

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-246-259>

УДК 621.315.176

Упрощенный метод механического расчета гибких проводников распределительных устройств без ограничений по числу отпаяк

Ю. В. Бладыко¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, П. И. Климович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Целью механического расчета гибких проводников распределительных устройств и линий электропередачи является определение стрел провеса, тяжений, нагрузок на опорные конструкции, минимальных расстояний до соседних токоведущих частей и других параметров. Расчеты должны производиться с учетом распределенных и сосредоточенных нагрузок. Распределенные нагрузки, направленные вертикально, определяются весом провода, гирлянд изоляторов, возможных гололедных отложений на них. Распределенные нагрузки в горизонтальной плоскости должны рассчитываться в климатических режимах с боковым напором ветра. Сосредоточенные нагрузки создаются такими элементами, как отпайки к электрическим аппаратам, междуфазные изолирующие распорки, заградительные шары, шлейфы и т. п., и действуют преимущественно в вертикальной плоскости, а в случае отпаяк могут иметь практически произвольное пространственное направление. К наиболее точным методам механического расчета гибких проводников относят методы, основанные на численном решении уравнения проводов в виде гибкой упругой нити. Такой алгоритм реализован в авторской компьютерной программе MR21. Однако во многих случаях предпочтительными оказываются упрощенные методики, доступные более широкому кругу пользователей. В статье представлена упрощенная методика механического расчета гибких проводников, базирующаяся на уравнении состояния провода, позволяющая учитывать сосредоточенные и распределенные нагрузки. Различные климатические режимы и нагрузки учитываются с помощью коэффициентов горизонтальной и вертикальной нагрузки в рассчитываемом и исходном режимах. Приведены выражения для расчета вышеуказанных коэффициентов для любого числа отпаяк в пролете с точным определением их пространственного расположения, а также представлены формулы для расчета стрел провеса и горизонтальных отклонений проводников. Компьютерная программа MR21, апробированная ранее, в данной работе используется в качестве инструмента проверки результатов расчета по предлагаемой упрощенной методике.

Ключевые слова: механический расчет, гибкий проводник, стрела провеса, уравнение состояния, коэффициент нагрузки, отпайка

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Упрощенный метод механического расчета гибких проводников распределительных устройств без ограничений по числу отпаяк / Ю. В. Бладыко, Е. Г. Пономаренко, П. И. Климович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 246–259. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-246-259>

Адрес для переписки

Пономаренко Евгений Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 363-71-73
ef@bntu.by

Address for correspondence

Ponomarenko Eugene G.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 363-71-73
ef@bntu.by

A Simplified Method of Flexible Conductors Mechanic Calculation in Switchgears without Restrictions on the Number of Taps

Y. V. Bladyko¹⁾, E. G. Ponomarenko¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾

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

Abstract. The purpose of the mechanical calculation of flexible conductors of switchgears and power lines is to determine the sag, tensions, and loads on support structures, minimum distances to adjacent live parts and some other parameters. Calculations should be made taking into account distributed and concentrated loads. Distributed loads directed vertically are determined by the weight of the wire, insulator strings, and possible ice deposits on them. Distributed loads in the horizontal plane should be calculated in climatic conditions with lateral wind pressure. Concentrated loads are created by such elements as taps to electrical devices, phase-to-phase insulating spacers, barrier balls, loops, etc. Concentrated loads mainly act in the vertical plane, and in the case of taps, they can have an almost arbitrary spatial direction. The most accurate methods of mechanical calculation of flexible conductors include methods based on the numerical solution of the equation of wires in the form of a flexible elastic thread. Such an algorithm is implemented in the author's computer program MR21. However, in many cases, simplified methods of mechanical calculation are preferable, as they are available to a wider range of users. The simplified method of mechanical calculation of flexible conductors proposed in the article is based on the equation of state of the wire and allows taking into account concentrated and distributed loads. Various climatic regimes and loads are taken into account using the horizontal and vertical load factors in the calculated and initial modes. Expressions are proposed for calculating the above coefficients for any number of taps in a span and with an accurate approach to taking into account their spatial arrangement. Formulas for calculating sag and horizontal deflections of conductors are given, too. The MR21 computer program, tested earlier, has been used in this work as a tool for checking the calculation results using the proposed simplified method.

Keywords: mechanical calculation, flexible conductor, sag, equation of state, load factor, tap

For citation: Bladyko Y. V., Ponomarenko E. G., Klimkovich P. I. (2023) A Simplified Method of Flexible Conductors Mechanic Calculation in Switchgears without Restrictions on the Number of Taps. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (3), 246–259 <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-246-259> (in Russian)

Введение

Предыдущие работы авторов [1–13] посвящены развитию методов механического расчета проводников воздушных линий и распределительных устройств, которые в дополнение к распределенным нагрузкам, таким как вес провода, учитывают сосредоточенные нагрузки от отпаек к электрическим аппаратам, распорок, заградительных шаров и других возможных элементов пролета. Для проектировщиков определенным интерес представляют инженерные методы расчета тяжений и стрел провеса на линиях, позволяющие выполнить расчет без компьютерных программ [1–7], работу с которыми предварительно нужно освоить.

В статье [1] авторами доказано, что сосредоточенные нагрузки можно заменять распределенными. Это удобно при учете в пролете натяжных гирлянд изоляторов, ветровых нагрузок, особенностей геометрии пролета. Однако при таком подходе имеется определенная погрешность расчета

в сравнении с численными методами, и некоторые элементы пролета, такие как заградительные шары и дистанционные распорки, могут учитываться лишь как сосредоточенные нагрузки [2–5]. При использовании различных типов гирлянд изоляторов в пролете необходимо уточнение механического расчета [5, 6]. В [7] предложен метод расчета горизонтальных составляющих усилий от отпаяк в пролете и воздействия ветра и рекомендовано принимать, что направление этих усилий должно совпадать при расчете, так как при этом возможны максимальные горизонтальные отклонения, а соответственно, и сближения проводников. При отсутствии ветровой нагрузки предложено использовать формулы для расчета горизонтальных отклонений и нагрузки после определения произведения горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки и коэффициента увеличения горизонтальных отклонений на погонную нагрузку [7].

Компьютерная программа механического расчета токоведущих конструкций с гибкими проводниками MR21, разработанная в БНТУ [8–12], в простейших случаях дает результаты, хорошо коррелирующие с результатами расчета по методике, принятой в проектной практике. Инженерная методика дает хороший результат при условии достаточно точного определения усилий от отпаяк. Иногда это представляет сложную задачу, так как отпайки могут монтироваться в пролетах с некоторым начальным тяжением и учета веса провода будет недостаточно. Однако на стадии апробирования предлагаемой упрощенной методики расчет усилий от отпаяк можно осуществить с помощью компьютерной программы MR21, в которой реализован точный подход к определению пространственного расположения проводов и отпаяк.

В [13] предложен упрощенный метод механического расчета гибких проводов, позволяющий принимать во внимание сосредоточенные и распределенные нагрузки, различные температурные режимы, гирлянды изоляторов и другие элементы пролета. Однако он применим только при наличии одной отпайки в пролете, что соответствует конструкциям линейных пролетов распределительных устройств. В шинных пролетах количество отпаяк может достигать трех и более. В указанной статье различные климатические режимы и нагрузки учитываются с помощью коэффициентов горизонтальной и вертикальной нагрузки, предложены выражения для расчета коэффициентов для одной отпайки в пролете. Приведены формулы для расчета стрел провеса и горизонтальных отклонений проводников с учетом действия отпайки. Даны примеры применения расчетных формул при расположении отпайки в зависимости от направления ветра и при их вертикальном расположении. Сверка результатов расчета с программой MR21 дала хорошие результаты.

Цель данной работы – развитие инженерной методики механического расчета гибких проводников распределительных устройств и линий электропередачи любой пространственной конфигурации для учета отпаяк к электрическим аппаратам без ограничения их количества.

Схема пролета с гибкими проводниками и основными конструктивными элементами в вертикальной плоскости xAy представлена на рис. 1а. При наличии горизонтальных составляющих усилий, например от отпаяк

P_{zi} или ветровых нагрузок, подобная схема составляется и для горизонтальной плоскости xAz .

Схема замещения пролета в виде балки на шарнирных опорах с распределенными и сосредоточенными нагрузками показана на рис. 1б. Она может использоваться как для вертикальной, так и для горизонтальной плоскости.

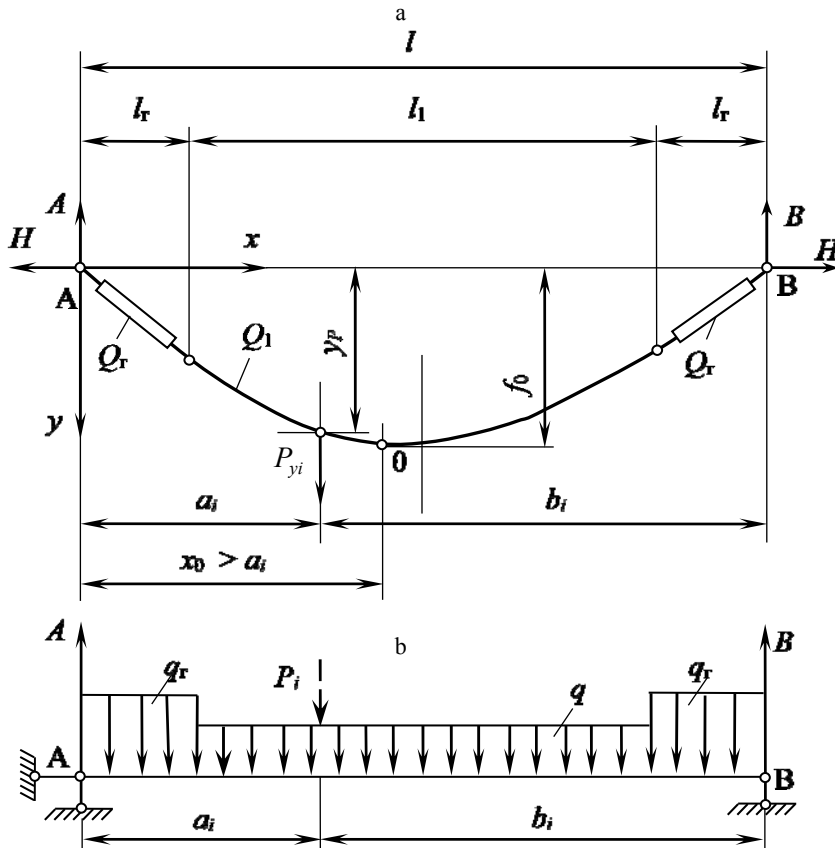


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с гибким проводом весом Q_1 , гирляндами изоляторов Q_r и сосредоточенными силами P_{yi} в вертикальной плоскости; б – схема замещения пролета простой разрезной балкой на шарнирных опорах с распределенными нагрузками от провода q и гирлянд изоляторов q_r и сосредоточенными нагрузками P_i в вертикальной или горизонтальной плоскостях

Fig. 1. Estimated span scheme: а – span with flexible wire weight of Q_1 , insulator strings Q_r and concentrated forces in the vertical plane P_{yi} ; б – span replacement scheme by a simple split beam on hinged supports with distributed loads from wire q and insulator strings q_r and concentrated loads P_i in vertical or horizontal planes

Расчет стрел провеса без ограничения числа и расположения отпаек в пролете

Пусть в расчетной схеме пролета (рис. 1) имеются n отпаек, которые создают n сосредоточенных сил, передающихся на провод. Тогда опорные балочные реакции определяются следующим образом:

$$A_y = \frac{q_y l}{2} + (q_{yr} - q_y) l_r + \frac{\sum_{i=1}^n P_{yi} b_i}{l}; \quad A_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr} - q_z) l_r + \frac{\sum_{i=1}^n P_{zi} b_i}{l};$$

$$B_y = \frac{q_y l}{2} + (q_{yr} - q_y) l_r + \frac{\sum_{i=1}^n P_{yi} a_i}{l}; \quad B_z = \frac{q_z l}{2} + (q_{zr} - q_z) l_r + \frac{\sum_{i=1}^n P_{zi} a_i}{l},$$

где P_{yi} – сосредоточенная сила от i -й отпайки, определяемая весом провода и гололеда (при наличии); P_{zi} – усилие от i -й отпайки в горизонтальной плоскости при действии ветра; a_i, b_i – расстояния до i -й сосредоточенной силы P_i от опор A и B ; l – длина пролета; l_r – длина натяжной гирлянды изоляторов; q_y – удельный вес провода и возможных гололедных отложений; q_z – удельная нагрузка на провод от ветрового воздействия; q_{yr} – удельный вес гирлянды изоляторов и возможных гололедных отложений; q_{zr} – удельная нагрузка на гирлянду изоляторов от ветрового воздействия.

Определим стрелу провеса $y(x)$ в каждой точке в зависимости от координаты x на всех участках разбиения расчетного пролета: по гирлянде изоляторов, от конца гирлянды до отпайки, а также на участках между отпайками:

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

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[A_y x - q_{yr} l_r \left(x - \frac{l_r}{2} \right) - \frac{q_y (x - l_r)^2}{2} \right] \text{ при } l_r < x \leq a_1;$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[A_y x - q_{yr} l_r \left(x - \frac{l_r}{2} \right) - \frac{q_y (x - l_r)^2}{2} - P_{y1} (x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

...

$$y_{k+2}(x) = \frac{1}{H} \left[A_y x - q_{yr} l_r \left(x - \frac{l_r}{2} \right) - \frac{q_y (x - l_r)^2}{2} - \sum_{i=1}^k P_{yi} (x - a_i) \right]$$

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

...

$$y_{n+2}(x) = \frac{1}{H} \left[A_y x - q_{yr} l_r \left(x - \frac{l_r}{2} \right) - \frac{q_y (x - l_r)^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_{yi} (x - a_i) \right]$$

при $a_n < x \leq l - l_r$;

$$y_{n+3}(x) = \frac{1}{H} \left[A_y x - q_{y\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - q_y l_1 \left(x - l_\Gamma - \frac{l_1}{2} \right) - q_{y\Gamma} \frac{(x - l + l_\Gamma)^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_{yi} (x - a_i) \right]$$

при $l - l_{r2} < x \leq l$,

где H – горизонтальная составляющая тяжения провода.

Координату x точки, соответствующей максимальной стреле провеса, можно определить по следующим выражениям на разных участках разбиения пролета:

$$x_0 = \frac{A_y}{q_{y\Gamma}} \text{ при } 0 \leq x_0 < l_\Gamma;$$

$$x_0 = \frac{A_y - q_{y\Gamma} l_\Gamma}{q_y} + l_\Gamma \text{ при } l_\Gamma < x_0 < a_1;$$

$$x_0 = \frac{A_y - P_{y1} - q_{y\Gamma} l_\Gamma}{q_y} + l_\Gamma \text{ при } a_1 < x_0 < a_2;$$

...

$$x_0 = \frac{A_y - \sum_{i=1}^k P_{yi} - q_{y\Gamma} l_\Gamma}{q_y} + l_\Gamma \text{ при } a_k < x_0 < a_{k+1} \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{);}$$

...

$$x_0 = \frac{A_y - \sum_{i=1}^n P_{yi} - q_{y\Gamma} l_\Gamma}{q_y} + l_\Gamma \text{ при } a_n < x_0 < l - l_\Gamma;$$

$$x_0 = \frac{A_y - \sum_{i=1}^n P_{yi} - q_y l_1 - q_{y\Gamma} l_\Gamma}{q_{y\Gamma}} + l - l_\Gamma \text{ при } l - l_\Gamma < x_0 \leq l.$$

Если условия в правой части уравнений не выполняются, то максимальная стрела провеса расположена на границе участка разбиения провода или в месте приложения одной из сосредоточенных сил $x_0 = a_i$. Если высоты подвеса провода находятся на разных уровнях, то можно пользоваться формулами [1]. Для расчета усилий от отпаяк рекомендуются апробированные формулы, учитывающие реальное расположение отпаяк в пролете [13].

Определим горизонтальные отклонения $z(x)$ в каждой точке в зависимости от координаты x на всех участках разбиения расчетного пролета:

$$z_1(x) = \frac{1}{H} \left[A_z x - \frac{q_{z\Gamma} x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x_0 < l_\Gamma;$$

$$\begin{aligned}
z_2(x) &= \frac{1}{H} \left[A_z x - q_{z\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_\Gamma)^2}{2} \right] \text{ при } l_\Gamma < x_0 < a_1; \\
z_3(x) &= \frac{1}{H} \left[A_z x - q_{z\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_\Gamma)^2}{2} - P_{z1} (x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x_0 < a_2; \\
&\dots \\
z_{k+2}(x) &= \frac{1}{H} \left[A_z x - q_{z\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_\Gamma)^2}{2} - \sum_{i=1}^k P_{zi} (x - a_i) \right] \\
&\text{при } a_k < x_0 < a_{k+1} \quad (k = 2 \dots n-1); \\
&\dots \\
z_{n+2}(x) &= \frac{1}{H} \left[A_z x - q_{z\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - \frac{q_z (x - l_\Gamma)^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_{zi} (x - a_i) \right] \\
&\text{при } a_n < x_0 < l - l_\Gamma; \\
&\dots \\
z_{n+3}(x) &= \\
= \frac{1}{H} \left[A_z x - q_{z\Gamma} l_\Gamma \left(x - \frac{l_\Gamma}{2} \right) - q_z l_1 \left(x - l_\Gamma - \frac{l_1}{2} \right) - q_{z\Gamma} \frac{(x - l + l_\Gamma)^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_{zi} (x - a_i) \right] \\
&\text{при } l - l_\Gamma < x_0 \leq l.
\end{aligned}$$

Координату x точки, соответствующей максимальному горизонтальному отклонению, можно определить по следующим выражениям на разных участках разбиения пролета:

$$\begin{aligned}
x_0 &= \frac{A_z}{q_{z\Gamma}} \text{ при } 0 \leq x_0 < l_\Gamma; \\
x_0 &= \frac{A_z - q_{z\Gamma} l_\Gamma}{q_z} + l_\Gamma \text{ при } l_\Gamma < x_0 < a_1; \\
x_0 &= \frac{A_z - P_{z1} - q_{z\Gamma} l_\Gamma}{q_z} + l_\Gamma \text{ при } a_1 < x_0 < a_2; \\
&\dots \\
x_0 &= \frac{A_z - \sum_{i=1}^k P_{zi} - q_{z\Gamma} l_\Gamma}{q_z} + l_\Gamma \text{ при } a_k < x_0 < a_{k+1} \quad (k = 2 \dots n-1); \\
&\dots \\
x_0 &= \frac{A_z - \sum_{i=1}^n P_{zi} - q_{z\Gamma} l_\Gamma}{q_z} + l_\Gamma \text{ при } a_n < x_0 < l - l_\Gamma;
\end{aligned}$$

$$x_0 = \frac{A_z - \sum_{i=1}^n P_{zi} - q_z l_1 - q_{zr} l_r}{q_{zr}} + l - l_r \text{ при } l - l_r < x_0 \leq l.$$

Если условия в правой части уравнений не выполняются, то максимальное отклонение провода будет наблюдаться на границе участка разбиения провода, например в месте приложения одной из сосредоточенных сил $x_0 = a_i$.

Порядок расчета коэффициентов нагрузки при наличии двух и более отпаек

Уравнение состояния провода имеет вид [4]

$$\begin{aligned} \alpha_y H - \frac{\left[(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2 \right] l^2}{24H^2} + \alpha t = \\ = \alpha_y H_0 - \frac{\left[(q_{y0} K_{y0})^2 + (q_{z0} K_{z0})^2 \right] l^2}{24H_0^2} + \alpha t_0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\alpha_y = \frac{1}{EA}$ – коэффициент упругого удлинения материала проводника; E – модуль упругости материала проводника; A – полное сечение провода; α – коэффициент температурного удлинения материала проводника; t, t_0 – температура провода в расчетном и исходном режимах соответственно; K_y, K_z – коэффициенты вертикальной и горизонтальной нагрузки соответственно; $K_y^2 = \frac{12D_y}{q_y^2 l^2 l_1}$; $K_z^2 = \frac{12D_z}{q_z^2 l^2 l_1}$; $l_1 = l - 2l_r$.

При $q_z = 0$ рассчитываем произведение $q_z K_z$ и подставляем в (1), где с индексом «0» фигурируют параметры исходного режима, а без индекса – текущего.

Интегралы D_y и D_z для расчета коэффициентов нагрузки [6] определяются как:

$$\begin{aligned} D_y = \int_0^{l_r} Q_{y1}^2(x) dx + \int_{l_r}^{a_1} Q_{y2}^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_{y3}^2(x) dx + \dots + \int_{a_k}^{a_{k+1}} Q_{y(k+2)}^2(x) dx + \dots + \\ + \int_{a_n}^{l-l_r} Q_{y(n+2)}^2(x) dx + \int_{l-l_r}^l Q_{y(n+3)}^2(x) dx; \end{aligned}$$

$$D_z = \int_0^{l_r} Q_{z1}^2(x) dx + \int_{l_r}^{a_1} Q_{z2}^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_{z3}^2(x) dx + \dots + \int_{a_k}^{a_{k+1}} Q_{z(k+2)}^2(x) dx + \dots + \\ + \int_{a_n}^{l-l_r} Q_{z(n+2)}^2(x) dx + \int_{l-l_r}^l Q_{z(n+3)}^2(x) dx,$$

где $Q_{y1}(x) \dots Q_{y(n+3)}(x)$ – вертикальные балочные поперечные силы на всех участках разбиения провода в пролете в соответствии с рис. 1:

$$Q_{y1}(x) = A_y - q_{y\Gamma}x; \\ Q_{y2}(x) = A_y - q_{y\Gamma}l_r - q_y(x - l_r); \\ Q_{y3}(x) = A_y - P_{y1} - q_{y\Gamma}l_r - q_y(x - l_r); \\ \dots \\ Q_{y(k+2)}(x) = A_y - \sum_{i=1}^k P_{yi} - q_{y\Gamma}l_r - q_y(x - l_r); \\ \dots \\ Q_{y(n+2)}(x) = A_y - \sum_{i=1}^n P_{yi} - q_{y\Gamma}l_r - q_y(x - l_r); \\ Q_{y(n+3)}(x) = A_y - \sum_{i=1}^n P_{yi} - q_{y\Gamma}l_r - q_y l_1 - q_{y\Gamma}(x - l + l_r);$$

$Q_{z1}(x) \dots Q_{z(n+3)}(x)$ – горизонтальные балочные поперечные силы на всех участках разбиения пролета в соответствии с рис. 1:

$$Q_{z1}(x) = A_z - q_{z\Gamma}x; \\ Q_{z2}(x) = A_z - q_{z\Gamma}l_r - q_z(x - l_r); \\ Q_{z3}(x) = A_z - P_{z1} - q_{z\Gamma}l_r - q_z(x - l_r); \\ \dots \\ Q_{z(k+2)}(x) = A_z - \sum_{i=1}^k P_{zi} - q_{z\Gamma}l_r - q_z(x - l_r); \\ \dots \\ Q_{z(n+2)}(x) = A_z - \sum_{i=1}^n P_{zi} - q_{z\Gamma}l_r - q_z(x - l_r); \\ Q_{z(n+3)}(x) = A_z - \sum_{i=1}^n P_{zi} - q_{z\Gamma}l_r - q_z l_1 - q_{z\Gamma}(x - l + l_r).$$

Направление действия как распределенных, так и сосредоточенных усилий от отпайки определяет их знак в соответствии с направлением ко-

ординатных осей. Направление скорости ветра при расчетах принято совпадающим с направлением оси z .

Сложности в применении приведенных выражений для расчета коэффициентов нагрузки возникают из-за того, что нам не известны с достаточной точностью усилия от отпаяк в горизонтальной и вертикальной плоскостях (P_z и P_y), которые определяются координатами их начала и конца, провесом и натяжением провода отпаяк. В настоящей работе указанные усилия находили с помощью компьютерной программы MR21 [8], где координаты и тяжения провода отпайки определяются итерационным путем.

Механический расчет пролета распределительного устройства с тремя отпайками

Исходные данные для механического расчета: длина пролета $l = 56,5$ м; провод $2 \times \text{АС300/39}$ (вес провода $q_y = 1,131$ даН/м, площадь сечения $F = 2 \times 339,6$ мм², модуль упругости материала провода $E = 7856$ даН/мм²); тяжение в фазе в исходном режиме $H = 1500$ даН; натяжная гирлянда изоляторов (вес $q_{\text{ит}} = 52,98$ даН/м, длина гирлянды $l_t = 3,72$ м); высота подвеса проводов $H_A = H_B = 15$ м. Отпайки к аппаратам крепятся к проводу на удалении $a_1 = 15$ м, $a_2 = 35,5$ м и $a_3 = 41,5$ м от опоры соответственно.

Исходный климатический режим: скорость ветра $v = 13$ м/с; толщина стенки гололеда $b = 15$ мм; температура $t = -5$ °С. В режиме максимального напора ветра его скорость принимается $v = 30$ м/с, максимальная температура $t = 30$ °С.

Высоты электрических аппаратов: $H_{\text{ан1}} = 5$ м, $H_{\text{ан2}} = 10$ м, $H_{\text{ан3}} = 6$ м. Расположение аппаратов в пролете килевое ($z_C = 0$). Отпайки выполнены тем же проводом, что и сборные шины.

В табл. 1 приведены результаты механического расчета гибких проводников в пролете с тремя отпайками по предложенной методике, проведено их сравнение с результатами, полученными с помощью MR21 [12]. В качестве усилий от отпаяк P_y и P_z применялись значения, рассчитанные MR21, что позволило повысить точность расчетов по упрощенной методике для более качественного сопоставления результатов. В проектной практике эти значения можно получить, зная физико-геометрические характеристики отпаяк. Тяжение определяли по (1) во всех климатических режимах, исходя из величины тяжения в исходном режиме и коэффициентов нагрузки в каждом режиме.

Результаты расчета стрел провеса, тяжений и указанных коэффициентов приведены в табл. 1, при этом значения в скобках использованы для расчета режимов при отсутствии ветровых нагрузок [7].

Таблица 1

Результаты расчета гибких проводов с тремя отпайками в пролете
Calculation results for a flexible wire with three taps in a span

№ п/п	Климатические условия	Нагрузка на провод q_y/q_z , даН/м	Нагрузка на гирлянду $q_{yг}/q_{zг}$, даН/м	Коэффициент нагрузки K_y/K_z	Силы от отпаяк P_y/P_z по MR21, даН	Стрелы провеса у отпаяк y_0/z_0 , м	Тяже-ние H , даН	Тяже-ние H по MR21, даН	Стрелы провеса у отпаяк y_0/z_0 по MR21, м
1	$v = 13$ м/с, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/ 2,03	79,47/ 2,62	2,053/ 1,449	47/14	1,93/0,58	1500	1500	1,92/0,58
					20/6	2,22/0,69			2,22/0,69
					42/12	1,96/0,59			1,95/0,59
2	$v = 30$ м/с, $b = 0$, $t = -5$ °С	2,87/ 2,71	52,98/ 12,23	2,203/ 1,464	29/15	1,66/1,11	1040	1046	1,65/1,12
					12/6	1,90/1,30			1,89/1,32
					26/13	1,69/1,12			1,68/1,13
3	$v = 0$, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/0	79,47/0	2,053/0	47/0	2,00/0	1445	1444	2,00/0
					20/0	2,31/0			2,30/0
					42/0	2,04/0			2,03/0
4	$v = 0$, $b = 0$, $t = 30$ °С	2,87/0	52,98/0	2,151/0	26/0	2,06/0	822	816	2,06/0
					11/0	2,36/0			2,36/0
					23/0	2,09/0			2,09/0
5	$v = 13$ м/с, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/ 2,03	79,47/ 2,62	2,088/ 1,570	47/14	1,96/0,62	1500	1500	1,95/0,64
					28/15*	2,29/0,77			2,28/0,77
					41/12	2,01/0,65			2,00/0,65
6	$v = 30$ м/с, $b = 0$, $t = -5$ °С	2,87/2,71	52,98/12,23	2,245/ 1,563	29/15	1,67/1,15	1051	1055	1,66/1,16
					17/16*	1,94/1,42			1,94/1,43
					26/13	1,72/1,20			1,71/1,21
7	$v = 0$, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/0	79,47/0	2,082/ (0,254)	47/0	2,05/0,03	1434	1428	2,04/0,03
					26/8*	2,39/0,07			2,38/0,08
					42/0	2,10/0,05			2,09/0,06
8	$v = 0$, $b = 0$, $t = 30$ °С	2,87/0	52,98/0	2,176/ (0,127)	26/0	2,10/0,03	815	808	2,10/0,03
					14/4*	2,43/0,07			2,44/0,08
					23/0	2,15/0,05			2,14/0,06
9	$v = 13$ м/с, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/ 2,03	79,47/2,62	2,078/ 1,282	47/14	1,95/0,53	1500	1500	1,94/0,54
					26/-7**	2,27/0,57			2,27/0,58
					41/12	2,00/0,51			1,99/0,51
10	$v = 30$ м/с, $b = 0$, $t = -5$ °С	2,87/ 2,71	52,98/12,23	2,238/ 1,349	29/15	1,71/1,06	1026	1030	1,70/1,07
					17/-7**	1,98/1,17			1,99/1,17
					25/14	1,75/1,03			1,75/1,03
11	$v = 0$, $b = 15$ мм, $t = -5$ °С	5,09/0	79,47/0	2,078/ (0,254)	47/0	2,01/-0,03	1458	1455	2,00/-0,03
					26/-8**	2,34/-0,07			2,34/-0,08
					41/0	2,06/-0,05			2,05/-0,06
12	$v = 0$, $b = 0$, $t = 30$ °С	2,87/0	52,98/0	2,176/ (0,127)	26/0	2,06/-0,03	829	823	2,06/-0,03
					14/-4**	2,39/-0,06			2,40/-0,08
					23/0	2,11/-0,05			2,11/-0,06

Примечание. Расстояние от шины до аппарата в плоскости, перпендикулярной пролету: * $z_{C2} = 5$ м; ** $z_{C2} = -5$ м.

Сравнение результатов расчета по предлагаемой методике с MR21 показывает удовлетворительное совпадение, особенно в части расчета стрел провеса. При расчете тяжений погрешность не превышает 6,5 %, что также можно считать удовлетворительным результатом.

Авторы пришли к выводу, что погрешность в основном объясняется различиями в подходах к учету натяжных гирлянд изоляторов в разработанной методике и в компьютерной программе. Так, в упрощенной методике проекция длины гирлянды на горизонтальную ось приравнивается к длине и не учитывается растяжение гирлянды под действием нагрузок в разных температурных режимах. С увеличением длины гирлянды возрастает и погрешность.

Расположение отпаек в горизонтальной плоскости по направлению ветра или против него при одинаковых прочих исходных данных влияет на величину тяжения (табл. 1). Тем самым подтверждается актуальность рекомендации принимать за расчетный случай расположение отпаек по направлению ветра, поскольку тогда наблюдаются наибольшие горизонтальные отклонения и, соответственно, увеличение тяжений [7]. При расположении отпайки против ветра ситуация обратная.

Важно, чтобы отпайки в распределительном устройстве были смонтированы без дополнительного натяжения, иначе это создает дополнительные нагрузки на аппараты, например при воздействии ветра, а также затрудняет определение усилий от отпаек для использования в предложенной методике. Если эти усилия будут определены с погрешностью не более 30 %, то погрешности в расчете стрел провеса составят не более 6 %, тяжений – не более 2 %.

Результаты табл. 1 по разработанной методике коррелируют с расчетами по широко апробированной MR21, что позволяет сделать вывод о возможности применения методики в проектной практике.

ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная методика механического расчета гибких проводников без ограничения по числу отпаек к электрическим аппаратам и с точным подходом к учету их пространственного расположения. Методика учитывает ветровые и гололедные нагрузки, различные температурные режимы, гирлянды изоляторов и другие элементы полета.

2. Приведены выражения, позволяющие определить коэффициенты вертикальной и горизонтальной нагрузки, стрелы провеса и тяжения проводников независимо от числа отпаек в полете и с учетом возможных климатических режимов, в том числе разного направления напора ветра.

3. Проведенный расчетный эксперимент показал хорошее совпадение результатов по предложенной методике в сравнении с результатами численного расчета по программе MR21, в алгоритме которой использован векторно-параметрический метод расчета гибких проводников электроустановок, основанный на представлении провода в виде гибкой упругой нити, на которую воздействуют распределенные и сосредоточенные нагрузки.

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. 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>.
3. 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>.
4. Бладыко, Ю. В. Учет расporок 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
9. Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпози. / Польская академия наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988. Закопане, 1988. С. 173–181.
10. Streluik, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streluik, 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. Сергей, И. И. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Ю. В. Бладыко, П. И. Климкович // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы Международного семинара имени Ю. Н. Руденко. Минск, БНТУ, 2015. С. 308–310.
13. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов с учетом отпаек 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>.

Поступила 08.02.2023 Подписана в печать 10.04.2023 Опубликована онлайн 31.05.2023

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*

- nal Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107> (in Russian).
2. 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).
 3. 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).
 4. 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).
 5. 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).
 6. 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).
 7. Bladyko Yu.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 Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 500–514. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-500-514> (in Russian).
 8. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ministerstva Vysshego i Srednego Spetsial'nogo Obrazovaniya SSSR. Energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions of the USSR Ministry of Higher and Secondary Special Education. Power Engineering], (8), 8–14 (in Russian).
 9. Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *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 i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (3–4), 21–29 (in Russian).
 12. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Ponomarenko E. G., Klimkovich P. I. (2015) Software Package for Mechanical and Electrodynamics Calculation of Flexible Current-Carrying Structures. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodological Issues of Reliability Research for Large Energy Systems. Materials of the International Seminar named after Yu. N. Rudenko]. Minsk, BNTU, 308–310 (in Russian).
 13. Bladyko Y. V., Ponomarenko E. G. (2021) Mechanical Calculation of Flexible Wires Taking into Account Taps to Electrical Apparatuses. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 109–120. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-109-120> (in Russian).