УДК 621.315.176

ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СТАТИКИ ГИБКИХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Бладыко Ю.В.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:
Для точного расчета механических напряжений и стрел провеса предложен векторно-параметрический метод расчета гибких проводов воздушных линий, где используется модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

Текст доклада:

В основу разработанного векторно-параметрического метода механического расчета проводов положена модель в виде гибкой упругой нити [1, 2]. Механический расчета провода приводит к решению уравнений статики гибкой нити, составленных в векторно-параметрической форме $\overline{R}(s_0)$, где $\overline{R}$ – радиус-вектор в системе координат x, y, z, а s_0 – дуговая координата, равная длине участка провода при нулевой температуре t = 0 и до растяжения. Они получаются из векторно-параметрических уравнений динамики гибкой нити, в которых производные по времени приняты нулевыми, и в матричной форме выглядят так:

$$\|W\|\cdot\left\|\frac{d^2\overline{R}}{ds_0{}^2}\right\| = -\left\|\overline{p}\right\|, \tag{1}$$

$$\|W\| = \left\|\begin{matrix} \lambda^2 + b^2\left(\dfrac{dx}{ds_0}\right)^2 & b^2\dfrac{dx}{ds_0}\cdot\dfrac{dy}{ds_0} & b^2\dfrac{dx}{ds_0}\cdot\dfrac{dz}{ds_0} \\ b^2\dfrac{dy}{ds_0}\cdot\dfrac{dx}{ds_0} & \lambda^2 + b^2\left(\dfrac{dy}{ds_0}\right)^2 & b^2\dfrac{dy}{ds_0}\cdot\dfrac{dz}{ds_0} \\ b^2\dfrac{dz}{ds_0}\cdot\dfrac{dx}{ds_0} & b^2\dfrac{dz}{ds_0}\cdot\dfrac{dy}{ds_0} & \lambda^2 + b^2\left(\dfrac{dz}{ds_0}\right)^2 \end{matrix}\right\|; \quad \left\|\frac{d^2\overline{R}}{ds_0{}^2}\right\| = \left\|\begin{matrix} \dfrac{d^2x}{ds_0^2} \\ \dfrac{d^2y}{ds_0^2} \\ \dfrac{d^2z}{ds_0^2} \end{matrix}\right\|; \left\|\overline{p}\right\| = \left\|\begin{matrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{matrix}\right\|.$$

где p_x, p_y, p_z – проекции на оси координат вектора суммарной внешней распределенной нагрузки на единицу длины провода;

$$\lambda^2 = \frac{T}{1+e}; \; b^2 = \frac{d^2 - \lambda^2}{(1+e)^2}; \; d^2 = \frac{1}{\alpha_у(1+\alpha t)};$$

где T –тяжение по модулю;

e – относительное удлинение участка провода.

Величина s выражается через длину дуги s_0 до нагрева и растяжения, которая остается неизменной в различных режимах. При этом считается, что температурное удлинение провода и его растяжение происходят по линейному закону:

$$ds(T,t) = ds_0(1+\alpha t)(1+\alpha_у T), \tag{2}$$

где $ds(T,t)$ – длина элемента провода после растяжения и нагрева;

ds_0 – то же, до растяжения и нагрева при тяжении $T = 0$ и температуре $t = 0$;

Относительное удлинение элемента провода находится по выражению:

$$e = \frac{ds - ds_0}{ds_0} = \frac{ds}{ds_0} - 1. \tag{3}$$

Из него вытекает отношение:

$$\frac{ds}{ds_0} = 1 + e,$$

которое подставляется в (2). После этого из (2) получается выражение вида $T = f(e)$:

$$T = \frac{e - \alpha t}{\alpha_у (1 + \alpha t)}.$$

Относительное удлинение зависит от координат провода. Длина элемента ds выражается через проекции на оси координат вектора $\overline{R}$: $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$

и подставляется в (3):

$$e = \sqrt{\left(\frac{dx}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds_0}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds_0}\right)^2} - 1.$$

В местах соединения гирлянд изоляторов, проводов, отпаек, заградительных шаров и распорок действуют сосредоточенные нагрузки. Уравнения статики элементов проводов, на которые действуют совместно распределенные и сосредоточенные нагрузки, находятся из уравнения

$$T\frac{d^2\overline{R}}{ds^2} + \frac{dT}{ds}\frac{d\overline{R}}{ds} + \overline{q} + \frac{\overline{T_о}}{ds} + \frac{\overline{P_с}}{ds} = 0,$$

где T – тяжение проводов;

$T_о$ – вектор тяжения спусков в точках их крепления к проводам;

$\overline{q}$ – суммарная распределенная нагрузка на провода;

$\overline{P_с}$ – вес зажимов, коромысел, распорок, шаров и шлейфов.

Входящие в уравнение (1) проекции p_x, p_y и p_z представляют собой суммарные нагрузки:

$$\overline{p} = \overline{q} + \frac{\overline{T_о} + \overline{P_с}}{ds}.$$

Решение матричного уравнения (1) относительно матрицы старших производных имеет сводится к нахождению координат:

$$\left\| \frac{d^2\overline{R}}{ds_0{}^2} \right\| = \|W\|^{-1} \cdot \|-\overline{p}\|.$$

Значительно проще вид имеют уравнения статики гибкой нити с малой стрелой провеса:

$$\frac{H}{(1+e)^2} \cdot \frac{d^2\overline{R}}{ds_0^2} + \overline{p} = 0.$$

Численное решение нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих статику гибкой упругой нити [1], производится разностным методом [3, 4]. Система из конечно-разностных уравнений решается на основе итераций, вложенных друг в друга: относительно координат, длины или тяжения провода. При наличии спусков к электрическим аппаратам добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам. Эти координаты являются функцией тяжения в спуске, а оно в свою очередь зависит от положения провода.

Численный метод механического расчета гибких проводов, реализованный в одной из последних версий пакета компьютерных программ MR2.20, излагается в [4]. При его разработке учтены многочисленные предложения и замечания проектных организаций Беларуси и России, эксплуатирующих ранние версии пакета программ.

Расчеты [2, 5] выполнялись для грозозащитного троса с заградительными шарами при следующих исходных данных: длина пролета ВЛ $l = 400$ м, провод 264/34 ACSR с весом $q = 0{,}98$ даН/м сечением $F = 297{,}8$ мм^2, модулем упругости $E = 7400$ даН/мм^2, тяжение в пролете без сфер $H = 1490$ даН, суммарный вес шаров в пролете $P = 35$ даН. В исходном режиме без шаров задавалось тяжение провода (троса), затем в пролете крепились шары. Расчеты по всем методикам дают близкие результаты [4]. Наиболее схожие результаты дает представление провода цепной линией и использование двух слагаемых разложения в ряд при расчете стрел провеса. Представление провода параболой дает абсолютную погрешность в расчетах всего пару сантиметров. Тяжение провода при установке заградительных шаров рассчитывалось по уравнению состояния и совпадает с результатами расчета по программе MR2.20. Если известны значения составляющих сосредоточенных сил, то можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Любое перемещение шаров вдоль пролета приводит к изменению тяжения и стрел провеса. При равномерной расстановке более семи шаров их вес можно равномерно распределять вдоль пролета. При этом абсолютная погрешность составляет около трех сантиметров. Сдвиг всех шаров к центру увеличивает стрелу провеса на 67 см (на 5,1 %). При действии гололедной и ветровой нагрузок, при снижении температуры, при увеличении любой сосредоточенной нагрузки погрешность в расчете стрел провеса будет расти, тяжение также может расти. В этом случае более точный результат дает компьютерная программа MR2.20, которая учитывает более точно составляющие от сосредоточенных сил по всех плоскостях.

Литература

1. 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.

2. Сергей, И.И. Механический расчета 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.

3. Streliuk M.I., Sergey I.I., Bladyko Y.V. Computer aided program of mechanical calculation of flexible conductors for substations and overhead lines design // New Electrical and Electronic Technologies and Their lndustrial implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. – Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. – P. 15–19.

4. 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.

5. Сергей, И.И. Механический расчета гибких проводов с заградительными шарами / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко, М.В. Абраменко // Материалы 15-ой Международной НТК «Наука - образованию, производству, экономике» / Мн.: БНТУ, 2017. – Т.1. – С. 23.