

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 62, № 3 (2019), с. 219–231  
Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 62, No 3 (2019), pp. 219–231 219

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231>

УДК 621.315.176

## Учет распорок в механическом расчете гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств

Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Рассматривается механический расчет гибких проводов пролетов воздушных линий и распределительных устройств, в которых устанавливаются дистанционные внутрифазные или междуфазные распорки. Распорки рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, действующие на расщепленную фазу. Получены формулы определения стрел провеса проводов при различном числе распорок как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил. При этом учитываются разность высот подвеса проводов, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Эти формулы, представленные в удобном для использования потребителями виде, могут быть применены для компьютерной реализации механического расчета гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств в различных климатических режимах как при наличии, так и при отсутствии расщепления фаз. Выполнена оценка погрешности замены распорок распределенной нагрузкой. Предлагаются формулы, имеющие наименьшую погрешность при замене распорок распределенной нагрузкой. Чем больше значение сосредоточенных сил от отпаек и шлейфов, тем больше погрешность расчета стрел провеса проводов распределительных устройств. Поэтому заменять их распределенной нагрузкой, полученной простым делением суммарных нагрузок на длину пролета при наличии отпаек и шлейфов, нельзя.

**Ключевые слова:** стрела провеса, тяжение, уравнение состояния, пролет, расщепленная фаза, подпролет, коэффициент нагрузки

**Для цитирования:** 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>

## Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Switchgears

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

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

**Abstract.** The mechanical calculation of flexible wires of overhead lines and switchgears, in which in-phase or phase-to-phase spacers are installed, is under consideration. Spacers are

---

### 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)

---

considered as concentrated loads acting on the split phase. The formulas for determining the sag are given for a different number of spacers as a function of their number and the coefficient of concentrated forces. This takes into account the difference in suspension heights, tension insulators strings, wind and ice loads. These formulas, being presented in a form that is convenient for consumers, can be used for computer execution of the mechanical calculation of flexible wires in different climatic regimes, both in the presence and in the absence of phase splitting. The errors of replacing the spacers with a distributed load are demonstrated. Formulas are proposed that give the smallest error when replacing spacers with a distributed load. The greater the value of the concentrated forces from the tap-off lines and loops, the greater the error in calculating the sag of the switchgears wires. Therefore, it is not possible to replace them with a distributed load obtained by simply dividing the total load by the length of the span in the presence of the tap-off lines and loops.

**Keywords:** sag, tension, equation of state, span, split phase, subspan, load factor

**For citation:** Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Switchgears. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3) 219–231. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231> (in Russian)

### Введение

С 1 декабря 2011 г. в Республике Беларусь действует технический кодекс установившейся практики ТКП 339–2011 [1]. Он регламентирует нормативные и расчетные нагрузки на провода воздушных линий (ВЛ) в различных климатических режимах. Параграф «5.3.5 Климатические условия и нагрузки» [1] в части расчетов ветровых и гололедных нагрузок полностью совпадает с параграфом «Климатические условия и нагрузки» главы «2.5 Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ» Правил устройства электроустановок (ПУЭ) седьмого издания [2], введенных в Российской Федерации с 1 января 2003 г.

Однако ТКП 339–2011 не учитывает ветровые и гололедные нагрузки на все конструктивные элементы ВЛ и распределительных устройств (РУ). Не указано, как рассчитывать нагрузки от ветра и гололеда на внутрифазные и междуфазные распорки, авиационные заградительные шары-маркеры, шлейфы, отпайки к электрическим аппаратам и другие сосредоточенные нагрузки. Цель статьи – разработка методики механического расчета проводов ВЛ и РУ при наличии распорок в различных режимах климатических воздействий. Распорки рассматриваются как сосредоточенные нагрузки, решается вопрос о возможности их замены распределенными по длине пролета, рассчитывается погрешность в расчетах стрел провеса при такой замене.

Рассмотрим расчет стрел провеса и тяжений расщепленных фаз ВЛ и РУ в случае подвеса проводов на разных высотах. Расщепленные фазы заменяются эквивалентным проводом, расчет ведется для оси фазы. Реальное расположение каждого провода определяется конфигурацией фазы и шагом расщепления.

### Расчет пролета воздушных линий с распорками

Максимальная стрела провеса оси проводов расщепленной фазы [3]

$$f_0 = \frac{q_\phi l^2 K_f}{8H_\phi}, \quad (1)$$

где  $q_\phi$  – погонный вес проводов фазы,

$$q_{\phi} = N(q + q_{г.п});$$

$N$  – число расщепленных проводов в фазе (кратность расщепления), если нет расщепления  $N = 1$ ;  $q$  – погонный вес одного провода (троса);  $q_{г.п}$  – расчетная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода при механическом расчете проводов по методу допускаемых напряжений [1] (при отсутствии гололеда  $q_{г.п} = 0$ );  $l$  – длина пролета;  $H_{\phi}$  – тяжение проводов фазы,  $H_{\phi} = NH$ ;  $H$  – тяжение в одном проводе расщепленной фазы (горизонтальная составляющая);  $K_f$  – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием распорок, в общем случае для расположения точек подвеса гирлянд на разных высотах [3, 4],

$$K_f = \frac{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{\cos \theta} \quad \text{или} \quad K_f = \frac{1 + \frac{P}{nq_{\phi}l_p}}{\cos \theta};$$

$\theta$  – угол наклона пролета,  $\operatorname{tg} \theta = h/l$ ;  $h$  – разность высот подвеса проводов;

$K_p = \frac{P \cos \theta}{q_{\phi}l}$  – коэффициент сосредоточенных сил, действующих в наклонном пролете;  $l_p$  – расстояние между распорками (длина подпролета),

$l_p = \frac{l}{n+1}$ ;  $P$  – суммарный вес распорок в пролете с учетом гололеда на них;

$n$  – число узлов распорок, равномерно расположенных по длине пролета;

$n = \left\lfloor \frac{l}{l_p} \right\rfloor - 1$  – при длине подпролета не менее  $l_p$ ;  $n = \left\lceil \frac{l}{l_p} \right\rceil - 1$  – при длине

подпролета, приблизительно (или точно) равной  $l_p$ .

Суммарный вес распорок в пролете

$$P = \left( n_p n_y P_p + n_{мр} \frac{P_{мр}}{2} \right) (1 + 0,01b),$$

где  $P_p$  – вес одной внутрифазной распорки;  $n_p$  – число узлов внутрифазных распорок (при их отсутствии  $n_p = 0$ );  $n_y$  – то же распорок в узле (в случае использования парных распорок:  $n_y = N$  при  $N > 2$  и  $n_y = 1$  при  $N = 2$ ; в случае использования лучевых распорок  $n_y = 1$ );  $P_{мр}$  – вес одной междуфазной распорки;  $n_{мр}$  – число междуфазных распорок (при их отсутствии  $n_{мр} = 0$ );  $b$  – толщина стенки гололеда, мм.

Увеличение веса распорок, покрытых гололедом, на  $0,01b$  принято согласно Указаниям по механическому расчету гибкой ошиновки ОРУ 35–500 кВ.

В общем случае число узлов распорок  $n \leq (n_p + n_{мр})$ .

Относительная погрешность расчета максимальной стрелы провеса пролета ВЛ из-за замены  $n$  распорок равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета [3]

$$\delta_f = \frac{f_{0p} - f_0}{f_0} = -\frac{1}{1 + n \left( 1 + \frac{1}{K_p} \right)}, \quad (2)$$

где  $f_{0p}$  – расчетная максимальная стрела провеса оси фазы проводов при замене распорок распределенной нагрузкой,

$$f_{0p} = \frac{q_\phi l^2 (1 + K_p)}{8H_\phi \cos \theta} = \frac{\left( \frac{q_\phi}{\cos \theta} + \frac{P}{l} \right) l^2}{8H_\phi}. \quad (3)$$

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета  $l = 400$  м; в фазе  $N = 2$  провода 264/34 ACSR с погонным весом  $q = 0,98$  даН/м, площадью поперечного сечения  $A = 297,8$  мм<sup>2</sup>, модулем упругости  $E = 7400$  даН/мм<sup>2</sup>; провода подвешены на одной высоте, исходное тяжение провода  $H = 1490$  даН; в пролете установлено  $n$  дистанционных распорок, каждая весом  $P_p = 2$  даН. Результаты расчета погрешности в определении стрелы провеса представлены на рис. 1.

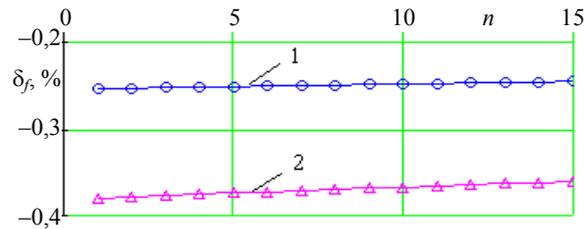


Рис. 1. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета воздушной линии из-за замены распорок распределенной нагрузкой от числа распорок: 1 – расчет по (2) для  $P_p = 2$  даН; 2 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 1. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of the overhead line due to the replacement of spacers by a distributed load on the number of spacers: 1 – calculation by (2) for  $P_p = 2$  daN; 2 –  $P_p = 3$  daN

При увеличении веса распорок погрешность возрастает по модулю. При увеличении числа распорок погрешность снижается незначительно.

Практически нулевую погрешность дает расчет стрел провеса по формуле

$$f_{0p} = f_0 = \frac{\left( \frac{q_\phi}{\cos \theta} + \frac{P}{nl_p} \right) l^2}{8H_\phi}, \quad (4)$$

которая совпадает с (1).

Уравнение состояния проводов фазы для перехода к другому режиму, из которых один исходный (с индексом 0), имеет вид [4–6]

$$\frac{\alpha_{y\phi} H_{\phi}}{\cos \theta} - \frac{(q_{\phi} K)^2 l^2}{24 H_{\phi}^2} + \alpha t = \frac{\alpha_{y\phi} H_{\phi 0}}{\cos \theta} - \frac{(q_{\phi 0} K_0)^2 l^2}{24 H_{\phi 0}^2} + \alpha t_0, \quad (5)$$

где  $\alpha_{y\phi} = \frac{1}{ENA}$  – коэффициент упругого удлинения проводов фазы;  $E$  – модуль упругости провода;  $A$  – сечение одного провода фазы;  $\alpha$  – коэффициент температурного удлинения провода;  $t$  – температура провода;  $K$  – коэффициент нагрузки [3],

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

Наличие натяжных гирлянд изоляторов в пролете ВЛ практически не влияет на погрешность замены сосредоточенных сил равномерной нагрузкой: она остается на том же уровне, что и без гирлянд [4].

В общем случае следует стрелы провеса считать по формуле (1), в которой коэффициент увеличения стрелы провеса находится из выражения [4]

$$K_f = \frac{1 + 4\delta + K_p \left( 1 + \frac{1}{n} \right)}{\cos \theta}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент, учитывающий наличие натяжных гирлянд изоляторов,

$$\delta = \left( \frac{q_r}{q_{\phi}} - 1 \right) \left( \frac{l_0}{l} \right)^2 = (K_b - 1) K_r^2;$$

$q_r$  – погонная нагрузка на натяжную гирлянду изоляторов с учетом гололеда на ней;  $K_b = \frac{q_r}{q_{\phi}}$  – кратность веса натяжной гирлянды изоляторов относительно

веса проводов фазы;  $K_r = \frac{l_0}{l} = \frac{l_r \cos \theta}{l}$  – то же длины натяжной

гирлянды изоляторов относительно длины пролета;  $l_r$  – длина гирлянды изоляторов;  $l_0 = l_r \cos \theta$  – ее проекция на горизонтальную ось.

Уравнение состояния проводов фазы для перехода к другому режиму имеет вид (5), где коэффициент нагрузки [6]

$$K^2 = (1 - 2K_r)(1 + 4K_r) + \frac{1}{1 - 2K_r} \left[ 12K_b K_r^2 \left( 1 - 2K_r + \frac{2}{3} K_b K_r \right) + 2K_p \left( 1 + 6\delta + \frac{1}{n+1} \right) + K_p^2 \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right].$$

При углах наклона  $\theta < 8^\circ$  можно отказаться от учета наклона и принимать в расчетах  $\cos \theta \approx 1$ .

Ветровую нагрузку на распорки нужно учитывать при  $N > 2$ , когда на конструкцию распорок, покрытых гололедом, действует ветровой напор. При  $N = 2$  ветровую нагрузку на распорки даже при наличии гололеда можно не учитывать, так как в механическом расчете в точке крепления зажима распорки рассматривается провод, покрытый гололедом, с учетом коэффициентов надежности [1]. Принимая во внимание действие ветра на провода и гирлянды изоляторов, определяются максимальные отклонения в двух направлениях по формулам [6].

### Расчет пролета распределительных устройств с распорками

В отличие от пролета ВЛ пролет РУ характеризуется меньшей длиной, а следовательно, большими значениями  $\delta$ ,  $K_r$  и  $K_p$ . При расчете стрел провеса можно пользоваться формулами (1) и (6).

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета РУ  $l = 30$  м; в фазе  $N = 2$  провода 264/34 АCSR; исходное тяжение провода  $H = 1490$  даН; погонный вес гирлянды изоляторов  $q_r = 30$  даН/м; длина натяжной гирлянды изоляторов  $l_r = 2$  м; в пролете  $n$  дистанционных распорок по  $P_p = 2$  даН.

Относительная погрешность расчета стрел провеса от замены распорок по формуле (3) равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета [4]

$$\delta_f = \frac{f_{0p} - f_0}{f_0} = -\frac{1}{1+n \left(1 + \frac{1+4\delta}{K_p}\right)}. \quad (7)$$

Результаты расчета погрешности в определении стрелы провеса представлены на рис. 2.

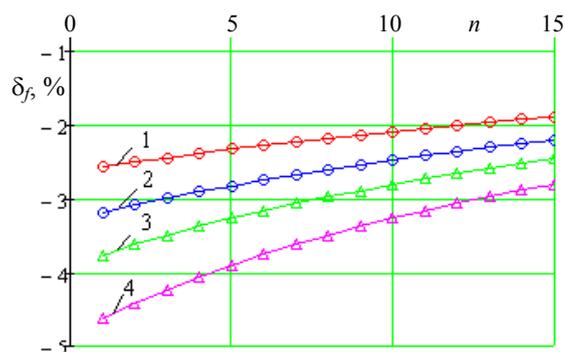


Рис. 2. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета распределительных устройств с двумя натяжными гирляндами изоляторов из-за замены распорок распределенной нагрузкой от числа распорок: 1, 3 – расчет по (7) для  $\delta = 0,064$ ; 2, 4 –  $\delta = 0$  (без гирлянд); 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 2. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears with two tension insulator strings caused by the replacement of spacers by a distributed load on the number of spacers: 1, 3 – calculation by (7) for  $\delta = 0.064$ ;

2, 4 –  $\delta = 0$  (without insulator strings); 1, 2 –  $P_p = 2$  daN; 3, 4 –  $P_p = 3$  daN

Наличие натяжных гирлянд изоляторов снижает погрешность. Замена  $n = 1$  распорки распределенной по длине пролета нагрузкой при наличии гирлянд изоляторов дает погрешность 2,5 %, а при их отсутствии погрешность по модулю возрастает до 3,2 %. При увеличении веса распорок погрешность также возрастает по модулю. При увеличении числа распорок погрешность снижается. Таким образом, самые большие погрешности замены распорок распределенной нагрузкой будут при их малом числе.

Уменьшить погрешность расчета от замены распорок распределенной нагрузкой можно распределением их веса не по длине пролета, а по длине провода. В данном случае стрела провеса

$$f_{0p} = \frac{\left( \frac{q_\phi}{\cos\theta} + \frac{P}{l-2l_0} \right) l^2 (1+4\delta_p)}{8H_\phi}, \tag{8}$$

где  $\delta_p = \left( \frac{q_r}{q_\phi + \frac{P \cos\theta}{l-2l_0}} - 1 \right) \left( \frac{l_0}{l} \right)^2$ .

Расстояние между распорками в этом случае

$$l_p = \frac{l-2l_0}{n+1},$$

где  $n$  – число распорок, равномерно расположенных по длине провода:

$$n = \left\lfloor \frac{l-2l_0}{l_p} \right\rfloor - 1 \text{ – при длине подпролета не менее } l_p; \quad n = \left\lceil \frac{l-2l_0}{l_p} \right\rceil - 1 \text{ – при}$$

длине подпролета, приблизительно (или точно) равной  $l_p$ .

Результаты расчета погрешности в определении стрелы провеса по формуле (8) представлены на рис. 3.

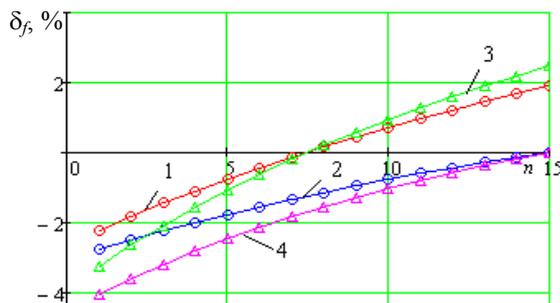


Рис. 3. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета распределительных устройств с двумя натяжными гирляндами изоляторов из-за замены распорок распределенной нагрузкой от числа распорок: 1, 3 – расчет по (8) для  $l_r = 2$  м; 2, 4 –  $l_r = 1$  м; 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 3. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears with two tension insulator strings caused by the replacement of spacers by a distributed load on the number of spacers: 1, 3 – calculation by (8) for  $l_r = 2$  m; 2, 4 –  $l_r = 1$  m; 1, 2 –  $P_p = 2$  daN; 3, 4 –  $P_p = 3$  daN

Кроме распорок, пролет РУ характеризуется большим количеством значительных сосредоточенных сил: шлейфов с натяжными зажимами, козырьки, отпайки к электрическим аппаратам с ответвительными зажимами (рис. 4).

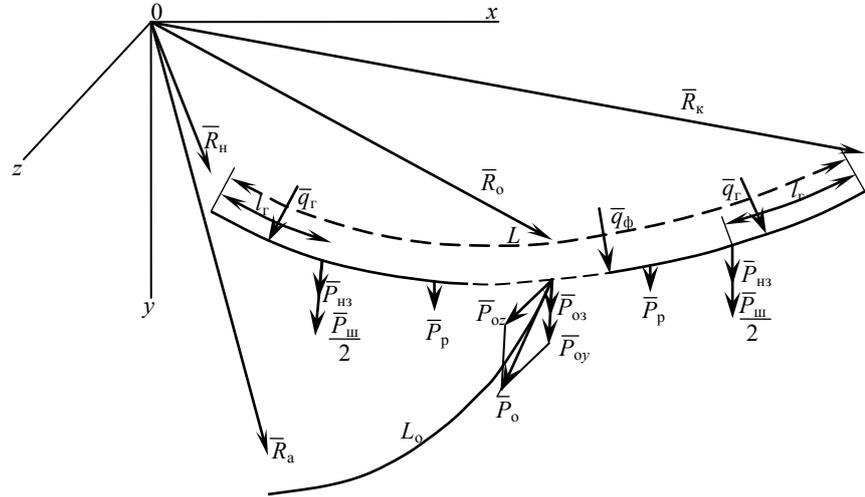


Рис. 4. Расчетная схема пролета распределительных устройств с эквивалентным проводом, двумя натяжными гирляндами изоляторов, распорками, шлейфами, зажимами, отпайкой к электрическому аппарату

Fig. 4. An estimated switchgears span scheme with an equivalent wire, two tension strings of insulators, spacers, loops, clamps, a tap-off line to the electrical apparatus

Рассмотрим случай, дающий наибольшую погрешность, – наличие отпайки в центре пролета. При расстановке распорок равномерно по длине провода в (1) подставляют коэффициент увеличения стрелы провеса

$$K_f = \frac{1 + 4\delta + K_p \left[ 1 + \frac{1}{n} + 2K_r \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \right] + K_{P_o}}{\cos \theta}, \quad (9)$$

где  $K_{P_o}$  – коэффициент сосредоточенных сил от отпайки и шлейфов,

$$K_{P_o} = \frac{[2(P_o + P_{oz}) + 4K_r(P_{sh} + P_{nz})] \cos \theta}{q_\phi l};$$

$P_o$  – сосредоточенная сила от отпайки в центре пролета;  $P_{oz}$  – вес ответвительного зажима;  $P_{nz}$  – то же натяжного зажима;  $P_{sh}$  – сосредоточенная сила от шлейфа,  $P_{sh} = q_\phi l_{sh}$ ;  $l_{sh}$  – длина шлейфа.

Рассчитаем погрешность от замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой по формуле определения стрелы провеса

$$f_{0p} = \frac{\left( \frac{q_\phi}{\cos \theta} + \frac{P + P_o + P_{oz} + P_{sh} + 2P_{nz}}{l} \right) l^2 (1 + 4\delta)}{8H_\phi}. \quad (10)$$

Результаты расчета погрешности в определении стрелы провеса по формуле (10) при отсутствии отпаяк и шлейфов представлены на рис. 5.

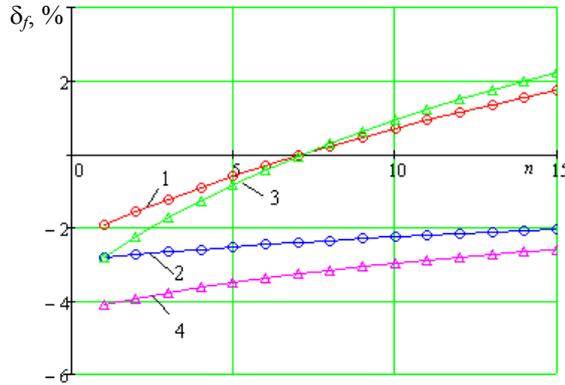


Рис. 5. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета распределительных устройств с двумя натяжными гирляндами изоляторов из-за замены распорок распределенной нагрузкой от числа распорок: 1, 3 – расчет по (10) для  $l_r = 2$  м; 2, 4 –  $l_r = 1$  м; 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 5. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears with two tension insulator strings caused by the replacement of spacers by a distributed load on the number of spacers: 1, 3 – calculation by (10) for  $l_r = 2$  м; 2, 4 –  $l_r = 1$  м; 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Наименьшую погрешность расчета стрел провеса получаем при числе распорок

$$n \approx \frac{1 - 2K_r}{4\delta - 2K_r}.$$

При наличии шлейфов и отпаяк погрешность возрастает (рис. 6).

Как видно из рис. 6, чем больше величина сосредоточенных сил, тем больше погрешность расчета стрел провеса. Очевидно, что заменять их распределенной нагрузкой простым делением суммарных нагрузок на длину пролета при наличии отпаяк и шлейфов нельзя, формула (10) дает большую погрешность.

Наименьшую погрешность от замены сосредоточенных сил распорок распределенной нагрузкой можно получить по формуле определения стрелы провеса

$$f_{0p} = \frac{\left( \frac{q_\phi}{\cos\theta} + \frac{P}{l} \right) l^2 (1 + 4\delta_p + K_{P_0})}{8H_\phi} = \frac{q_\phi (1 + K_p) l^2 (1 + 4\delta_p + K_{P_0})}{8H_\phi \cos\theta}, \quad (11)$$

$$\text{где } \delta_p = \left( \frac{q_r}{q_\phi + \frac{P \cos\theta}{l}} - 1 \right) \left( \frac{l_0}{l} \right)^2 = \left( \frac{K_b}{1 + K_p} - 1 \right) K_r^2.$$

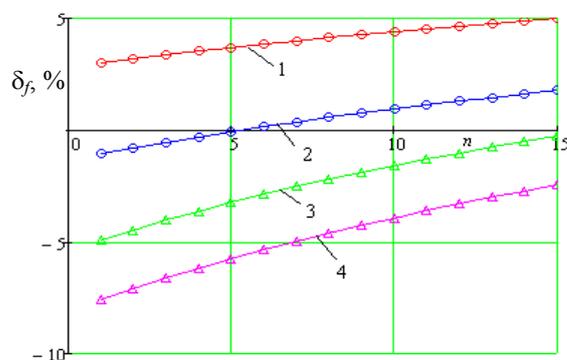


Рис. 6. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы пролета распределительных устройств из-за замены сосредоточенных нагрузок распределенной от числа распорок при наличии шлейфов  $P_{ш} + P_{нз} = 8$  даН и отпайки: 1 – расчет по (10) для  $P_o = 5$  даН; 2 –  $P_o = 10$  даН; 3 –  $P_o = 15$  даН; 4 –  $P_o = 20$  даН; 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 6. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears caused by the replacement of concentrated loads by a distributed ones on the number of spacers if there are loops  $P_{ш} + P_{нз} = 8$  daN and a tap-off line: 1, 3 – calculation by (10) for  $P_o = 5$  daN; 2 –  $P_o = 10$  daN; 3 –  $P_o = 15$  daN; 4 –  $P_o = 20$  daN; 1, 2 –  $P_p = 2$  daN; 3, 4 –  $P_p = 3$  daN

Результаты расчета погрешности в определении стрелы провеса по формуле (11) при наличии отпаяк и шлейфов представлены на рис. 7.

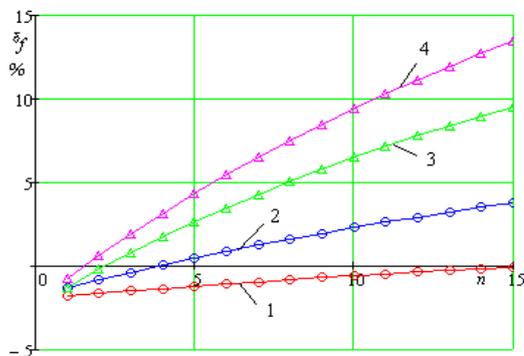


Рис. 7. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета распределительных устройств из-за замены распорок распределенной нагрузкой от числа распорок при наличии шлейфов  $P_{ш} + P_{нз} = 8$  даН и отпайки: 1 – расчет по (11) для  $P_o = 5$  даН; 2 –  $P_o = 10$  даН; 3 –  $P_o = 15$  даН; 4 –  $P_o = 20$  даН; 1, 2 –  $P_p = 2$  даН; 3, 4 –  $P_p = 3$  даН

Fig. 7. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears due to the replacement of spacers by a distributed load on the number of spacers if there are loops  $P_{ш} + P_{нз} = 8$  daN and a tap: 1, 3 – calculation by (11) for  $P_o = 5$  daN; 2 –  $P_o = 10$  daN; 3 –  $P_o = 15$  daN; 4 –  $P_o = 20$  daN; 1, 2 –  $P_p = 2$  daN; 3, 4 –  $P_p = 3$  daN

Расчет при длине пролета  $l = 30$  м (в пролете  $n = 3$  распорки) и  $P_o = 20$  даН,  $P_{ш} + P_{нз} = 8$  даН по формуле (10) дает погрешность  $\delta_f = -6,4$  %, а по (11) по-

грешность снижается до  $\delta_f = 1,3\%$ . С увеличением длины пролета погрешность снижается, так как уменьшаются коэффициенты  $K_r$  и  $K_p$ . Например, при длине пролета  $l = 50$  м (в пролете  $n = 5$  распорок) погрешность расчета по формулам изменяется от  $\delta_f = -7,7\%$  до  $\delta_f = 0,9\%$ .

Трудность вызывает определение силы от отпайки  $\bar{P}_o$  (рис. 4), так как она зависит от положения точек крепления зажимов к электрическому аппарату  $\bar{R}_a$  и к шине  $\bar{R}_o$ , которое, в свою очередь, зависит от этой силы. При некилевом расположении отпайки, а также при ветровом воздействии по формулам (1) и (9) определяют максимальные отклонения по осям  $y$  и  $z$ .

В случае действия ветровой и гололедной нагрузок тяжение и стрелы провеса возрастают, в гололедном режиме тяжение может выйти за пределы допустимого значения, поэтому этот климатический режим в большинстве случаев следует принимать за исходный.

При наличии натяжных гирлянд изоляторов и учете ветровой нагрузки погрешность расчета возрастает из-за несовпадения формы провисания системы «гирлянды изоляторов – провод» с параболой, отклонения составляющих проходят в разных плоскостях. В [7] доказано возрастание погрешности расчета с увеличением длины гирлянды изоляторов. Точное определение стрел провеса и тяжений возможно при применении векторно-параметрического метода расчета статики проводов [7–9], который реализован в компьютерных программах механического расчета [10]. В программах составляющие усилий от отпайки  $\bar{P}_o$  находятся итерационным методом исходя из неизменной длины провода и заданного тяжения или стрелы провеса.

Полученные формулы расчета стрел провеса и тяжений проводов с распорками могут быть распространены на другие конструкции с сосредоточенными нагрузками. Заменять их распределенной нагрузкой простым делением суммарных нагрузок на длину пролета можно в случае их большого количества и малого веса.

## ВЫВОДЫ

1. Получены формулы для определения стрел провеса расщепленной фазы проводов воздушных линий и распределительных устройств при различном числе распорок как функции от их числа и коэффициента сосредоточенных сил  $K_p$ . При этом учитываются разность высот подвеса проводов, натяжные гирлянды изоляторов, ветровые и гололедные нагрузки. Пригодны они в случаях применения внутрифазных и междуфазных распорок. Эти формулы, представленные в удобном для потребителей виде, могут быть использованы для компьютерной реализации механического расчета гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств в различных климатических режимах как при наличии, так и при отсутствии расщепления.

2. Для определения стрел провеса расщепленных проводов воздушных линий можно пользоваться формулами (1) или (4), при наличии натяжных гирлянд изоляторов – формулой (6). Для определения стрел провеса расщепленных проводов распределительных устройств применяется (9).

3. Самые большие погрешности замены распорок распределенной нагрузкой будут при их небольшом числе. Уменьшить погрешность расчета от замены распорок распределенной нагрузкой можно распределением их веса не по длине пролета, а по длине провода, в этом случае расчет ведется по формуле (8).

4. Чем больше величина сосредоточенных сил от отпаяк и шлейфов, тем больше погрешность расчета стрел провеса проводов распределительных устройств. Заменять их распределенной нагрузкой простым делением суммарных нагрузок на длину пролета при наличии отпаяк и шлейфов нельзя, формула (10) дает большую погрешность. Наименьшую погрешность от замены сосредоточенных сил распорок распределенной нагрузкой можно получить по формуле (11).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергосервис, 2009. 695 с.
3. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
4. 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>.
5. 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. 51, № 4. С. 299–309. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
6. 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>.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И. И. Сергей [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Международ. семинара имени Ю. Н. Руденко. Минск: БНТУ, 2015. С. 308–310.

Поступила 21.02.2018 Подписана в печать 24.04.2018 Опубликовано онлайн 30.05.2019

## REFERENCES

1. TCP 339–2011(02230) (2011). Introduced 01.12.2011. *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).
2. Ministry of Energy of Russian Federation (2009) *Electrical Installation Settling Rules 7<sup>th</sup> ed.* Moscow, Energoservis Publ. 695 (in Russian).
3. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
4. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Loads are Replaced by Distributed Ones Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 220–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>.
5. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Warning Spheres. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 51 (4), 299–309 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309>.
6. Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Aerial Warning Spheres 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36>.
7. 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. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ministerstva Vysshego i Srednego Spetsial'nogo Obrazovaniya SSSR. Energetika* [Journal of Higher Educational Institutions of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the USSR. Energetics], (8), 8–14 (in Russian).
8. 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 i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (3–4), 21–29 (in Russian).
9. 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).
10. Sergei I. I., Ponomarenko E. G., Bladyko Yu. V., Klimkovich P. I. (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamical Calculation of Flexible Current-Carrying Structures. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara im. Yu.N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar. Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 308–310 (in Russian).