

УСТОЙЧИВОСТЬ РАСКОСОВ ПЕРЕКРЕСТНОЙ РЕШЕТКИ ИЗ ОДИНОЧНЫХ УГОЛКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ДЛИН СТАЛЬНЫХ ОПОР ВЛ

Stability of the lattice diagonal element members from single L-steels and definition of settlement lengths of steel supports of overhead transmission lines

Шевченко Е.В., доктор технических наук, Глухов В.А., канд. физ.-мат. наук, Танасогло А.В., ассистент (Донбасская национальная академия строительства и архитектуры)

Shevchenko Y.V., professor, Glukhov V.A., Ph. D. (Physics and Mathematics), Tanasoglo A.V., an assistant professor (Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture)

Аннотация. В статье приведена численно-аналитическая методика определения расчетных длин расколов решетки. Решение данной задачи реализуется в программном комплексе MS «Excel». Выполнен анализ коэффициентов расчетных длин расколов нижней секции опоры 1П330-1, которая рассматривается как пространственная многократно статически неопределимая сквозная система. При решении уравнения устойчивости анализируется совместная работа элементов решетки опоры ВЛ. На основании расчета и обобщения результатов установлено, что расчетные длины зависят от продольных усилий и отношения погонных жесткостей пояса и раскоса каждой панели ствола.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, металлическая опора, уравнение устойчивости, расчетная длина, продольное усилие.

Abstract. There is given a numerical-analytical design procedure of definition of settlement lengths of the lattice diagonal element members. The solution of the problem is realized in programming complex MS «Excel». There are analyzed settlement length coefficients of the lattice components of the bottom section of an OPTL support 1P330-1, which is considered as a spatial multiple indeterminate open system. In decision of the stability equation there is analyzed a joint operation of the lattice components of an OPTL support. On the basis of the design and integration of the results there is established that settlement lengths depend on axial

forces and the relation of linear stiffness of a belt and an inclined brace of each panel of a support.

Keywords: overhead power transmission line, metal support, stability equation, settlement length, axial force.

1. Введение

Суммарная мощность электрических станций и протяженность электрических сетей значительно увеличиваются с каждым десятилетием из-за постоянного промышленного развития городов и пригорода. Это требует вовлечения огромных материальных и трудовых ресурсов в сфере энергетического строительства, поэтому следует определить и реализовать все возможные пути снижения капиталоемкости электрических сетей высокого и сверхвысокого классов напряжения.

Для повышения эффективности ВЛ имеются значительные возможности. Это, прежде всего, разработка методики расчета опор ВЛ на основе рассмотрения предельного равновесия конструкции, обеспечивающей равнопрочность системы, что позволяет облегчить ряд ее элементов, ранее имевших неоправданно большие коэффициенты запаса [1, 4].

Для целей практики, помимо решения собственно задачи устойчивости, необходимо определить сочетание внешних нагрузок (крутящего момента и продольной силы), предопределяющее наименьшее из возможных значение критического параметра. Важно учесть при этом эксцентричное приложение внутренних сил, связанное с односторонним прикреплением раскосов по одной полке к поясам при помощи болтов [1].

2. Устойчивость перекрестных раскосов из одиночных уголков

Опоры линий электропередачи башенного типа имеют наклонные пояса и подвержены в нормальном режиме работы действию продольной и поперечной сил, а в аварийном также и действию крутящего момента [3]. Из-за различной длины отдельных раскосов и нарастания усилий в поясах к основанию степень податливости узлов линейному и угловому смещениям оказывается неодинаковой, отчего теряют устойчивость лишь некоторые раскосы [1].

Рассмотрим башню квадратного сечения не с наклонными, а с параллельными поясами, в которой решетка и пояса имеют соответственно одинаковые сечения. Пусть на свободном конце башни действуют возрастающий крутящий момент и неизменная по величине

продольная сила, приложенная по оси симметрии поперечного сечения башни (рис. 1). Когда крутящий момент достигает критического значения, все раскосы одновременно теряют устойчивость. Благодаря симметрии системы и внутренних усилий в момент потери устойчивости произойдет симметричная деформация теряющих устойчивость раскосов.

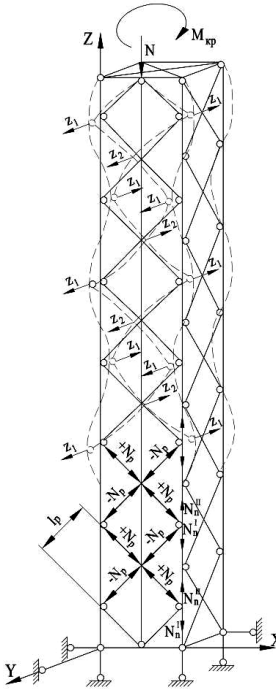


Рис. 1. Искривление элементов при симметричной форме потери устойчивости

Ввиду симметричной формы потери устойчивости раскосов их концевые узлы смещаются на одинаковые величины z_1 , а средние узлы смещаются также на одинаковые величины z_2 , но в противоположную сторону (рис.1). Узлы передней и задней граней смещаются в направлении оси Y, узлы же боковых граней смещаются в перпендикулярном направлении, по оси X, в результате этого пояс получает пространственный изгиб.

Введем в узлы фиктивные связи, препятствующие их смещению, тогда канонические уравнения метода перемещений запишутся в виде системы двух уравнений:

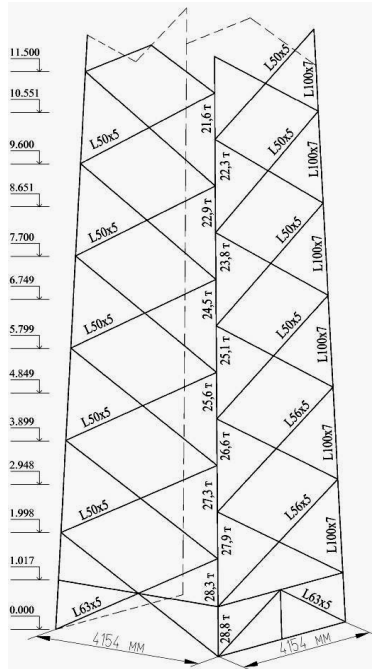


Рис. 2. Расчетная схема нижней секции опоры 1ПЗ30-1

$$\left. \begin{aligned} r_{11}z_1 + r_{12}z_2 &= 0 \\ r_{21}z_1 + r_{22}z_2 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Величину критической силы определим из условия:

$$D = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix} = r_{11}r_{22} - r_{12}^2 = 0. \quad (2)$$

Величина r_{11} складывается из r_{22} и усилия r_{11}^n , необходимого для смещения пояса. Значения r_{11}^n зависят от степени податливости узлов пояса боковому смещению.

Для определения r_{11}^n необходимо рассмотреть часть пояса, вырезанного из общей системы (рис.3, а). При принятом расположении осей общей системы координат матрица направляющих косинусов имеет вид:

$$A = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 \\ \eta_1 & \eta_2 & \eta_3 \\ \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,707 & 0,707 & 0 \\ -0,707 & 0,707 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

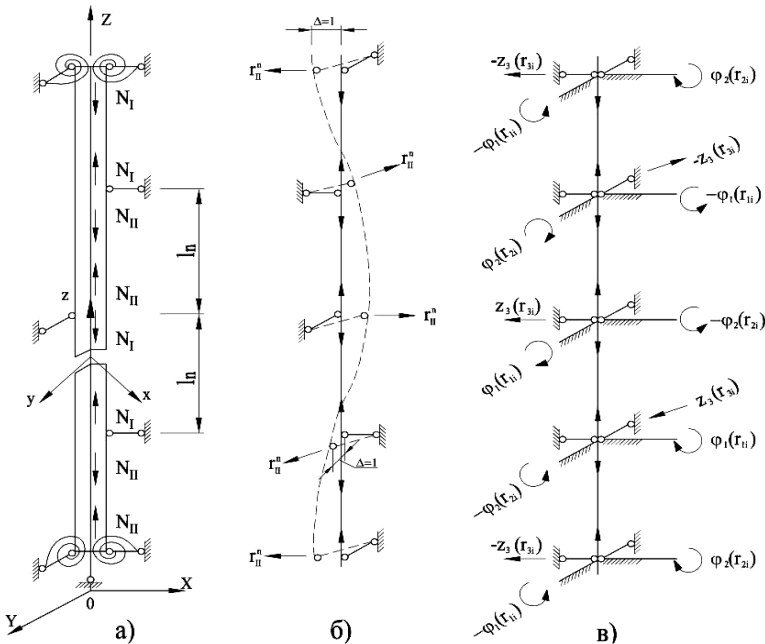


Рис.3. Расчетная схема пояса при потере устойчивости всех раскосов решетки: а) – система координатных осей; б) – искривление пояса от

единичного смещения узлов; в) – основная система.

При этом один узел повернется относительно оси X на угол φ_1 и относительно оси Y на угол φ_2 . Соседний узел относительно оси X повернется на угол φ_2 , а относительно оси Y – на угол φ_1 и т. д.

Наложив фиктивные связи заземления, препятствующие повороту опорных сечений, и стержневые связи, препятствующие смещению, получим основную систему метода перемещений (рис. 3, в).

Канонические уравнения, при помощи которых определяется Γ_{11}^n , имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} \cdot \varphi_1 + r_{12} \cdot \varphi_2 + r_{13} \cdot 1 &= 0 \\ r_{21} \cdot \varphi_1 + r_{22} \cdot \varphi_2 + r_{23} \cdot 1 &= 0 \\ r_{31} \cdot \varphi_1 + r_{32} \cdot \varphi_2 + r_{33} \cdot 1 &= r_{11}^i \end{aligned} \right\} \cdot \quad (4)$$

После определения углов поворота φ_1 и φ_2 их значения подставляются в третье уравнение системы (4), из которого находится усилие Γ_{11}^n .

3. Решение уравнения устойчивости

Коэффициенты уравнения устойчивости (2) имеют значения:

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= \frac{3}{l_p^2} \left[i_p^x \cdot \eta_2^2 \cdot (\eta_l^x + \zeta_l^x) + i_p^y \cdot \varepsilon_2^2 \cdot (\eta_l^y + \zeta_l^y) \right] + r_{11}^i \\ r_{22} &= r_{11} - r_{11}^i \\ r_{12} &= \frac{3}{l_p^2} \left[i_p^x \cdot \eta_2^2 \cdot (\zeta_l^x - \eta_l^x) + i_p^y \cdot \varepsilon_2^2 \cdot (\zeta_l^y - \eta_l^y) \right] \end{aligned} \right\} \cdot \quad (5)$$

где i_p^x, i_p^y – погонные жесткости раскоса относительно главных центральных осей инерции $x_0 - x_0$ и $y_0 - y_0$; l_p – длина раскоса; $\eta_l^x, \zeta_l^x, \eta_l^y, \zeta_l^y$ – трансцендентные функции, учитывающие сжатие в одних раскосах и растяжение в других, определяются по [2]. Аргументами трансцендентных функций являются безразмерные параметры продольной силы \bar{v}^x и \bar{v}^y , учитывающих продольно-поперечных изгиб.

Приняв $\Gamma_{11}^i = k \frac{i_1^y}{l_1^2}$, после подстановки реактивных сил (5) в уравнение устойчивости (2) получим равенство:

$$0,75[3,86(\eta_i^x + \zeta_i^x) + \eta_i^y + \zeta_i^y]^2 + k \frac{i_i}{i_p} [3,86(\eta_i^x + \zeta_i^x) + \eta_i^y + \zeta_i^y] - \\ - 0,75[3,86(\zeta_i^x - \eta_i^x) + \zeta_i^y - \eta_i^y]^2 = 0. \quad (6)$$

Пример. Рассмотрим применение изложенной методики для определения расчетных длин раскосов решетки на примере нижней секции опоры 1П330-1 (рис.2).

Рассматриваемая часть ствола опоры конструктивно представляет собой пространственную стержневую металлическую стойку с несомещенными в смежных гранях узлами, состоящую из 12 панелей. Пояса и раскосы секции выполнены из одиночных уголков, стыкуются элементы в узлах при помощи болтового соединения.

Ширина у основания – 4,154 м. Высота секции – 11,5 м. Отметки панелей пояса: $h_1 = 1,017$ м; $h_2 = 1,998$ м; $h_3 = 2,948$ м; $h_4 = 3,899$ м; $h_5 = 4,849$ м; $h_6 = 5,799$ м; $h_7 = 6,749$ м; $h_8 = 7,700$ м; $h_9 = 8,651$ м; $h_{10} = 9,600$ м; $h_{11} = 10,551$ м; $h_{12} = 11,500$ м.

Расчет опоры выполняется на нагрузки нормального и аварийного режимов, взятые из расчетного листа. Расчетные усилия даны на схеме (рис.2).

По изложенной выше методике были определены безразмерные параметры продольной силы v^x и v^y в зависимости от продольных усилий N_n и отношения погонных жесткостей пояса и раскоса каждой панели. Скорректированы трансцендентные функции.

Для раскосов каждой панели определены канонические коэффициенты (5) и графически решено уравнение устойчивости (рис.4), из которого найдены коэффициенты расчетной длины μ_p . Корни уравнения (6) уточняются методом половинного деления и за расчетное принимается максимальное значение.

Все расчеты выполняются в вычислительном комплексе MS «Excel».

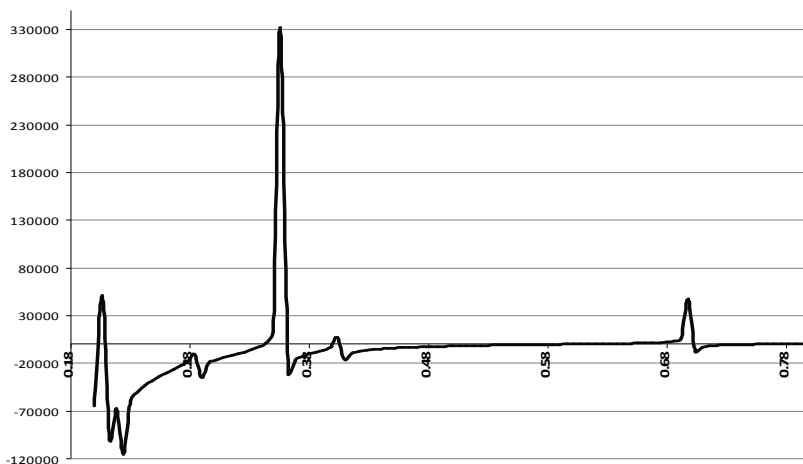


Рис. 4. Графическое определение коэффициента расчетной длины μ_p раскоса первой панели

Результаты определения коэффициентов расчетной длины раскосов и сравнение полученных результатов со значениями из расчетного листа опоры 1П330-1 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ коэффициентов μ_p

№ панели	$\frac{i_1}{i_\delta}$	$\frac{N_1}{N_y}$	k	μ_p (по расч. листу)	μ_p (по расчету)	%
1	10.987	0.2710	8.1997	0.82	0.7378	10,02
2	10.977	0.2482	8.8506	0.82	0.7366	10,17
3	27.339	0.2296	9.3803	0.82	0.7273	11,30
4	26.394	0.2245	9.5264	0.82	0.7277	11,26
5	26.567	0.2189	9.6853	0.82	0.7275	11,28
6	25.642	0.2100	9.9378	0.82	0.7279	11,23
7	25.807	0.2065	10.0373	0.82	0.7278	11,24
8	24.846	0.2014	10.1829	0.82	0.7283	11,18
9	25.047	0.1958	10.3027	0.82	0.7281	11,21
10	24.104	0.1879	10.4531	0.82	0.7287	11,13
11	24.298	0.1835	10.5359	0.82	0.7285	11,16
12	23.345	0.1772	10.6546	0.82	0.7292	11,07

4. Выводы:

- 1) апробирована численно-аналитическая методика определения коэффициентов расчетной длины в зависимости от продольного усилия и отношения погонных жесткостей пояса и раскоса;
- 2) получены новые коэффициенты расчетных длин элементов решетки, которые на 10-11% ниже существующих;
- 3) уточнена методика оптимизации опор ВЛ с учетом полученных зависимостей для расчетных длин и коэффициентов продольного изгиба;
- 4) полученные данные показали что, есть резерв несущей способности, поэтому можно совершенствовать методику решения задачи устойчивости.

Список литературы

1. Трофимов, В.И. Исследование устойчивости и несущей способности металлических конструкций типа опор линий электропередачи / В.И. Трофимов. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.
2. Смирнов, А.Ф. Устойчивость и колебания сооружений / А.Ф. Смирнов. – М. : Трансжелдориздат, 1958 г. – 571 с.
3. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – [2_е изд.]. – Л. : Энергия, 1979. – 312 с.
4. Соколов, А. Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) / А. Г. Соколов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 171 с.
5. Шевченко, Е. В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи / Е. В. Шевченко. – [2_е изд.]. – Макеевка : ДонГАСА, 1999. – 169 с.
6. Справочник по проектированию линий электропередачи [Текст] / [под ред. С. С. Рокотяна и М. А. Реута]. – М. : Энергия, 1980. – 296 с.
7. Lysmer, J. Dynamic Model for Infinite Media / J. Lysmer, R. Kuhlemeyer // Proc. ASCE. Journal Eng. Mechanics Division. – 1969. – Vol. 95, No. EM4. – P. 859–877.
8. ANSI/ASCE 10-90. Design of Latticed Steel Transmission Structures. / - New York: ASCE, 1992. – 64 p.
9. CAN/CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures, Includes Update No. 1 (2010), Update No. 2 (2001). – Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, 2009. – 198 p.