

УДК 621.315.176

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОШИНОВКИ  
С ОТПАЙКОЙ В СЕРЕДИНЕ ПРОЛЕТА  
RESULTS OF A MECHANICAL CALCULATION OF A BUSBAR  
WITH A TAP IN THE MID-SPAN

Бладыко Ю.В., к-т. техн. наук, доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
Y. Vladyko, Candidate of Technical Sciences, Docent,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация. Приведены формулы для расчета коэффициентов увеличения стрелы провеса с учетом составляющих сил от отпайки. Даются примеры применения расчетных формул для разных вариантов пролетов распределительных устройств.*

*Abstract. Formulas are given for calculating the coefficients of increasing the sag, taking into account the components of the forces from the tap. Examples of application of calculation formulas for different variants of spans of subspans are given.*

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гирлянды изоляторов, пролет, отпайка.

Keywords: sag, tension, insulator strings, span, tap.

## ВВЕДЕНИЕ

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета РУ  $l = 30$  м, провод 264/34 АCSR с погонным весом  $q_v = 0,98$  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  $q_{гв} = 30$  даН/м, длина каждой натяжной гирлянды изоляторов  $l_r = 2$  м. Высоты подвеса провода к порталам  $H_A = H_B = 15$  м. Отпайка к электрическому аппарату крепится в середине пролета сборных шин на расстоянии  $z_C$  от оси пролета. Высота электрического аппарата  $H_{ап} = 2$  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  $V = 15$  м/с, толщина стенки гололеда  $b = 20$  мм.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В таблице 1 приведены результаты расчета по предложенной методике [1] в сравнении с результатами, полученными по компьютерной программе MR21 [2, 3]. При расчете стрел провеса подставлялись составляющие сил от отпайки  $P_v$  и  $P_z$ , рассчитанные с учетом их реального расположения по программе MR21. Тяжение в различных климатических режимах определялось решением уравнения состояния. Значения, стоящие в скобках, используются при отсутствии ветровых нагрузок [1]. Максимальные стрелы провеса и горизонтальные отклонения определяются в точке крепления отпайки, расположенной в середине пролета.

Таблица 1 – Результаты расчетов

№ пп	Конфигурация отпайки	Климатические условия	Нагрузка на провод $q_y / q_z$ , даН/м	Нагрузка на гирлянду $q_{гy} / q_{гz}$ , даН/м	Сила от отпайки по MR21 $P_y / P_z$ , даН	Коэффициент увеличения стрелы провеса $K_{fy} / K_{fz}$ ( $q_z K_{fz}$ )	Тяже-ние $H$ , даН	Макс. стрелы провеса $y_0 / z_0$ , м
1	$z_c = 10$ м	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/4	2,547/(0,267)	490	0,57/0,06
2		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	39/25	2,380/2,142	1059	0,62/0,34
3		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	17/19	2,683/2,263	672	0,44/0,46
4		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/4	2,547/(0,267)	368	0,76/0,08
5	$z_c = -10$ м	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	16/-4	2,615/ (-0,267)	490	0,59/-0,06
6		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	45/-5	2,544/0,816	1012	0,69/0,14
7		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	22/-1	3,023/1,166	603	0,55/0,26
8		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/-4	2,547/ (-0,267)	364	0,77/-0,08
9	$z_c = 0$	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	12/0	2,343/1	490	0,53/0
10		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	35/13	2,270/1,612	1034	0,60/0,26
11		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	18/9	2,751/1,715	656	0,46/0,36
12		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	12/0	2,343/1	359	0,72/0

Пример расчета отклонений токопровода для гололедного режима с ветром, совпадающим с направлением отпайки (по данным п. 2 табл. 1).

Первое приближение составляющих усилий от отпаяк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_c^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 2,43 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 39,8 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_c^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 1,51 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 24,8 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left( \frac{q_{гy}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left( \frac{45}{2,43} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 39,8}{2,43 \cdot 30} = 2,40;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left( \frac{q_{гz}}{q_z} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left( \frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 24,8}{1,51 \cdot 30} = 2,13.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,40}{8 \cdot 1059} = 0,62 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 2,13}{8 \cdot 1059} = 0,34 \text{ м}.$$

Проведем уточнение сил от отпайки, задаваясь ее стрелой провеса  $f_C = 1,33$  м:

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

$$= \frac{2,43 \cdot |10 - 0,34|}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,62}{4 \cdot 1,33} \right] = 39,0 \text{ даН};$$

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

$$= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,62]}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(10 - 0,34) \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = 26,3 \text{ даН}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для режима наибольшего скоростного напора ветра, совпадающего с направлением отпайки (по данным п. 3 табл. 1).

Составляющие усилий от отпаяк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right)^2} = 0,98 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15 + 15}{2} - 2 \right)^2} = 16,1 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right)^2} = 1,22 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15 + 15}{2} - 2 \right)^2} = 20,0 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left( \frac{q_{fy}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left( \frac{30}{0,98} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 16,1}{0,98 \cdot 30} = 2,62;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left( \frac{q_{fz}}{q_z} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left( \frac{16,31}{1,22} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 20,0}{1,22 \cdot 30} = 2,29.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{0,98 \cdot 30^2 \cdot 2,62}{8 \cdot 672} = 0,43 \text{ м}; \quad z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,22 \cdot 30^2 \cdot 2,29}{8 \cdot 672} = 0,47 \text{ м}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для климатического режима без ветра (по данным п. 1 табл. 1).

Составляющие усилий от отпаек

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2} = 0,98 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 16,1 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2} = 0 \cdot \sqrt{10^2 + \left( \frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 0 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса определяем при  $P_z \approx H_C = 4$  даН, где  $H_C$  – тяжеие в отпайке. При отсутствии ветра пользуемся формулами расчета горизонтальных отклонений и нагрузки после нахождения произведений коэффициента увеличения горизонтальных отклонений и горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки на погонную нагрузку:

$$K_{fy} = 1 + 4 \left( \frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left( \frac{30}{0,98} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 16,1}{0,98 \cdot 30} = 2,62;$$

$$q_z K_{fz} = q_z + 4(q_{rz} - q_z) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{l} = 0 + 4(0 - 0) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 4,0}{30} = 0,27.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{0,98 \cdot 30^2 \cdot 2,62}{8 \cdot 490} = 0,59 \text{ м}; \quad z_0 = \frac{(q_z K_{fz}) l^2}{8H} = \frac{0,27 \cdot 30^2}{8 \cdot 490} = 0,06 \text{ м}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для гололедного режима с ветром, не совпадающим с направлением отпайки (по данным п. 6 табл. 1).

Первое приближение составляющих усилий от отпаек

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2} = 2,43 \cdot \sqrt{(-10)^2 + \left( \frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 39,8 \text{ даН};$$

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ап}}]}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{z_C \cdot \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right] = \\ &= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15+15) - 2]}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{-10 \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = -8,6 \text{ даН}. \end{aligned}$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left( \frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left( \frac{45}{2,43} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 39,8}{2,43 \cdot 30} = 2,40;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left( \frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left( \frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot (-8,2)}{1,51 \cdot 30} = 0,66;$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,40}{8 \cdot 1012} = 0,65 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 0,66}{8 \cdot 1012} = 0,11 \text{ м}.$$

Проведем уточнение сил от отпайки, задаваясь ее стрелой провеса  $f_C = 1,33 \text{ м}$ :

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

$$= \frac{2,43 \cdot |-10 - 0,11|}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,65}{4 \cdot 1,33} \right] = 40,8 \text{ даН};$$

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

$$= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,65]}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(-10 - 0,11) \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = -8,4 \text{ даН}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для случая вертикального расположения отпайки (по данным п. 10 табл. 1).

Составляющие усилий от отпайки

$$P_y = q_y \cdot \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right) = 2,43 \cdot \left( \frac{15 + 15}{2} - 2 \right) = 31,6 \text{ даН};$$

$$P_z = 0,5 \cdot q_z \cdot \left( \frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right) = 0,5 \cdot 1,51 \cdot \left( \frac{15 + 15}{2} - 2 \right) = 9,8 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left( \frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left( \frac{45}{2,43} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 31,6}{2,43 \cdot 30} = 2,18;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left( \frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \left( \frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left( \frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left( \frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 9,8}{1,51 \cdot 30} = 1,47.$$

## Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,18}{8 \cdot 1034} = 0,58 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 1,47}{8 \cdot 1034} = 0,24 \text{ м}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты расчетов хорошо совпадают с результатами, полученными по компьютерной программе, что свидетельствует об возможном применении формул расчета составляющих сил от отпаяк в проектной практике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. 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. Климович // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы Международного семинара имени Ю.Н. Руденко. Минск, БНТУ, 2015. С. 308–310.