References

1. Shilin, A. N. Nadezhnost' elektrosnabzheniya : ucheb. posobie / A. N. Shilin, A. G. Soshinov, O. I. Elfimova. – Volgograd : VGTU, 2019. – 104 s.

2. Horol'skij, V. Ya. Ekspluataciya elektrooborudovaniya : ucheb. posobie / V. Ya. Horol'skij, M. A. Taranov, V. N. Shemyakin. – SPb. : Lan', 2021. – 268 s.

3. Matematicheskie zadachi energetiki : ucheb. posobie / G. B. Belyh [et al.]. – Magnitogorsk : MGTU im. G. I. Nosova, 2019. – 176 s.

4. Golubeva, N. V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov : ucheb. posobie / N. V. Golubeva. – 2-e izd. – SPb. : Lan', 2013. – 192 s.

5. Budnikova, I. K Primenenie avtomatizirovannyh informacionnyh sistem v elektroenergetike / I. K. Budnikova, E. V. Prijmak, A. O. Sokova // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – T. 19. – № 22. – S.106–108.

6. Budnikova, I. K. Komp'yuternoe modelirovanie parametrov raspredelitel'noj elektricheskoj seti / I. K. Budnikova, E. C. Belashova // Izv. vysshih ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2014. – № 9–10. – S. 75–81.

7. Budnikova, I. K. Programmnoe modelirovanie nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya / I. K. Budnikova, R. F. Galieva // Dispetcherizaciya i upravlenie v elektroenergetike : materialy dokladov X otkrytoj molodezhnoj nauch.-prakt. konf., Kazan', 28–30 okt. 2015 g. / Kazan. Gos. energet. un-t. – Kazan', 2017. – S. 121–125.

8. Modelirovanie rezhimov raboty elektroenergeticheskih sistem : ucheb. posobie / I. A. Murataev [et al.]. – Kazan' : KGEU, 2019. – 94 s.

УДК 539

Р. Ш. Гимадиев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОДА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. На основе модели деформирования провода электропередачи исследуется влияние изгибной жесткости провода на напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: провод, электропередача, моделирование, изгибная жесткость, провис.

R. Sh. Gimadiev

MODELING THE DEFORMATION OF A POWER WIRE TAKING INTO ACCOUNT FLEXURAL STIFFNESS

Doctor of Engineering Science, professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. Based on the deformation model of a power transmission wire, the influence of the bending stiffness of the wire on the stress-strain state is investigated.

Keywords: wire, power transmission, modeling, bending stiffness, sag.

Введение. Уравнения динамики движения, деформированного состояния провода высоковольтной линии (ВЛ) и алгоритм численного решения в пространственной постановке разработаны в [1, 2], где модель провода принималась за абсолютно гибкую систему с учетом растяжения и сжатия. Опоры ВЛ считались абсолютно жесткими. Уравнения динамики движения решаются на основе метода конечных разностей по явной схеме. По истечении времени система выходит на стационарное состояние. В задачах, посвященных исследованию взаимодействия протекающей жидкости в деформируемой трубе [3–4], изгибная жесткость является одним из основных факторов. Возникает вопрос, какое влияние оказывает изгибная жесткость провода на напряженно-деформированное состояние. Учет влияния сил, действующих на тросы, взаимодействующих с водной средой, изучено в работе [5]. Вопросы проектирования электроэнергетических систем и сетей рассмотрены в работах [6–8].

Очевидно, уменьшая длину провода и модуля упругости, можно найти условия, при которых изгибная жесткость будет влиять на деформированное состояние провода. На основании численных расчетов и для «текстильной» нити можно найти длину, при которой нужно учитывать изгибную жесткость нити.

Материалы и методы исследования. 1. Постановка задачи. Моделирование динамики ВЛ электропередачи проводится на основе работ [1, 2] по модели абсолютно гибкой системы. Под абсолютно гибкими системами мы понимаем физические объекты, которые пренебрежимо слабо воспринимают изгибные напряжения, т. е. работают только на растяжение и сжатие. К ним можно отнести: протяженные линии передачи энергий, линии оптико-волоконной связи, тросы, находящиеся в потоке жидкости [5] и т. д. Опоры ВЛ принимаются за абсолютно жесткие.

Абсолютно гибкая система в поле силы тяжести с линейной плотностью $\rho_0(s)$, перемещается в пространстве под действием распределенной погонной нормальной нагрузки F_n и распределенной погонной касательной нагрузки F_τ. Деформация гибкой системы характеризуется степенью удлинения $\lambda = ds / ds_0 = 1 + e$, где ds_0 и ds – длины элементов гибкой системы в недеформированном и деформированном состоянии; e – относительное удлинение. Для элемента гибкой системы с массой dm в соответствии с законом сохранения массы имеем $dm = \rho_0 ds_0 = \rho ds$.

2. Метод и построение решения. Векторное уравнение, описывающее движение упругой весомой гибкой системы под действием погонных нагрузок F_n, F_τ, натяжением T, в поле силы тяжести с ускорением свободного падения g, имеет вид:

$$\rho_0 \partial^2 r \big/ \partial t^2 = \partial\, T \big/ \partial\, s_0 + F_n + F_\tau + g\rho_0. \qquad (1)$$

Рассматривается векторное уравнение движения в проекциях на оси декартовой системы координат $Ox_1x_2x_3$, ускорение g направлено вниз вдоль оси Ox_3.

Пусть угол между элементом ds гибкой системы и осями координат Ox_1, Ox_2, Ox_3 составляет соответственно α, β, γ.

Распределенная касательная нагрузка с интенсивностью F_τ действует вдоль элемента ds гибкой системы. Действующий вектор нормальной нагрузки с интенсивностью F_n составляет угол φ к плоскости OAB содержащий провод. Дополнительно вводится угол α_1 между осью Ox_1 и плоскостью OAB. Учитывая, что

$$\left|F_n\right| = F_n,\ \left|F_\tau\right| = F_\tau,\ \left|T\right| = T,\ \left|g\right| = g,\ \partial^2 r\big/\partial t^2 = \partial v/\partial t$$

и проектируя векторное уравнение движения на декартовы оси координат получено:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}\left(T\cos\alpha\right) - F_n\lambda\cos\varphi\cos\gamma\cos\alpha_1 + F_\tau\lambda\cos\alpha,$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}\left(T\cos\beta\right) - F_n\lambda\cos\varphi\cos\gamma\sin\alpha_1 + F_\tau\lambda\cos\beta,$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}\left(T\cos\alpha\right) - F_n\lambda\cos\varphi\sin\gamma + F_\tau\lambda\cos\gamma - \rho_0 g,$$

где v_1, v_2, v_3 – проекции скорости элементов на координатные оси.

Так как $(\partial x_1)^2 + (\partial x_2)^2 + (\partial x_3)^2 = (\lambda\partial s_0)^2$, то

$$\cos\alpha = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s_0},\ \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s_0},\ \cos\gamma = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s_0},$$

$$tg\alpha_1 = \frac{\partial x_2}{\partial x_1} = \left(\frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s_0}\right)\Bigg/\left(\frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s_0}\right) = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha},$$

$$\cos\alpha_1 = \cos\alpha\Big/\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta},$$

$$\sin\alpha_1 = \cos\beta\Big/\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta}.$$

В дальнейшем индекс нуль в координате s_0 можно опускать и понимать S как лагранжеву координату (т. е. связанную с гибкой системой).

Учитывая, что

$$\cos\alpha = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s},\ \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s},\ \cos\gamma = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s},$$

тогда уравнения движения гибкой системы в декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ примут вид:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\cos\alpha_1\frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau\frac{\partial x_1}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\sin\alpha_1\frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau\frac{\partial x_2}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\sin\gamma + F_\tau\frac{\partial x_3}{\partial s} - \rho_0 g. \qquad (2)$$

Уравнения движения в вертикальной плоскости Ox_1x_2, ось Ox_2 направлена вертикально. В этом случае для (2) надо положить:

$$\alpha = \frac{\pi}{2},\ \alpha_1 = \frac{\pi}{2},\ \gamma + \beta = \frac{\pi}{2},\ \varphi = 0,\ \sin\gamma = \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}$$

и провести замену индексов 2 → 1 и 3 → 2:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s}\right) - F_n \frac{\partial x_2}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_1}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}\right) + F_n \frac{\partial x_1}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_2}{\partial s} - \rho_0 g, \qquad (3)$$

где v_1 и v_2 – проекции вектора скорости V на оси координат x_1, x_2.

3. Учет влияния изгибной жесткости. Очевидно, изгибная жесткость должна уменьшать прогиб провода по сравнению с абсолютно гибким проводом, встает вопрос: на сколько? Ниже проведено сравнительные расчеты напряженнодеформированного состояния (НДС) провода с учетом изгибной жесткости и абсолютно гибкой модели провода. Важным фактором оказывается, является длина провода и модуль упругости.

Предельное решение динамической задачи дает решение НДС стационарного состояния провода.

Уравнения движения провода ВЛ с учетом изгибной жесткости для плоской задачи (3) в безразмерном виде можно записать в виде:

$$\begin{gathered}\frac{\rho}{A_N}\frac{\partial v_k}{\partial \tau} + \frac{\rho}{A_N}\left(EI_z \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_1^4} + g\right)(k-1) = \\ = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{1+e}\frac{\partial x_k}{\partial s}\right) + (-1)^k f_n \frac{\partial x_{3-k}}{\partial s} + f_\tau \frac{\partial x_k}{\partial s},\end{gathered} \qquad (4)$$

где $k = 1, 2$; а EI_z – изгибная жесткость провода; $I_z = \rho\, r^4/4$ – момент инерции сечения провода с радиусом r; T – натяжение в проводе; E – модуль упругости провода; v_k – составляющие скорости элемента гибкой системы в проекции вектора скорости $\overline{V}$ на оси координат x_k; $\omega = x_2^0 - x_2$ – прогиб провода, начальная координата точек пролета x_2^0 и x_2 – координата провиса; ρ – линейная плотность; e – относительное удлинение; S – лагранжева координата; g – ускорение свободного падения.

Уравнения движения (4) записаны в безразмерном виде и введены параметры:

$$\begin{gathered}\overline{v}_k = v_k/U_\infty,\ f_n = 2F_n\big/(\rho U_\infty^2 L_0),\ f_\tau = 2F_n\big/(\rho U_\infty^2 L_0),\ \overline{\rho} = \rho L_0/M_0 \\ \overline{T} = T/T_0,\ \overline{E} = E/T_0,\ \tau = tU_\infty/L_0,\ \overline{g} = gL_0\big/U_\infty^2,\end{gathered} \qquad (5)$$

где v_k – скорость элемента провода; L_0 – длина пролета провода; $M_0 = \rho_0 L_0$ – масса пролета провода; L_m – монтажная длина провода; Е – приведенный модуль упругости материала провода; $T_0 = \rho U_\infty^2 L_0^2\big/2$ – характерное натяжение провода и U_∞ – характерная скорость; t – время; $A_N = \rho L_0^3 / (2M_0)$ – параметр Ньютона. При решении в обозначениях черточки над параметрами опушены.

Численное решение. Для решения уравнения (3.1) используется метод конечных разностей и в рассмотрение вводится дискретная область:

$$s_i = i\Delta s,\ \tau_n = n\Delta\tau\ \ (n = 0,1,...,\tau/\Delta\tau - 1,\ i = 1,\ 2,...,s/\Delta s).$$

При решении уравнений используется для аппроксимации производных центральные разности на сдвинутой на полшага сетке и явная конечно-разностная схема [1].

Кинематические соотношения для (4) определяются выражениями $\partial x_k / \partial\tau = v_k$, а геометрическое соотношение формулой:

$$(\partial x_1/\partial s)^2 + (\partial x_2/\partial s)^2 = \lambda^2,\ \ \lambda = 1 + e. \tag{6}$$

Физическое соотношение принимается в виде выражения Кельвина – Фойгта:

$$T = Ee + \eta\dot{e}, \tag{7}$$

где $\dot{e}$ – скорость деформации; η – коэффициент внутреннего трения в материале.

Начальные и граничные условия задачи имеют вид:

$$x_k(0,s) = f_k(s),\ \ v_k(0,s) = \varphi_k(s),$$
$$x_k(\tau,0) = f_k^{\circ}(\tau),\ \ v_k(\tau,0) = \varphi_k^0(\tau),$$
$$x_k(\tau,s_l) = f_k^s(\tau),\ \ v_k(\tau,s_l) = \varphi_k^s(\tau),\ \ k = 1,2. \tag{8}$$

Результаты решения задачи на шаге интегрирования n служат в качестве начальных и граничных условий для следующего шага интегрирования.

Равновесное состояние гибкого провода получается как предельное решение динамической задачи. Выбор коэффициента корректировки скоростей и коэффициента устойчивости численного решения осуществляется путем проведения численных экспериментов на модельных задачах [1].

Движения провода с учетом изгибной жесткости. Для расчета по (3.1) примем следующие параметры: длина пролета между опорами l = 160 [м]; линейная плотность электрических проводов из алюминия ρ = 0,5149 [кг/м]; модуль упругости провода с диаметром d = 0,01553 [м] составляет $E = 11840\cdot10^3$ [Н]. Расчет равновесного состояние провода проведено с монтажной длиной $L_м$ = 160,6 [м]. Монтажная длина обеспечивает некоторый начальный провис. Практический невозможно подвесить провод длиной L = 160 [м] строго по прямой линии, так как малое перемещение точек абсолютно жесткого провода около прямой линии должно вызывать бесконечное натяжение.

Расчет равновесного состояния провода проводится с общим весом 82, 69 кг и монтажной длиной 160,6 [м] без учета изгибной жесткости $EI_z = 0$ и с учетом EI_z. В расчетах для определения координат узловых точек разностной сетки длина провода разбита равномерным шагом на 40 элементов. На значение максимального прогиба $f = 6{,}19$ м посредине пролета изгибная жесткость EI_z не повлияла. Из расчета по приведенной методики следует, чтобы поднять провод с таким провисом, на опоре необходимо приложить усилие $T = 2574$ [Н].

В соответствии с расчетами, изгибная жесткость проводов не оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние длинных проводов порядка 160 м.

Ставится вопрос: при уменьшении длины провода и модуля упругости надо ли учитывать изгибную жесткость и влияет ли это на провис провода?

Ниже приводится расчет прогиба провода длиной $L_1 = 1{,}0$ м с учетом изгибной жесткости EI_z. При следующих значениях размерных параметров: длина провода $L_1 = 1{,}0$ м; диаметр $d = 0{,}01553$ м; модуль упругости $E = 8073$ Н; погонная масса $\rho = 0{,}5127$ кг/м, значения безразмерных параметров при этом равны:

$$E = 32{,}917,\ T_0 = 245{,}25,\ M_0 = 0{,}5127,\ A_N = 1{,}1959,\ EI_z = 0{,}241.$$

По результатам проведенных расчетов, следует: прогиб без учета изгибной жесткости $EI_z = 0$ равен $f = 0{,}0308$ м, а с учетом изгибной жесткости $EI_z = 0{,}241$ прогиб составил $f = 0{,}0242$ м. Следовательно, при малых длинах проводов необходимо учитывать изгибную жесткость провода в расчетах напряженно-деформированного состояния провода.

Заключение. Исследования динамики нагружения провода с учетом изгибной жесткости показали, что изгибная жесткость не оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние длинных проводов порядка 160 м. А при малой длине провода порядка 1 м необходимо учитывать изгибную жесткость при моделировании деформирования провода.

Список использованных источников

1. Гимадиев, Р. Ш. Динамика деформирования провода электропередачи / Р. Ш. Гимадиев // Изв. РАН МТТ. – 2019. – № 4. – С. 63–75.

2. Gimadiev, R. Sh. Electric transmission line wire deformation dynamics / R. Sh. Gimadiev // AIP Conf. Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, iss. 1. – P. 1–5.

3. Ильгамов, М. А. Взаимодействие неустойчивостей в гидроупругой системе / М. А. Ильгамов // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80, вып. 5. – С. 566–579.

4. Ильгамов, М. А. Положения динамического равновесия изогнутого трубопровода с вибрирующими опорами / М. А. Ильгамов, М. М. Шакирьянов // Докл. Рос. акад. наук. Физика, техн. науки. – 2021. – Т. 496, № 1. – С. 55–59.

5. Девнин, С. И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании / С. И. Девнин. – Л. : Судостроение, 1975. – 192 с.

6. Бацева, Н. Л. Специальные вопросы проектировани электроэнергетических систем и сетей : учеб. пособие / Н. Л. Бацева. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2008. – 254 с.

7. Шевченко, Е. В. Определение редуцированного натяжения при обрыве провода / Е. В. Шевченко, В. А. Митраков, А. В. Танасогло // Металлические конструкции. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 189–198.

8. Ryan, Hugh M. High Voltage Engineering and Testing / Hugh M. Ryan. – IET, 2001. – 192 p.

References

1. Gimadiev, R. Sh. Dinamika deformirovaniya provoda elektroperedachi / R. Sh. Gimadiev // Izvestiya RAN MTT. – 2019. – № 4. – S. 63–75.
2. Gimadiev, R. Sh. Electric transmission line wire deformation dynamics / R. Sh. Gimadiev // AIP Conf. Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, iss. 1. – P. 1–5.
3. Il'gamov, M. A. Vzaimodejstvie neustojchivostej v gidrouprugoj sisteme / M. A. Il'gamov // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2016. – T. 80, iss. 5. – S. 566–579.
4. Il'gamov, M. A. Polozheniya dinamicheskogo ravnovesiya izognutogo truboprovoda s vibriruyushchimi oporami / M. A. Il'gamov, M. M. SHakir'yanov // Dokl. ros. akad. nauk. Fizika, tekhn. nauki. – 2021. – T. 496, № 1. – S. 55–59.
5. Devnin, S. I. Gidrouprugost' konstrukcij pri otryvnom obtekanii / S. I. Devnin. – L. : Sudostroenie, 1975. – 192 s.
6. Baceva, N. L. Special'nye voprosy proektirovani elektroenergeticheskih sistem i setej: ucheb. posobie / N. L. Baceva. – Tomsk : Tomsk. politekhn. un-t, 2008. – 254 s.
7. Shevchenko, E. V. Opredelenie reducirovannogo natyazheniya pri obryve provoda / E. V. Shevchenko, V. A. Mitrakov, A. V. Tanasoglo // Metallicheskie konstrukcii. – 2010. – T. 16, № 3. – S. 189–198.
8. Ryan, Hugh M. High Voltage Engineering and Testing / Hugh M. Ryan. – IET, 2001. – 192 p.

УДК 536.25

Г. С. Маршалова[1], М. С. Лира[2], Е. С. Данильчик[3]

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ШАГА НА ТЕПЛООТДАЧУ ДВУХРЯДНЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

[1]Кандидат технических наук, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь
[2]Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[3]Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты численного моделирования теплоотдачи двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения при различных поперечных шагах установки труб, позволившие визуализировать течение в пучке и рекомендовать к использованию разреженные пучки с повышенным коэффициентом оребрения.

Ключевые слова: свободная конвекция, аппарат воздушного охлаждения, трубный пучок, поперечный шаг, k–ω модель турбулентности, число Нуссельта.