

УДК 621.3

**МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГИБКИХ ПРОВОДНИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ
НЕСКОЛЬКИХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ СИЛ В ПРОЛЁТЕ**

Никитин Е.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Попкова Н.А.

Определение стрел провеса и тяжений в различных климатических режимах является задачей механического расчета гибких проводов распределительных устройств и воздушных линий. Проектирование распределительных устройств с уменьшенными габаритами и компактных воздушных линий является проблемой современной электроэнергетики. Это увеличивает требования к их расчету, обеспечению в любой точке пролета необходимых по Правилам устройства электроустановок минимальных расстояний до различных объектов при различных видах нагрузок, взятых при проектировании (ветер, гололёд и др.). В механическом расчете гибких проводов распределенной по пролету нагрузкой заменяются сосредоточенные нагрузки от распорок, гирлянд изоляторов, заградительных шаров, шлейфов, отпаяк к электрическим аппаратам и других элементов [1].

Провод с равномерно распределенной нагрузкой в приближенных методах рассматривается как однородная гибкая нить, имеющая внешний вид параболы. Расчет этой нити выполняется по уравнению состояния, вывод которого определяется из сравнения длин нити при разном нагружении и разных климатических условиях [1].

Провод с несколькими разными видами нагрузок должен быть рассмотрен как комбинированная, то есть неоднородная гибкая нить, не являющаяся плавной параболой по всему пролету. Плавность параболы нарушается и в местах приложения равномерно распределенных нагрузок различной интенсивности, и в местах примыкания сосредоточенных сил. При одновременном действии разных нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях (поперечном горизонтальном и вертикальном) получается более сложный вид кривой провисания провода. В этих случаях длина неоднородной нити должна быть определена в виде суммы длин разных участков, на которых сохраняется вид параболы (или сохраняется, допустим, при нагрузке от действия ветра).

По методике [1] уравнение состояния провода ничем не отличается от обычного уравнения состояния, по которому рассчитываются провода воздушных линий с равномерно распределенными нагрузками. Чтобы уравнение можно было применить для неоднородной нити, ее заменяют эквивалентной однородной нитью, что производится путем введения эквивалентной равномерно распределенной нагрузки по длине пролета. Эквивалентная нагрузка устанавливается из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной эквивалентной нагрузкой длине комбинированной нити с распределенными нагрузками разной интенсивности и обобщенно длине нити со сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в различных местах пролета.

Длина неоднородной (комбинированной) нити определяется путем интегрирования дифференциального уравнения нити по участкам. Для перехода от неоднородной нити к эквивалентной однородной при любой схеме загрузки пролета определяется переходный коэффициент K , называемый коэффициентом нагрузки. Приведенная нагрузка вычисляется как произведение величины равномерно распределенной нагрузки для данного пролета на коэффициент нагрузки[2].

Пусть в пролете действуют n сосредоточенных сил. Тогда опорные балочные реакции определяются по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i b_i}{l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l} + \frac{\sum_{i=1}^n P_i a_i}{l},$$

где l – длина пролета;

q – погонный вес провода;

q_{r1}, q_{r2} – погонный вес первой и второй гирлянд изоляторов (с учетом возможного многоцепного исполнения, а также арматуры, зажимов, коромысел, ушек, скоб, серег, промежуточных звеньев и узлов крепления);

l_{r1}, l_{r2} – длины первой и второй натяжных гирлянд изоляторов;

P_i – вес i -ой сосредоточенной нагрузки;

a_i, b_i – расстояния до i -ой сосредоточенной силы P_i от опор А и В.

Для построения зависимости стрелы провеса от координаты x определим $y(x)$ на всех участках:

$$y_1(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - \frac{q_{r1} x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \leq x \leq l_{r1};$$

$$y_2(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} \right] \text{ при } l_{r1} < x \leq a_1;$$

$$y_3(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - P_1(x - a_1) \right] \text{ при } a_1 < x \leq a_2;$$

...

$$y_{k+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^k P_i(x - a_i) \right] \text{ при } a_k < x \leq a_{k+1} \quad (k = 2 \dots n-1);$$

...

$$y_{n+2}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1} l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - \frac{q(x - l_{r1})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i(x - a_i) \right] \text{ при } a_n < x \leq l - l_{r2};$$

$$y_{n+3}(x) = \frac{1}{H} \left[Ax - q_{r1}l_{r1} \left(x - \frac{l_{r1}}{2} \right) - ql_1 \left(x - l_{r1} - \frac{l_1}{2} \right) - q_{r2} \frac{(x - l + l_{r2})^2}{2} - \sum_{i=1}^n P_i(x - a_i) \right]$$

при $l - l_{r2} < x \leq l$,

где x, y – координаты провода;

Для случаев расположения максимальной стрелы провеса на разных участках расстояние до нее рассчитывается по формулам:

$$x_0 = \frac{A}{q_{r1}} \text{ при } 0 \leq x_0 \leq l_{r1};$$

$$x_0 = \frac{A - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } l_{r1} < x_0 \leq a;$$

$$x_0 = \frac{A - P_1 - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_1 < x_0 \leq a_2;$$

...

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_k < x_0 \leq a_{k+1} \text{ (} k = 2 \dots n-1 \text{);}$$

...

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1}}{q} + l_{r1} \text{ при } a_n < x_0 \leq l - l_{r2};$$

$$x_0 = \frac{A - \sum_{i=1}^n P_i - ql_1 - q_{r1}l_{r1}}{q_{r2}} + l - l_{r2} \text{ при } l - l_{r2} < x_0 \leq l.$$

Если не выполняются эти неравенства, то максимальная стрела провеса будет находиться в точке приложения одной из сосредоточенных сил $x_0 = a_i$, дающей $f_0 = \max [y(a_i)]$. На рисунке 16б $x_0 = a_2$.

Расчет коэффициента нагрузки при наличии нескольких сосредоточенных сил.

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

$$L = l + \frac{q^2 l^2 l_1 K^2}{24H^2} = l + \frac{D}{2H^2}, \quad (1)$$

где K – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок: $K^2 = \frac{12D}{q^2 l^2 l_1}$,

Интеграл D для формулы (1) определяется как

$$D = \int_0^{l_{r1}} Q_1^2(x) dx + \int_{l_{r1}}^{a_1} Q_2^2(x) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q_3^2(x) dx + \dots + \int_{a_k}^{a_{k+1}} Q_{k+2}^2(x) dx + \dots + \int_{a_n}^{l-l_{r2}} Q_{n+2}^2(x) dx + \int_{l-l_{r2}}^l Q_{n+3}^2(x) dx$$

$$(k = 2 \dots n-1),$$

где $Q_1(x) - Q_{n+3}(x)$ – балочные поперечные силы соответственно на первой гирлянде, участках провода и второй гирлянде:

$$Q_1(x) = A - q_{r1}x;$$

$$Q_2(x) = A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_3(x) = A - P_1 - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$\dots$$

$$Q_{k+2}(x) = A - \sum_{i=1}^k P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$\dots$$

$$Q_{n+2}(x) = A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$

$$Q_{n+3}(x) = A - \sum_{i=1}^n P_i - q_{r1}l_{r1} - ql_1 - q_{r2}(x - l + l_{r2}).$$

Оценка коэффициента увеличения стрелы провеса.

В [3] было получено выражение для определения коэффициента увеличения стрелы провеса. После учета разных гирлянд изоляторов в пролете его можно записать как

$$K_f = \frac{1 + 2\delta_1 + 2\delta_2 + (\delta_1 - \delta_2)^2 + K_p(1 + 1/n)}{\cos \theta}, \tag{2}$$

где $\delta_1 = (K_{B1} - 1)K_{r1}^2$; $\delta_2 = (K_{B2} - 1)K_{r2}^2$ – коэффициенты, учитывающие наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов;

$K_{B1} = \frac{q_{r1}}{q}$; $K_{B2} = \frac{q_{r2}}{q}$ – кратности веса первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно веса провода;

$K_{r1} = \frac{l_{r1} \cos \theta}{l}$; $K_{r2} = \frac{l_{r2} \cos \theta}{l}$ – кратности длин первой и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно длины пролета;

$K_p = \frac{P \cos \theta}{ql}$ - коэффициент сосредоточенных сил;

$P = \sum_{i=1}^n P_i$ – суммарный вес n сосредоточенных нагрузок

Выражение (2) было получено для симметричного расположения сосредоточенных сил, равномерно распределенных вдоль пролета [3], дает хороший результат при отсутствии сосредоточенной нагрузки в случае разных гирлянд изоляторов в пролете. В общем же случае может служить оценкой максимальной стрелы провеса. Рассмотрим это на примерах (рисунок 1 и 2).

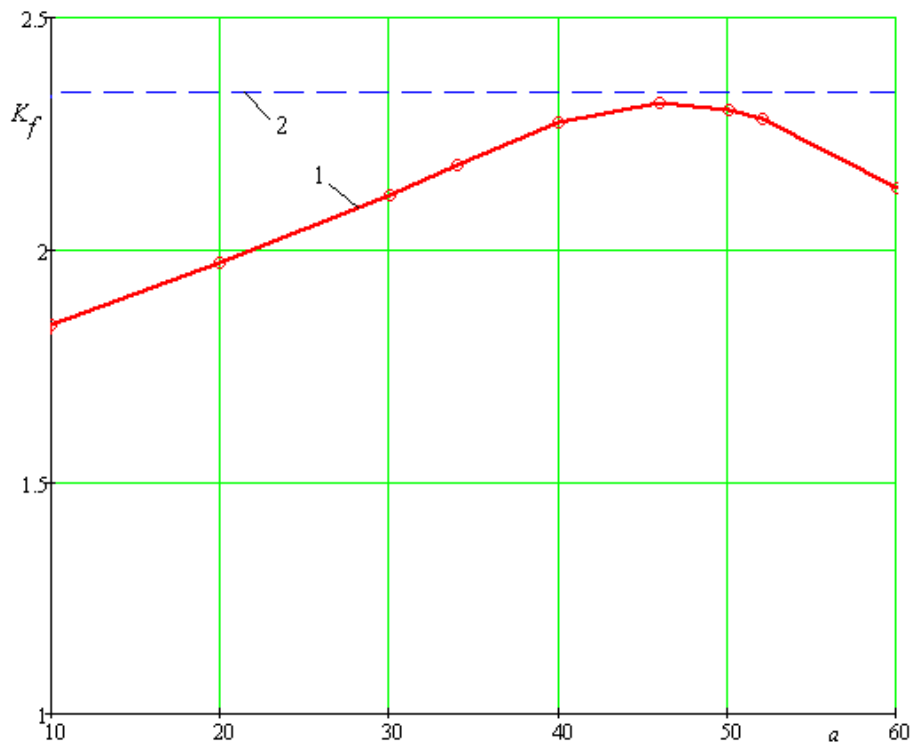


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до сосредоточенной силы для данных рисунка 16а: 1 – зависимость $K_f(a)$; 2 – расчет по (2) для $n = 1$

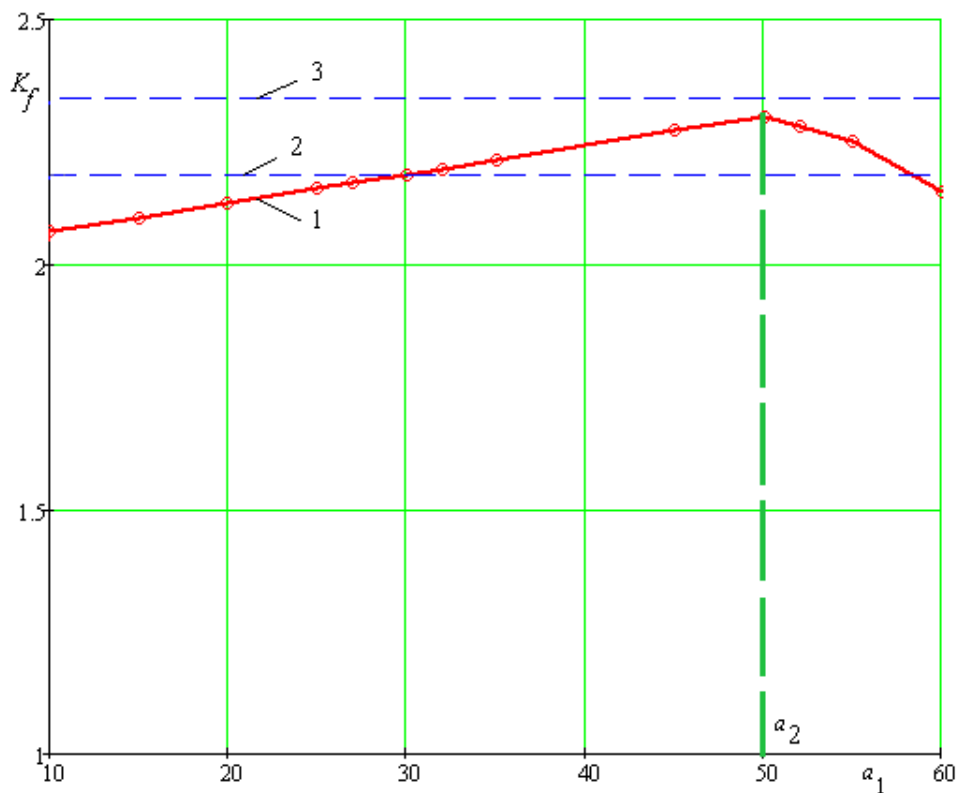


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента увеличения стрелы провеса от расстояния до первой сосредоточенной силы a_1 для данных рисунка 16 с двумя сосредоточенными силами $P_1 = P_2 = 50$ даН на расстоянии $a_2 = 50$ м: 1 – зависимость $K_f(a_1)$; 2 – расчет по (2) для $n = 2$; 3 – расчет по (2) для $n = 1$

Как видно из рисунка 1, коэффициент увеличения стрелы провеса зависит от расстояния до сосредоточенной силы, а выражение (2) является асимптотой зависимости $K_f(a)$. Рисунок 2 показывает, что при равномерной расстановке сосредоточенных сил вдоль пролета оценить увеличение стрелы провеса можно выражением (2). При совпадении точек приложения сил $a_1 = a_2$ кривая $K_f(a_1)$ приближается к асимптоте при $n = 1$.

Литература

1. Бошнякович, А.Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Качурин, В. К. Гибкие нити с малыми стрелками / В. К. Качурин. М.: Гостехиздат, 1956. 224 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.