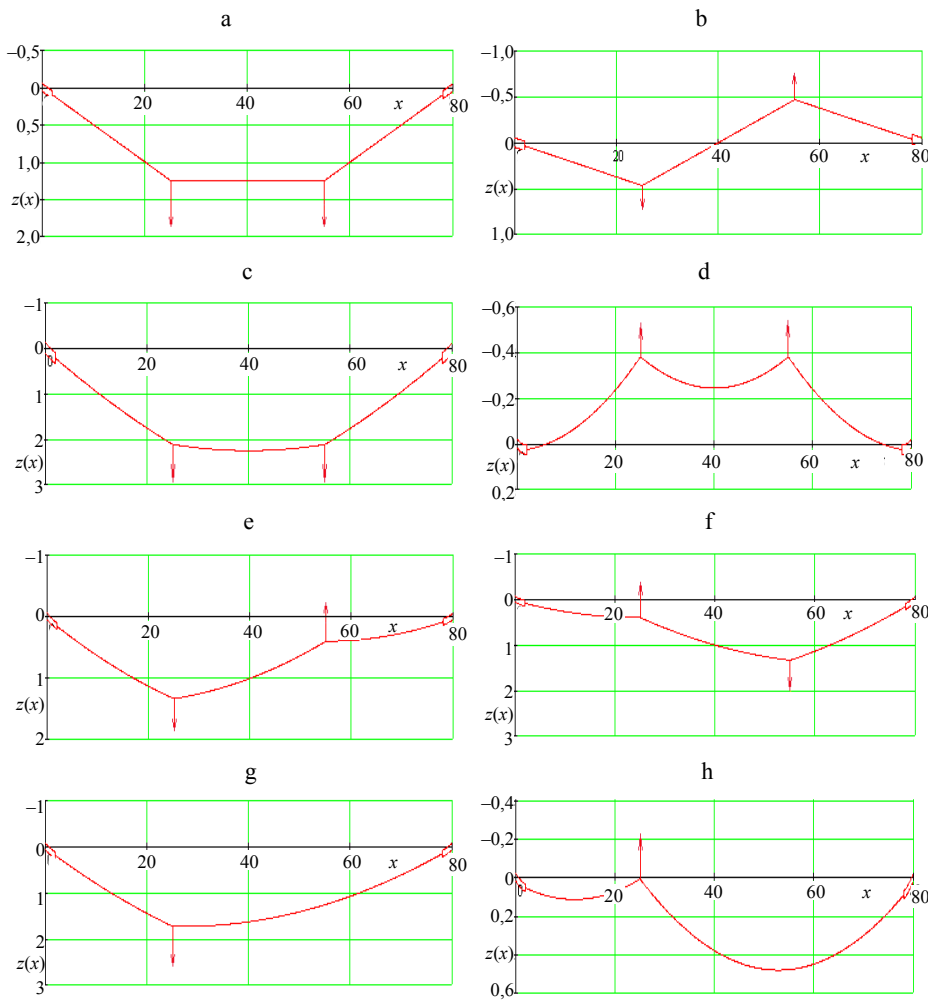


Рис. 2. Кривые горизонтальных отклонений провода в пролете длиной  $l = 80$  м с натяжными гирляндами изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м, горизонтальными сосредоточенными силами  $P_{zi} = 50$  даН и тяжением  $H = 1000$  даН: а, б – без ветра; с–h – с ветровой нагрузкой на провод  $q_z = 1,22$  даН/м и гирлянды изоляторов  $q_{zr} = q_{zr1} = q_{zr2} = 16,3$  даН/м

Fig. 2. The curves of horizontal deviations of a wire in a span of length  $l = 80$  m with tensioning insulators strings  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  m, horizontal concentrated forces  $P_{zi} = 50$  daN and tension  $H = 1000$  daN: а, б – without wind; с–h – in the presence of a wind load  $q_z = 1.22$  daN/m and insulator strings  $q_{zr} = q_{zr1} = q_{zr2} = 16.3$  daN/m

Максимальное горизонтальное отклонение зависит от параметров пролета и нагрузки, а также от направления ветра. При отсутствии ветра отклонение по формуле (1) можно найти, если известно произведение  $q_z K_{\beta}$  (значение в табл. 1 дано в скобках). Наибольшее горизонтальное отклонение происходит для пролетов с распорками и заградительными шарами, а также при совпадении направления ветра и сосредоточенных сил от отпаяк (рис. 2с), наименьшее – при силах от отпаяк, противоположных направлению ветра (рис. 2д). При разнонаправленных силах от отпаяк (рис. 2е, f) коэффициент увеличения горизонтального отклонения при-

нимает промежуточные значения. При изменении горизонтальной силы от отпаяк, направленной в противоположную ветру сторону, отклонение может изменить знак (табл. 1, пп. 11, 13).

Таблица 1

**Результаты механического расчета гибких токопроводов  
при различных горизонтальных нагрузках  
The results of mechanical calculation of flexible wires  
at various horizontal loads**

№ пп	Рисунок	Скорость ветра, м/с	Горизонтальная нагрузка на провод $q_z$ , даН/м	Горизонтальная нагрузка на гирлянду $q_{z1}$ , даН/м	Горизонтальная сила от отпайки $R_{z1}$ , даН	Горизонтальная сила от отпайки $R_{z2}$ , даН	Коэффициент горизонтальных сосредоточенных сил $K_{pz}$ ( $q_z K_{pz}$ )	Расстояние до максимального отклонения по горизонтали $x_{z0}$	Коэффициент увеличения горизонтального отклонения $K_z$ ( $q_z K_z$ )	Горизонтальная составляющая коэффициента нагрузки $K_z$ ( $q_z K_z$ )
1	Рис. 2а	0	0	0	50	50	(1,250)	25–55	(1,563)	(1,756)
2	–				–50	–50	(–1,250)	25–55	(–1,563)	(1,756)
3	Рис. 2б				50	–50	(0)	25 и 55	(0,586)	(1,075)
4	–				50	0	(0,625)	25	(1,074)	(1,030)
5	–				100	0	(1,250)	25	(2,148)	(2,059)
6	Рис. 2с	30	1,22	16,3	50	50	1,025 (1,250)	40	2,312 (2,821)	2,474 (3,018)
7	Рис. 2д				–50	–50	–1,025 (–1,250)	25 и 55	–0,390 (–0,476)	0,600 (0,732)
8	Рис. 2е				50	–50	0	25	1,371 (1,673)	1,395 (1,702)
9	Рис. 2ф				–50	50	0	55	1,371 (1,673)	1,395 (1,702)
10	Рис. 2г				50	0	0,512 (0,625)	27	1,774 (2,164)	1,822 (2,223)
11	Рис. 2и				–50	0	–0,512 (–0,625)	53	0,493 (0,602)	0,664 (0,810)
12	–				100	0	1,025 (1,250)	25	2,651 (3,234)	2,626 (3,204)
13	–				–100	0	–1,025 (–1,250)	25	–0,871 (–1,063)	1,066 (1,301)
14	–	–30	–1,22	–16,3	50	50	–1,025 (1,250)	25	0,390 (0,476)	0,600 (0,732)
15	–				–50	–50	1,025 (–1,250)	40	–2,312 (–2,821)	2,474 (3,018)
16	–				50	–50	0	55	–1,371 (–1,673)	1,395 (1,702)

**Примечание.** Знак «минус» означает направление, противоположное принятому положительному направлению горизонтальной оси  $z$ .

Горизонтальная составляющая коэффициента нагрузки также зависит от параметров провода и гирлянд изоляторов, на нее влияют климатические условия и направление ветра. При отсутствии ветра ее можно найти после определения произведения  $q_z K_z$  по формуле (4) (в табл. 1 значение дано в скобках). Максимальное значение будет для пролетов с распорками и заградительными шарами, а также при совпадении направления ветра и сосредоточенных сил от отпаяк (табл. 1, пп. 6, 12, 15). В случае безветрия – при направлении сосредоточенных сил в одну сторону (табл. 1, пп. 1, 2). При воздействии сосредоточенных сил в противоположном действии ветра направлении токопровод разгружается (табл. 1, пп. 7, 11, 14). То же в безветрие при разнонаправленных силах (табл. 1, п. 3). Коэффициент нагрузки принимает промежуточные значения при разнонаправленных силах от отпаяк и ветре (табл. 1, пп. 8, 9, 16).

На рис. 3 представлена зависимость произведений  $q_z K_{fz}$  и  $q_z K_z$  от произведения коэффициента горизонтальных сосредоточенных сил на погонную нагрузку на провод  $q_z K_P$  при одной горизонтальной сосредоточенной силе в середине пролета при наличии ветра и без него. Они представляют практически пропорциональную зависимость от сосредоточенной силы, небольшое отклонение от прямой связано с изменением местоположения максимальной стрелы провеса при встречных распределенных ветровых и сосредоточенной нагрузках (рис. 3а). V-образные характеристики коэффициентов нагрузки также объясняются разгрузкой токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальной сосредоточенной силы (рис. 3б).

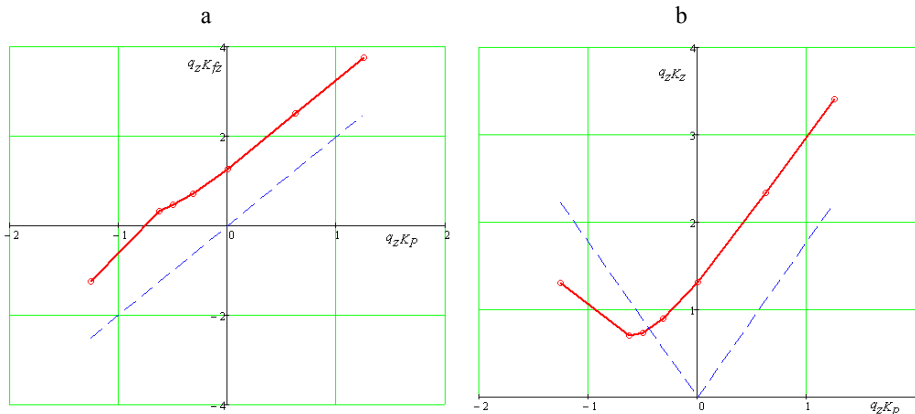


Рис. 3. Зависимость коэффициентов увеличения горизонтальных отклонений (а) и нагрузки (б) провода от коэффициента сосредоточенных сил в пролете длиной  $l = 80$  м, тяжением  $H = 1000$  даН, с натяжными гирляндами изоляторов  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  м при одной горизонтальной сосредоточенной силе в середине пролета: синяя штриховая линия – без ветра; красная сплошная – с ветровой нагрузкой на провод  $q_z = 1,22$  даН/м и гирлянды изоляторов  $q_{z1} = q_{z1} = q_{z2} = 16,3$  даН/м

Fig. 3. Dependence of the coefficients of increase in horizontal deviations (a) and load (b) on the wire on the coefficient of concentrated forces in a span of length  $l = 80$  m, tension  $H = 1000$  daN, with tensioning insulator strings  $l_{r1} = l_{r2} = 2$  m when there is one horizontal concentrated force in the middle of the span: blue dashed line – without wind; solid red line – with wind load on the wire  $q_z = 1.22$  daN/m and on insulator strings  $q_{z1} = q_{z1} = q_{z2} = 16.3$  daN/m

## ВЫВОДЫ

1. Выведены формулы горизонтального отклонения гибкого провода и коэффициентов его увеличения при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок, обусловленных действием ветра на распорки, заградительные шары, отпайки к электрическим аппаратам и другие конструктивные элементы РУ и ВЛ. При отсутствии ветра горизонтальные сосредоточенные нагрузки и отклонения возникают при некилевом расположении отпаяк.

2. Выведены формулы расчета горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки для решения уравнения состояния в случае разных гирлянд в пролете при наличии горизонтальных сосредоточенных сил, действующих в любых направлениях.

3. Получены результаты механического расчета для случаев одной и двух горизонтальных сосредоточенных сил, по-разному ориентированных относительно ветровой распределенной нагрузки.

4. Рекомендуется в проектной практике принимать направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки. Снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил.

5. При отсутствии ветра формулами (1) и (3) можно пользоваться после нахождения произведений  $q_z K_{fz}$  и  $q_z K_z$  по (2) и (4).

## 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. заведений 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, № 2. С. 107–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-107-114>.

- ведений 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. 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>.
  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. Закопане, 1988. 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. Lublin, 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.
  12. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339–2011 (02230). Введ. 01.12.2011. Минск: Минэнерго, 2011. 593 с.

Поступила 25.02.2020 Подписана в печать 28.04.2020 Опубликовано онлайн 30.11.2020

## REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energiya 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 Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107> (in Russian).
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian).
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 Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309> (in Russian).
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*

- Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 24–36. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36> (in Russian).
6. Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Switchgears. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231> (in Russian).
  7. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tensioning Insulator Strings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 55–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65> (in Russian).
  8. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires Loaded with Concentrated Loads. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115> (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. *Matematicheskie Metody v Elektroenergetike: Materialy II Mezhdunar. Simpoz. Zakopane, 10–12 Noyab. 1988* [Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Zakopane, 10–12 Nov. 1988]. Zakopane, 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 Educational Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).
  12. TCP 339–2011 (02230) (2011). *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Air Transmission Lines and Current Wires, Distribution and Transformer Substations, Electric and Battery Power Plants, Electrical Installations for Residential and Public Buildings. Rules of the Implementation and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Testing.* Minsk, Minenergo Publ. 593 (in Russian).