

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-109-120>

УДК 621.315.176

## Механический расчет гибких токопроводов с учетом отпайк к электрическим аппаратам

Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>, Е. Г. Пономаренко<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Предложена методика механического расчета гибких проводов распределительного устройства при наличии одной отпайки к электрическому аппарату, расположенной в середине пролета, с учетом ее реального расположения. Принимаются во внимание наличие натяжных гирлянд изоляторов, разные высоты подвеса проводов. Нагрузки на токопровод и отпайку зависят от климатического режима, ветровых и гололедных условий, а также изменения температуры. Переход к другому климатическому режиму выполняется решением уравнения состояния с учетом коэффициентов горизонтальной и вертикальной нагрузки данного и исходного режимов. Приводятся формулы для определения коэффициентов нагрузки, учитывающих весовые, ветровые и гололедные нагрузки на провода и гирлянды изоляторов, а также наклон пролета. Расчеты производятся для каждого климатического режима исходя из реального расположения отпайки к электрическому аппарату и усилий от нее на ошиновку. Показано хорошее совпадение результатов, полученных по предложенной методике и с помощью компьютерной программы. Приведены формулы для расчета стрелы провеса и горизонтальных отклонений токопроводов при расположении отпайки в середине пролета. Предложена методика определения составляющих усилий на ошиновку от отпайки с учетом ее реального расположения в распределительном устройстве. Даны формулы расчета этих составляющих для разных вариантов ориентации отпайки. Знание значений составляющих сосредоточенных сил от отпайки позволяет повысить точность расчета стрел провеса и тяжелых токопроводов распределительных устройств. Приведены формулы для определения коэффициентов увеличения стрелы провеса с учетом составляющих сил от отпайки.

**Ключевые слова:** стрела провеса, тяжение, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, отпайка, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов с учетом отпайк к электрическим аппаратам / Ю. В. Бладыко, Е. Г. Пономаренко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 2. С. 109–120. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-109-120>

## Mechanical Calculation of Flexible Wires Taking into Account Taps to Electrical Apparatuses

Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>, E. G. Ponomarenko<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** A method is proposed for the mechanical calculation of flexible wires of substation in the presence of one tap to an electrical apparatus located in the middle of the span, taking into

---

### 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  
eic@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  
eic@bntu.by

---

account its real location. The technique takes into account the presence of tension insulator strings, different heights of the suspension of wires. The loads on the conductor and tap depend on the climatic regime and take into account wind and icy conditions, as well as temperature changes. The transition to another climatic regime is performed by solving the equation of state, taking into account the coefficients of the horizontal and vertical load of the given and initial regimes. Formulas are given for calculating load factors that take into account weight, wind and ice cover loads on wires and insulator strings, as well as the slope of the span. They are calculated for each climatic mode based on the actual location of the tap to the electrical apparatus and the forces from it to the busbar. It is shown that the calculation results are in good agreement with the proposed method and the computer program. Formulas are given for calculating the sag and horizontal deviations of the wires when the tap is located in the middle of the span. A method is proposed for calculating the components of the forces on the busbar from the tap, taking into account its real location in substation. Formulas for calculating these components are given for different variants of the tap orientation. Knowledge of the values of the components of concentrated forces from the tap allows to increase the accuracy of calculating the sag and tension of the substation wires. Formulas are given for calculating the coefficients of increasing the sag, taking into account the components of the forces from the tap.

**Keywords:** sag, tension, insulator strings, equation of state, span, tap, load factor

**For citation:** Bladyko Y. V., Ponomarenko E. G. (2021) Mechanical Calculation of Flexible Wires Taking into Account Taps to Electrical Apparatuses. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (2), 109–120. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-109-120> (in Russian)

## Введение

Механическому расчету гибких токопроводов распределительных устройств (РУ), воздушных линий и тросов с сосредоточенными нагрузками от распорок, заградительных шаров, гирлянд изоляторов, отпаек к электрическим аппаратам посвящены работы [1–14]. В последние годы интерес вырос к инженерным методикам определения стрел провеса и тяжений [1–8]. В [1] рассматривается наличие сосредоточенных нагрузок, равномерно размещенных в пролете. Показано, что самые большие погрешности от их замены на распределенные нагрузки вдоль пролета имеют место при одной сосредоточенной силе. В [2] учтены натяжные гирлянды изоляторов, наклонный пролет, ветровые нагрузки. Работы [3, 4] рассматривают в качестве сосредоточенных сил заградительные шары, статья [5] – распорки. Различие в натяжных гирляндах изоляторов вносит коррективы в механический расчет [6, 7]. Большое внимание уделяется горизонтальным составляющим усилий от ветра на конструктивные элементы РУ [8]. В проектной практике рекомендовано принимать направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки [8]. Напротив, снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил [8]. 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 [8]. Показано хорошее совпадение результатов, полученных по методике, принятой в проектной

практике, и с помощью разработанной в БНТУ компьютерной программы MR21 [9–13]. Полученные программой значения сосредоточенных сил взяты для инженерной методики [9]. Погрешность возрастает с увеличением длины гирлянды и объясняется различием в ее учете. Согласно сделанному в [9] выводу, инженерная методика, принятая в проектной практике, дает приемлемый результат, если будут точно определены составляющие сосредоточенных усилий от отпаяк. В компьютерной программе учитывается реальное расположение отпаяк в РУ [9–13].

Цель данной статьи – дальнейшее развитие инженерного метода механического расчета гибкой ошиновки РУ с учетом влияния усилий от отпайки к электрическому аппарату, а также определение составляющих этих сил.

**Методика механического расчета гибких проводов при наличии одной отпайки в середине пролета**

Расчетная схема пролета для вертикальной плоскости  $xOy$ , где  $Q_1$  – вес провода;  $Q_r$  – вес гирлянды, представлена на рис. 1. Точно такая схема будет и для горизонтальной плоскости  $xOz$ , в которой действует горизонтальная составляющая усилия от отпайки  $P_z$ .

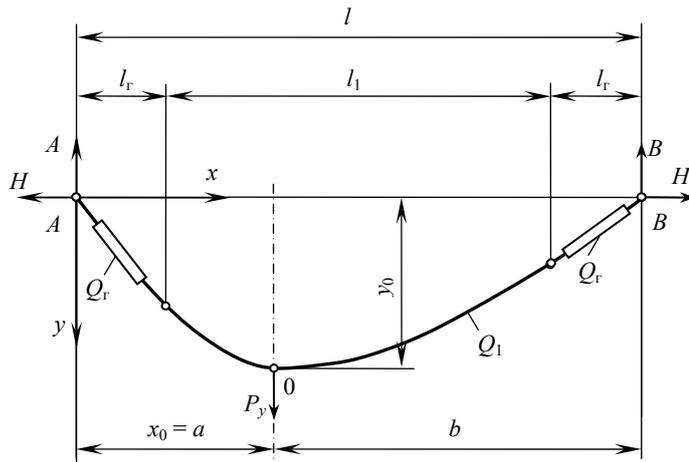


Рис. 1. Расчетная схема пролета: A, B – точки крепления ошиновки к опорам; 0 – точка крепления отпайки

Fig. 1. An estimated span scheme: A, B – points of the fixing busbar to the pillars; 0 – point of fixing the tap

В общем случае для любого пролета при одной отпайке, расположенной в середине пролета  $a = b = 0,5l$ , максимальные стрелы провеса [4] относительно линии, соединяющей точки подвеса провода, рассчитываются следующим образом:

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H}; \quad z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H}, \tag{1}$$

где  $y_0$  – максимальная стрела провеса в вертикальной плоскости;  $z_0$  – максимальное горизонтальное отклонение провода;  $q_y$  – погонный вес провода

с учетом возможного гололеда на нем;  $q_z$  – погонная нагрузка от ветра на провод, покрытый гололедом;  $l$  – длина пролета;  $H$  – тяжесть провода (горизонтальная составляющая);  $K_{fy}$ ,  $K_{fz}$  – коэффициенты увеличения стрелы провеса и горизонтального отклонения, обусловленные наличием отпайки и гирлянд изоляторов [2, 4]:

$$K_{fy} = \frac{1 + 4\delta_y + 2K_{Py}}{\cos\theta}; \quad K_{fz} = \frac{1 + 4\delta_z + 2K_{Pz}}{\cos\theta}; \quad (2)$$

$\delta_y$ ,  $\delta_z$  – коэффициенты, учитывающие наличие натяжных гирлянд изоляторов:

$$\delta_y = \left( \frac{q_{гy}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_0}{l} \right)^2 = (K_{By} - 1) K_r^2; \quad \delta_z = \left( \frac{q_{гz}}{q_z} - 1 \right) \left( \frac{l_0}{l} \right)^2 = (K_{Bz} - 1) K_r^2; \quad (3)$$

$q_{гy}$  – погонный вес гирлянды изоляторов с гололедом на ней;  $q_{гz}$  – погонная нагрузка от ветра на гирлянду изоляторов, покрытую гололедом;  $l_0 = l_r \cos\theta$  – проекция гирлянды на горизонтальную ось;  $l_r$  – длина натяжной гирлянды изоляторов;

$K_{By} = \frac{q_{гy}}{q_y}$ ;  $K_{Bz} = \frac{q_{гz}}{q_z}$  – кратность веса и горизонтальных нагрузок от ветра натяжной гирлянды изоляторов относительно нагрузок провода;

$K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos\theta}{l}$  – то же длины натяжной гирлянды изоляторов относительно длины пролета;

$K_{Py} = \frac{P_y \cos\theta}{q_y l}$ ;  $K_{Pz} = \frac{P_z \cos\theta}{q_z l}$  – коэффициенты сосредоточенных сил от отпайки;  $P_y$ ,  $P_z$  – сосредоточенные силы от отпайки по осям  $y$  и  $z$ ;  $\theta$  – угол наклона пролета:  $\operatorname{tg}\theta = h/l$ ;  $h$  – разность высот подвеса проводов:  $h = H_A - H_B$ ;  $H_A$ ,  $H_B$  – высоты подвеса провода на опорах  $A$  и  $B$ .

Для расщепленных проводов берутся суммарные погонные нагрузки на фазу, при наличии нескольких цепей гирлянд – суммарные погонные весовые и ветровые нагрузки. Гололед на ошиновке увеличивает не только весовые показатели, но и ветровую нагрузку на провода и гирлянды [4].

Как погонные нагрузки, так и сосредоточенные силы от отпайки берутся со знаком, зависящим от их направления относительно осей координат. Принято направление скорости ветра, совпадающее с осью  $z$ .

При подвесе токопровода на одинаковой высоте:  $H_A = H_B$ ;  $h = 0$ ;  $\theta = 0$ ;  $\cos\theta = 1$ .

Уравнение состояния провода записывается в виде [4]

$$\frac{\alpha_y H}{\cos\theta} - \frac{\left[ (q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2 \right] l^2 k_\phi^2}{24 H^2} + \alpha t =$$

$$= \frac{\alpha_y H_0}{\cos \theta} - \frac{\left[ (q_{y0} K_{y0})^2 + (q_{z0} K_{z0})^2 \right] l^2 k_{\varphi 0}^2}{24 H_0^2} + \alpha t_0, \quad (4)$$

где  $\alpha_y = \frac{1}{EA}$  – коэффициент упругого удлинения провода;  $E$  – модуль

упругости провода;  $A$  – сечение провода;  $k_{\varphi} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi}$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{q_z K_z}{q_y K_y}$ ;

$\alpha$  – коэффициент температурного удлинения провода;  $t$  – температура провода;  $K_y, K_z$  – коэффициенты вертикальной и горизонтальной нагрузки:

$$K_y^2 = (1 - 2K_r)(1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \left[ 12K_{By} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{By} K_r \right) + 3K_{Py} (1 + 4\delta_y) + 3K_{Py}^2 \right]; \quad (5)$$

$$K_z^2 = (1 - 2K_r)(1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \left[ 12K_{Bz} K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_{Bz} K_r \right) + 3K_{Pz} (1 + 4\delta_z) + 3K_{Pz}^2 \right]. \quad (6)$$

В формуле (4) с индексом 0 используются параметры исходного режима, без него – рассчитываемого.

Сложность в применении вышеизложенных формул заключается в том, что неизвестны составляющие усилий от отпайки  $P_y$  и  $P_z$ , зависящие от реального расположения отпайки, ее натяжения, которое в свою очередь зависит от координат точки крепления. В программе MR21 [9–13] это решается итерационным путем.

### Расчет составляющих усилий на ошиновку от отпайки в середине пролета

Ниже приводятся формулы для оценки усилий от отпайки в середине пролета.

Допускается, что отпайка к электрическому аппарату выполнена тем же проводом, что и токопровод РУ, и на нее действуют те же распределенные нагрузки от веса, гололеда и ветра. Отпайку можно рассматривать как гибкую нить с малой стрелой провеса [14]. Тогда усилия на ошиновку и аппарат можно приравнять к реакциям балочной модели на точки крепления. Для первого приближения предлагается использовать выражения:

$$P_y = q_y \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2}; \quad (7)$$

$$P_z = q_z \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2}, \quad (8)$$

где  $z_C$  – горизонтальное расстояние от оси пролета до электрического аппарата (со знаком «плюс» при направлении отпайки по оси  $z$ , со зна-

ком «минус» – в противоположном направлении);  $H_{\text{ан}}$  – высота электрического аппарата.

Расчетная схема отпайки к электрическому аппарату, где  $D$  – точка с максимальной стрелой провеса;  $H_C$  – тяжение в отпайке;  $R$  – реакция от отпайки на точки крепления;  $Q_C$  – вес отпайки;  $h_C$  – разница высот подвеса точек  $0-C$ ;  $l_0$  – расстояние между точками  $0-C$ , представлена на рис. 2.

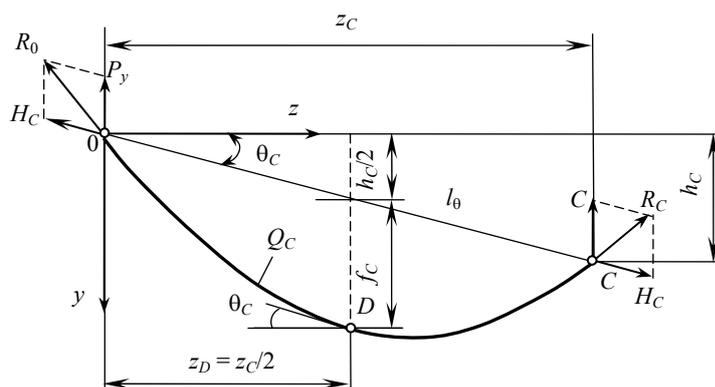


Рис. 2. Расчетная схема отпайки к электрическому аппарату:

0 – точка крепления отпайки к токопроводу; C – точка крепления отпайки к аппарату

Fig. 2. An estimated scheme of a tap to an electrical apparatus:

0 – point of fixing the tap to the electrical conductor;

C – point of fixing the tap to an electrical apparatus

После предварительного расчета по формулам (1) составляющие можно уточнить:

$$P_y = q_y \sqrt{(z_C - z_0)^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} - y_0 \right)^2}; \quad (9)$$

$$P_z = q_z \sqrt{(z_C - z_0)^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} - y_0 \right)^2}, \quad (10)$$

либо по [14]:

$$P_y = \frac{q_y |z_C - z_0|}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ан}} - y_0}{4f_C} \right]; \quad (11)$$

$$P_z = \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ан}} - y_0]}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(z_C - z_0) \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right], \quad (12)$$

где  $f_C$  – стрела провеса отпайки;  $\text{sign}(q_z)$  – знак погонной нагрузки  $q_z$ .

Формулами (11), (12) можно воспользоваться, если известна стрела провеса отпайки.

Так как отпайки монтируются практически без натяжения, определение стрелы провеса затруднительно. При изменении климатического режима меняется положение отпайки и ее натяжение.

Длину отпайки ориентировочно можно определить по формуле [14]

$$L_C = \frac{|z_C - z_0|}{\cos \theta_C} + \frac{8}{3} \frac{f_C^2}{|z_C - z_0|} \cos^3 \theta_C, \quad (13)$$

где

$$\cos \theta_C = \frac{|z_C - z_0|}{l_\theta} = \frac{|z_C - z_0|}{\sqrt{(z_C - z_0)^2 + [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ан}} - y_0]^2}}.$$

При больших углах наклона пролета отпайки  $\theta_C$  (рис. 2) и килевом расположении отпайки формулы (11)–(13) либо дают большую погрешность, либо ими вовсе нельзя воспользоваться.

При вертикальном расположении отпайки ( $z_C = 0$ ):

$$P_y = q_y \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} - y_0 \right); \quad (14)$$

$$P_z = 0,5q_z \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} - y_0 \right). \quad (15)$$

Коэффициент 0,5 в формуле (15) связан с практическим равенством усилий на провод и электрический аппарат при воздействии ветра на отпайку.

Если провода отпайки отличаются от токопровода, например, числом расщепленных проводов или маркой, то в формулы (7)–(15) подставляются погонные нагрузки, действующие на отпайку в рассчитываемом климатическом режиме.

### Результаты механического расчета ошиновки с отпайкой

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета РУ  $l = 30$  м, провод 264/34 ACSR с погонным весом  $q_y = 0,98$  даН/м, площадью поперечного сечения  $F = 297,8$  мм<sup>2</sup>, модулем упругости  $E = 7400$  даН/мм<sup>2</sup>, тяжение в исходном режиме  $H = 490$  даН, погонный вес гирлянд изоляторов  $q_{\text{гв}} = 30$  даН/м, длина каждой натяжной гирлянды изоляторов  $l_{\text{г}} = 2$  м. Высоты подвеса провода к порталам  $H_A = H_B = 15$  м. Отпайка к электрическому аппарату крепится в середине пролета сборных шин ( $a = l/2 = 15$  м) на расстоянии  $z_C$  от оси пролета, выполнена тем же проводом. Высота электрического аппарата  $H_{\text{ан}} = 2$  м. Исходный климатический режим – без ветра и гололеда, температура  $t = -5$  °С. В режиме максимального скоростного напора ветра принимается его скорость  $v = 30$  м/с. В гололедном режиме скорость ветра  $v = 15$  м/с, толщина стенки гололеда  $b = 20$  мм. В режиме максимальной температуры последняя достигает  $t = 50$  °С.

Результаты расчета по предложенной методике в сравнении с результатами, полученными компьютерной программой MR21 [13], приведены в табл. 1. При использовании формул (1)–(6) подставлялись значения силы от отпайки  $P_y$  и  $P_z$ , рассчитанные программой MR21.

Таблица 1

## Результаты расчетов

## Calculation results

№ пп	Конфигурация отпайки	Климатические условия	Нагрузка на провод $q_1/q_2$ , даН/м	Нагрузка на гирлянду $q_{1г}/q_{2г}$ , даН/м	Сила от отпайки по MR21 $P_1/P_2$ , даН	Коэффициент сосредоточенных сил $K_{1г}/K_{2г}$ ( $q_1K_{1г}$ / $q_2K_{2г}$ )	Коэффициент нагрузки $K_1/K_2$ ( $q_1K_1$ / $q_2K_2$ )	Коэффициент увеличения стрелы провеса $K_{1г}/K_{2г}$ ( $q_1K_{1г}$ / $q_2K_{2г}$ )	Тяжение $H$ , даН	Максимум стрелы провеса $y_0/z_0$ , м	Тяжение по MR21 $H$ , даН	Максимум стрелы провеса $y_0/z_0$ , м
1		$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/0	30/0	15/4	0,510/(0,133)	2,982/(0,248)	2,547/(0,267)	490	0,57/0,06	490	0,59/0,07
2	$z_c = 10$ м	$v = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5$ °С	2,43/1,51	45/4,66	39/25	0,534/(0,553)	2,536/2,081	2,380/2,142	1059	0,62/0,34	1043	0,63/0,35
3		$v = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/1,22	30/16,31	17/19	0,578/(0,521)	3,083/2,334	2,683/2,263	672	0,44/0,46	663	0,45/0,47
4		$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50$ °С	0,98/0	30/0	15/4	0,510/(0,133)	2,982/(0,248)	2,547/(0,267)	368	0,76/0,08	355	0,80/0,09
5	$z_c = -10$ м	$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/0	30/0	16/-4	0,544/(-0,133)	3,032/(-0,248)	2,615/(-0,267)	490	0,59/-0,06	490	0,59/-0,07
6		$v = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5$ °С	2,43/1,51	45/4,66	45/-5	0,617/-0,111	2,671/0,967	2,544/0,816	1012	0,69/0,14	1006	0,70/0,14
7		$v = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/1,22	30/16,31	22/-1	0,748/-0,027	3,344/1,481	3,023/1,166	603	0,55/0,26	605	0,56/0,26
8	$z_c = 0$	$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50$ °С	0,98/0	30/0	15/-4	0,510/(-0,133)	2,982/(-0,248)	2,547/(-0,267)	364	0,77/-0,08	355	0,80/-0,09
9		$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/0	30/0	12/0	0,408/0	2,833/1,074	2,343/1	490	0,53/0	490	0,52/0
10		$v = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5$ °С	2,43/1,51	45/4,66	35/13	0,480/0,287	2,448/1,614	2,270/1,612	1034	0,60/0,26	1029	0,59/0,27
11	$z_c = 0$	$v = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5$ °С	0,98/1,22	30/16,31	18/9	0,612/0,247	3,135/1,887	2,751/1,715	656	0,46/0,36	656	0,45/0,35
12		$v = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50$ °С	0,98/0	30/0	12/0	0,408/0	2,833/1,074	2,343/1	359	0,72/0	337	0,75/0

Тяжение в различных климатических режимах определялось решением уравнения состояния (4) с учетом коэффициентов нагрузки (5)–(6) для каждого из них и заданного тяжения в исходном режиме. В табл. 1 приведены результаты расчетов всех коэффициентов. Значения, указанные в скобках, используются при отсутствии ветровых нагрузок [8]. Максимальные стрелы провеса и горизонтальные отклонения определяются в точке крепления отпайки, расположенной в середине пролета. Даже при смещении точки крепления вдоль пролета максимальный провес будет, как правило, в этой точке. Коэффициент нагрузки при креплении отпайки в любом месте пролета, а также в случае нескольких отпаек можно найти по формулам из [2].

Данные табл. 1 показывают отличное совпадение расчетов стрел провеса, выполненных по предложенной методике и с помощью компьютерной программы при задании усилий, рассчитанных программой. Хорошее совпадение отмечается в расчетах тяжений (расхождение не более 6,5 %).

Погрешность обусловлена наличием натяжных гирлянд изоляторов и различием в их учете. Так, в предложенной методике гирлянды нерастяжимые, а их проекция на горизонтальную ось приравнивается к их длине. Поэтому с увеличением длины гирлянд растет и погрешность расчета тяжений [9].

Данные табл. 1 подтверждают рекомендации [8] по принятию в проектной практике направления ветра в сторону действия горизонтальной сосредоточенной силы, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения, коэффициенты нагрузки и тяжения (табл. 1, п. 1–4). Снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки и уменьшение тяжений происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальной сосредоточенной силы (табл. 1, п. 5–8).

Проведенные расчеты по формулам (7)–(15) хорошо совпадают с результатами, полученными с помощью компьютерной программы MR21 (табл. 1), что свидетельствует о возможности их применения в проектной практике.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика механического расчета гибких проводов распределительного устройства при наличии одной отпайки в середине пролета с учетом ее реального расположения. Принимаются во внимание наличие натяжных гирлянд изоляторов, разные высоты подвеса проводов. Нагрузки на токопровод и отпайку зависят от климатического режима, ветровых и гололедных условий, а также изменения температуры. Переход к другому климатическому режиму выполняется решением уравнения состояния с учетом коэффициентов горизонтальной и вертикальной нагрузки данного и исходного режимов. Приводятся формулы для определения коэффициентов нагрузки. Расчеты производятся для каждого климатического режима исходя из реального расположения отпайки к электрическому ап-

парату и усилий от нее на ошиновку. Показано хорошее совпадение результатов, полученных по предложенной методике и с помощью компьютерной программы.

2. Предложена методика расчета составляющих усилий на ошиновку от отпайки с учетом ее реального расположения в распределительном устройстве. Даны формулы расчета этих составляющих для разных вариантов ориентации отпайки. Знание значений составляющих сосредоточенных сил от отпайки позволяет повысить точность расчета стрел провеса и тяжений токопроводов. Приведены формулы для определения коэффициентов увеличения стрелы провеса с учетом составляющих сил от отпайки.

3. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств, в основу которого положена расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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>.
2. 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/10.21122/1029-7448-2019-61-3-220-234>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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>.

9. 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.
10. 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. симпоз. / Польская акад. наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988. Закопане, 1988. С. 173–181.
11. 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, 7–8 Sept. 1995. Lublin, Lublin Technical University, 1995. P. 15–19.
12. 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.
13. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И. И. Сергей [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Междунар. семинара им. Ю. Н. Руденко. Минск: БНТУ, 2015. С. 308–310.
14. Качурин, В. К. Гибкие нити с малыми стрелками / В. К. Качурин. М.: Гостехиздат, 1956. 224 с.

Поступила 25.11.2020 Подписана в печать 27.01.2021 Опубликована онлайн 30.03.2021

#### REFERENCES

1. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107> (in Russian).
2. 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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-220-234> (in Russian).
3. 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 (4), 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309> (in Russian).
4. 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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36> (in Russian).
5. 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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231> (in Russian).

6. 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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 55–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65> (in Russian).
7. 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 Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (2), 103–115. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-103-115> (in Russian).
8. Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires in the Presence of Horizontal Concentrated Loads. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514> (in Russian).
9. 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 Impacts. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions*, (8), 8–14 (in Russian).
10. 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).
11. Strelyuk 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: Proceedings of the International Conference, Lublin, 7–8 Sept.* Lublin, Lublin Technical University, 15–19.
12. 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).
13. Sergey I. I., Ponomarenko E. G., Bladyko Y. V., Klimkovich P. I. (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamics Calculation of Flexible Current-Conductive Structures. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunar. Seminara im. Yu. N. Rudenko* [Methodological Issues of Reliability Research for Large Energy Systems. Proceedings of the International Seminar Named after Yu. N. Rudenko]. Minsk, BNTU, 308–310 (in Russian).
14. Kachurin V. K. (1956) *Flexible Threads with Small Sags*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 224 (in Russian).