

УДК 539.3

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-3-19-26

О ВЛИЯНИИ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ДЛИНЫ ПРОВОДА НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

© Р.Ш. Гимадиев

Численные исследования динамики деформирования провода высоковольтной линии (ВЛ) электропередачи базировались на гипотезе абсолютно гибкой модели с учетом сжимающих и растягивающих усилий. Представляет практический интерес, как влияет изгибная жесткость провода на деформированное состояние провода в зависимости от длины пролета. Нелинейные уравнения динамики провода решаются на основе метода конечных разностей по явной схеме. Предельное равновесное состояние провода определяется методом установления динамической задачи. На основе численного эксперимента определяется влияние изгибной жесткости на форму равновесного состояния провода. Определяется диапазон длин провода, для которых можно не учитывать изгибную жесткость и проводить расчеты по модели абсолютно гибкой системы, что позволяет в ряде случаев получить аналитические решения.

Ключевые слова: линия электропередачи, деформирование, численный эксперимент, влияние изгибной жесткости, провис, натяжение.

Введение. Провода ВЛ подвергаются большим механическим нагрузкам. Задачи, связанные с этим, относятся к классу взаимодействий деформируемых систем с потоком [1–4]. ВЛ постоянно нагружены весом провода, на провод действуют порывы ветра, в осенне-весенний период – обледенение проводов. Моделирование динамики высоковольтной линии (ВЛ) электропередачи изучалось в работах [5–7] по модели абсолютно гибкой системы с учетом растяжения и сжатия. Влияние обледенения на деформированное состояние провода изучалось в работе [8]. Изгибная жесткость является одним из основных факторов в задачах исследования взаимодействию протекающей жидкости в деформируемой трубе. А влияние изгибной жесткости на деформирование провода длины порядка 160 м изучено в работе [9]; оказалось, что при такой длине изгибная жесткость не влияет на деформирование провода. Очевидно, уменьшая длину провода, при данном значении модуля упругости можно найти диапазон длин пролета ВЛ, при которых изгибная жесткость будет влиять на деформированное состояние провода. При расчете динамики колебания провода длиной 1.6 м обнаружены колебания с частотой порядка 16 герц [10].

Постановка задачи и метод решения.

В работах [6, 7] приводятся уравнения движения провода в пространственной постановке. Эти уравнения существенно упрощаются, если их рассматривать по отдельности: под действием веса в плоскости Ox_2x_3 рис. 1, *a* и под действием ветровой нагрузки в плоскости Ox_2x_1 , рис. 1, *b*.

Провод ВЛ с линейной плотностью ρ_l перемещается в пространстве. Деформация гибкой системы характеризуется степенью удлинения

$$\lambda = ds / ds_0 = 1 + e,$$

где ds_0 и ds – длины элементов гибкой системы до деформации и после, e – относительное удлинение.

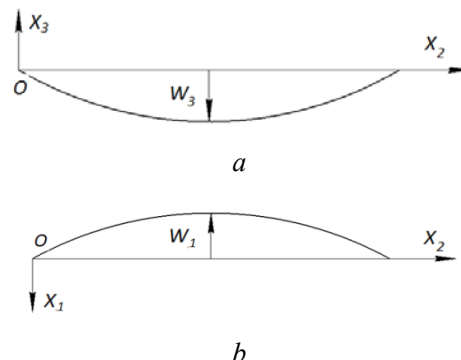


Рис. 1.

Уравнения движения гибкого провода ВЛ с учетом изгибной жесткости под действием веса провода в плоскости Ox_2x_3 (рис. 1, *a*) имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho_l \frac{\partial v_3}{\partial t} + EI_z \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_2^4} &= \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{T}{1+e} \frac{\partial x_3}{\partial s} \right) - \\ &- F_n^{x_3} \frac{\partial}{\partial s} + F_\tau^{x_3} \frac{\partial x_3}{\partial s} - \rho_l g \\ \rho_l \frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{T}{1+e} \frac{\partial x_2}{\partial s} \right) - \\ &- F_n^{x_3} \frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau^{x_3} \frac{\partial x_2}{\partial s} . \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь – распределенные погонные нормальная $F_n^{x_3}$ и касательная $F_\tau^{x_3}$ нагрузки, действующие на провод в плоскости Ox_2x_3 .

А движение провода под действием ветровой нагрузки в плоскости Ox_2x_1 (рис. 1, *b*) описывается уравнениями (2).

$$\begin{aligned} \rho_l \frac{\partial v_1}{\partial t} + EI_z \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_2^4} &= \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{T}{1+e} \frac{\partial x_1}{\partial s} \right) - \\ &- F_n^{x_1} \frac{\partial x_2}{\partial s} + F_\tau^{x_1} \frac{\partial x_1}{\partial s} \\ \rho_l \frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{T}{1+e} \frac{\partial x_2}{\partial s} \right) + \\ &+ F_n^{x_1} \frac{\partial x_1}{\partial s} + F_\tau^{x_1} \frac{\partial x_2}{\partial s} , \end{aligned} \quad (2)$$

где V_k – составляющие скорости элемента провода в проекции вектора скорости $\bar{V}$ на оси координат x_k , $k=1,2,3$, вес действует вдоль линии x_3 , E – модуль упругости, $I_z = \pi r^4 / 4$ – жесткость провода на изгиб, где r – радиус провода, для (1) $\omega = x_3^0 - x_3$ – прогиб провода, начальная координата точек пролета x_3^0 и x_3 – координата точек провиса, T – натяжение в проводе, e – относительное удлинение; s – лагранжева координата; F_n и F_τ – нормальная и касательная погонные нагрузки действующие на элемент провода, g – ускорение свободного падения.

Весовая нагрузка действует в плоскости Ox_2x_3 (рис. 1, *a*), а ветровая нагрузка в плоскости Ox_2x_1 (рис. 1, *b*). Тогда совместное решение системы (1), (2) дает решение задачи деформирования провода под действием ветра, веса с учетом изгибной жесткости. В частности, если

порыв ветра действует по синусоидальному закону [7], возникают колебания типа «пляски провода». Колебания в горизонтальной плоскости возбуждают колебания в вертикальной плоскости. При этом колебания провода происходят с частотой порядка одного герца.

Поперечные колебания гибких систем влияют на нормальные составляющие погонных усилий F_n : при движении элемента гибкой системы против потока эта составляющая увеличивается, а по потоку – уменьшается. С учетом этого пересчет проводится по формуле [4]:

$$F_n(s, t) = F_n^0(s, t) [1 - \mu V_n / U_\infty]^2 \text{sign}[1 - \mu V_n / U_\infty], \quad (3)$$

где V_n – нормальная составляющая скорости элемента гибкой системы; μ – коэффициент аэродинамического демпфирования, этот коэффициент существенно влияет на динамику движения провода.

Уравнения дополняются геометрическими соотношениями (4):

$$\begin{aligned} (\partial x_k / \partial s)^2 + (\partial x_2 / \partial s)^2 &= \lambda^2, \\ \lambda &= 1 + e, \quad k=1, 3 \end{aligned} \quad (4)$$

и кинематическими соотношениями

$$\partial x_k / \partial \tau = v_k. \quad (5)$$

При решении уравнений (1), (2) для аппроксимации производных используются центральные разности на сдвинутой на полшага сетке и явная конечно-разностная схема для скорости движения элемента.

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

Физическое соотношение принимается в виде формулы Кельвина–Фойгта:

$$T = E \cdot e + \eta \dot{e}, \quad (6)$$

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

Составляющие аэродинамических сил, действующих на провод, определяются по С.И. Девнину [11]:

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{\rho V_\alpha^2}{2} d \cdot c_n \sin \alpha, \\ F_\tau &= \frac{\rho V_\alpha^2}{2} d \cdot c_\tau \cos \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

где V_α – относительная скорость элемента провода, расположенного под углом α к потоку;

ρ – плотность среды; d – условный диаметр провода; $c_n = 1.8446$, $c_\tau = 0.0554$ – аэродинамические коэффициенты обтекания, как для тросов, взаимодействующих водной средой.

По результатам решения задачи динамики ленточных парашютов на сверхзвуковых скоростях [4] и провода ВЛ [7] по методу конечных разностей за фронтом волн (достаточно в узком диапазоне) сеточные функции испытывают высокочастотные колебания (осцилляции), не позволяющие установить истинные значения искомых параметров. Это особенно важно в быстро протекающих процессах задач динамики. Поэтому в расчетах применяется метод сглаживания фронта волны путем непосредственной корректировки скоростей точек расчетной сетки в соответствии с формулой

$$\bar{v}_k = v_k + \beta \partial^2 v_k / \partial s^2. \quad (8)$$

Формула (8) следует из работы Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов [12] и адаптирована на задачах динамики парашютных оболочек [4], где β – коэффициент искусственной вязкости. Такой подход можно интерпретировать также и как введение в систему уравнений диссипативных членов (так называемой псевдовязкости, или искусственной вязкости). Это особенно актуально в задачах ударного взаимодействия.

Координаты узловых точек разностной сетки или кинематические соотношения в разностном представлении записываются в виде:

$$x_{k,i}^{m+1} = x_{k,i}^m + \Delta t \bar{v}_{k,i}^{m+1/2}. \quad (9)$$

Шаг интегрирования выбирается из условия устойчивости счета по критерию Куранта $\Delta t \leq \Delta s \sqrt{\rho_l / E}$.

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

Равновесное состояние провода получается как предельное решение динамической задачи. Выбор коэффициента корректировки скоростей

и коэффициента устойчивости численного решения осуществляется путем проведения численных экспериментов на модельных задачах.

О влиянии изгибной жесткости на деформирование линии электропередачи при действии веса провода. Движение провода рассматривается в плоскости Ox_2x_3 (рис. 1, а) как решение системы уравнений (1). В расчетах приняты следующие данные, которые соответствуют справочному материалу [14]: линейная плотность провода из алюминия $\rho_0 = 0.528$ [кг/м]; длина пролета между опорами варьируется в пределах $l = 4 \div 160$ [м]; диаметр провода $d = 0.0142$ [м]; модуль упругости сечения провода $E = 10607300$ [Н].

В табл. 1 приводятся результаты расчета стационарного деформированного состояния провода по двум математическим моделям (1) с учетом изгибной жесткости $I_z \neq 0$ и без учета изгибной жесткости $I_z = 0$ (по модели абсолютно гибкой системы). Основным параметром исследования – прогиб W середины пролета при различных длинах пролета.

На рис. 2 по данным табл. 1 построен график влияния изгибной жесткости на прогиб середины пролета в зависимости от длины пролета.

В конечно-разностном представлении уравнений движения (1) и (2) в составляющей $EI_z \partial^4 \omega / \partial x_2^4$, производная четвертого порядка от прогиба по длине пролета вдоль оси Ox_2 распространяется по пяти последующим точкам, а вес на единицу длины действует в каждой расчетной точке вдоль оси Ox_3 , вес пытается переместить элемент провода вниз, а натяжение в проводе и изгибная жесткость сопротивляются этому. Взаимное влияние действия веса и сопротивление движению за счет изгибной жесткости приводит к уменьшению прогиба провода.

Т а б л и ц а 1

*Влияние изгибной жесткости на прогиб середины пролета
в зависимости от длины пролета*

l м	160	40	35	30	25	20	10	4
$-W_M, I_z = 0$	2.467	0.388	0.325	0.265	0.208	0.154	0.061	0.0180
$-W_M, I_z$	2.467	0.388	0.325	0.263	0.198	0.104	0.012	0.0054

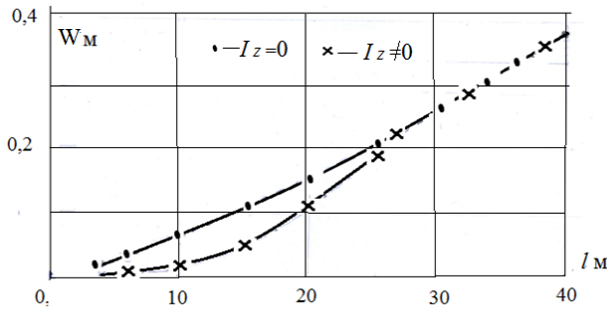


Рис. 2. Влияние длин провода на прогиб при двух моделях деформирования

Из проведенных расчетов следует (рис. 2): для длин провода в диапазоне от 25 до 160 м расчеты деформированного состояния провода с учетом изгибной жесткости $I_z \neq 0$ и без учета $I_z = 0$ практически совпадают, а при уменьшении длины провода, начиная с 25 м, на величину прогиба начинает влиять изгибная жесткость.

Численное исследование динамики деформирования провода ВЛ под действием весовой нагрузки на основе решения уравнений движения (1) методом конечных разностей. Начальное состояние: провод вытянут между опорами и натяжение равно нулю

$$x_3(s_0) = 0, x_2(s_0) = s_0, T(s_0) = 0, 0 \leq s_0 \leq a,$$

под действием веса в результате решения уравнений (1) провод устремляется вниз, а натяжение, возникающее в проводе за счет деформации, начинает торможение падения провода. Длина пролета между опорами $l = 160$ [м].

На рис. 3, а приводится график движения средней точки провода X_3 .

На рис. 3, б приводится график изменения натяжения T в процессе движения провода до стационарного состояния в середине провода.

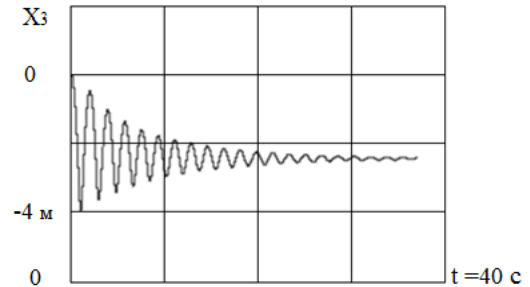
На рис. 3, в приводятся результаты расчета формы максимально нагруженного состояния через $t = 1.024$ с после начала движения провода.

В момент времени $t = 1.024$ натяжение в проводе составило $T = 15063$ Н.

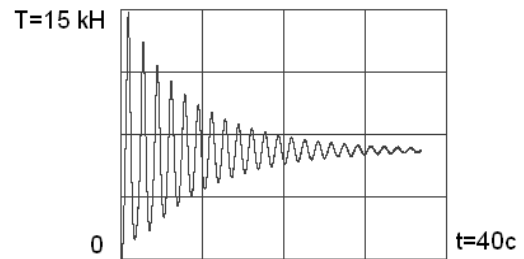
По истечении времени $\tau = 39.5$ с динамическая система переходит к равновесному стационарному состоянию (рис. 3, д).

Стационарное натяжение составило $T = 6717$ Н. Превышение динамического натяжения 2.24; этот параметр характеризует дина-

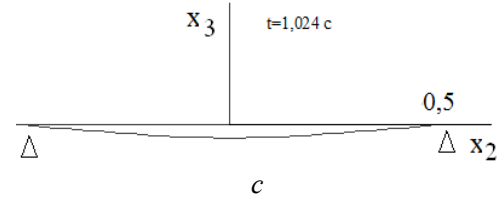
мичность переходного процесса при движении провода к стационарному состоянию (рис. 3, б).



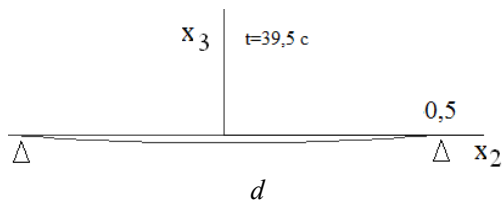
а



б



в



д

Рис. 3.

Задача о форме стационарного равновесного состояния линии электропередачи.

На практике проектирования линий электропередачи на большие расстояния возникает проектная задача определения заданного провиса пролета на всем участке передачи энергии. То есть провис является конечным параметром, а входными данными – следующие параметры: диаметр провода; модуль упругости; плотность провода; длина пролета. Сюда можно отнести также неровности ландшафта земли. Эта задача относится к обратной задаче математики в механике. Ниже рассмотрим пример решения этой задачи.

На основании расчетов (рис. 2) учитывать изгибную жесткость провода необходимо для длины пролета $L = 25$ м, а при длине пролета, превышающей эту величину, можно рассчитывать по модели абсолютно гибкой системы, т.е. в уравнении (1) можно пренебречь $EI_z \partial^4 \omega / \partial x^4$. Это позволяет перейти к аналитическому решению стационарного деформированного состояния ВЛ. Для уравнения движения, полагая $v_k = 0$, $F_n = 0$, $F_\tau = 0$, статическое состояние провода ВЛ в системе координат Oxy будет описываться уравнениями:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{T}{\lambda} \frac{dx}{ds} \right) = 0, \quad \frac{d}{ds} \left(\frac{T}{\lambda} \frac{dy}{ds} \right) - \rho_l g = 0,$$

где S – недеформированная длина дуги; $T = Ee$ – натяжение, E – модуль упругости сечения провода, $\lambda = 1 + e$ – степень удлинения, e – относительное удлинение.

Интегрируя второе выражение с учетом граничных условий, получаем уравнение деформированной цепной линии в виде:

$$y = \frac{(1+e)}{Ee} \frac{\rho_l g}{2} (x^2 - ax). \quad (10)$$

Максимальный прогиб в середине пролета при $x = a/2$ составит:

$$W = -\frac{a^2(1+e)}{8Ee} \rho_l g, \quad W < 0.$$

Учитывая значение максимального прогиба, уравнению цепной линии (10) можно придать другой вид

$$y = \frac{4W}{a^2} (x^2 - ax). \quad (11)$$

Относительное удлинение провода e выразим через максимальный прогиб в середине пролета

$$e = -\frac{a^2 \rho_l g}{8EW + a^2 \rho_l g},$$

тогда определяется и натяжение в проводе (т.е. натяжение выражается через максимальный прогиб W при вариации остальных параметров)

$$T = E \frac{-a^2 \rho_l g}{8EW + a^2 \rho_l g}. \quad (12)$$

Длина цепной линии $l > a$, т.е. масса провода длиной l с учетом провиса будет больше,

чем масса пролета длиной a – расстояние между опорами. Приведенная плотность цепной линии определится выражением:

$$\rho_l = \rho_0 l/a, \quad (13)$$

где ρ_0 – плотность провода по стандарту [14].

Тогда длина деформированной цепной линии между опорами определяется интегралом:

$$l = \int_0^a \sqrt{1 + y_x^2} dx = \int_0^a \sqrt{1 + \left[\frac{4W}{a^2} (2x - a) \right]^2} dx$$

и в конечном виде

$$l = \frac{a^2}{8W} \left[\ln \left(\frac{4W}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{4W}{a} \right)^2} \right) + \frac{4W}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{4W}{a} \right)^2} \right]. \quad (14)$$

Таким образом, длина деформированной цепной линии определяется по формуле (14), затем определяется ее приведенная плотность (13) $\rho_l = \rho_0 l/a$ и на основе формулы (12) определяется необходимое усилие подъема линии электропередачи на высоту заданного провиса $|W|$.

Численное решение уравнений (1) методом конечных разностей до формы равновесного состояния при прогибе $W = -2.47$ м, при линейной плотности провода из алюминия $\rho_0 = 0.528$ [кг/м]; диаметре провода $d = 0.0142$ [м]; модуле упругости сечения провода $E = 10607300$ [Н]; длине пролета $a = 160$ м дало натяжение $T = 6717$ Н, а расчеты по конечной формуле (12) – $T = 6712$ Н.

Расчет усилий подъема провода на опоры электропередачи. Рассмотрим следующую задачу: если имеется лебедка с тарифованным усилием для подъема провода, то по показанию усилия можно по алгоритму определить провис пролета. Пример расчета: пусть $W = -15$ м, $a = 160$ [м]. В соответствии с (14) длина деформированной цепной линии составит $l = 163.657$ м. Приведенная плотность по (13) $\rho_l = \rho_0 l/a = 0.54$ [кг/м] и необходимое усилие подъема линии провода с провисом $W = -15$ м по (12) составило $T = 1130$ Н.

Т а б л и ц а 2

W [м]	-0.5	-0.75	-1.0	-2	-4	-6	-7	-8	-10	-15
$T \times 10^3$ [Н]	33.24	22.14	16.60	8.30	4.15	2.38	2.14	2.09	1.67	1.13

Таким образом, по проекту необходимо протянуть ВЛ длиной L км и с расстоянием между опорами a [м], с заданным провисом между опорами W . Задача решается алгоритмом (14), (13) и (12). Пусть этот алгоритм зашит в калькуляторе и тарифован лебедкой для подъема линии электропередачи на опоры. Тогда по показанию датчика натяжения устанавливается равный провис между опорами W на линии L км проекта.

В табл. 2 приводятся результаты расчета монтажного натяжения при различных значениях провиса середины пролета по формулам (12), (13) и (14). В соответствии с табл. 2 и рис. 4 можно прогнозировать, какое усилие T нужно приложить на опоре, чтобы поднять линию электропередачи с заданным по техническим условиям провисом $|W|$ в диапазоне (0.5 ÷ 15) м. На рис. 4 приводится график определения монтажного усилия для произвольного значения провиса провода в этом диапазоне.

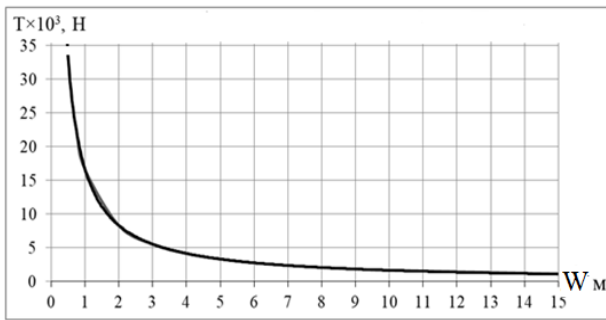


Рис. 4. Зависимость монтажного усилия от провиса линии электропередачи

Заметим, что чем меньше провис провода W , тем больше надо приложить монтажное усилие для подъема провода. Известно, что весомый провод можно подвесить с нулевым прогибом, если только приложить бесконечно большое натяжение. Так, при $T = E = 10607300$ [Н], $\rho_0 = 0.528$ кг/м, $g = 9.8065$ м/с², из формулы (12) следует предельное значение прогиба равное $W = -0.00312$ м. Это значение будет предельным для табл. 2 при натяжении в проводе, равным модулю упругости сечения провода.

Деформирование провода высоковольтной линии под действием ветровой нагрузки. Рассматривается задача деформирования провода под действием ветра, действующего с по-

стоянной скоростью $U_\infty = 20$ м/с в плоскости Ox_2x_1 (рис. 1, б) до формы равновесного состояния как численного решения системы (2). При торможении потока перед проводом давление, возникающее на проводе, направлено по его нормали и прогибает провод с шарнирно закрепленными концами.

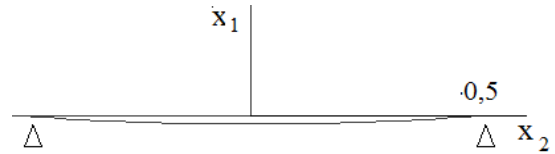


Рис. 5. Стационарная форма провода в плоскости Ox_2x_1 (см. рис. 1)

Расчеты формы профиля стационарного деформированного состояния провода в плоскости Ox_2x_1 при скорости ветра 20 м/с и численном решении уравнения (2) методом конечных разностей дают значение максимального статического прогиба $W = 2.187$ м, натяжение в проводе $T_c = 5274$ Н, а максимальное значение натяжения в динамике $T_d = 11741$ Н, коэффициент динамичности по натяжению при этом составляет 2.19.

В соответствии с [13] приближенное аналитическое решение этой задачи определяются следующими выражениями: радиус дуги окружности $r = (a/2) \sin^{-1} \phi$; давление, возникающее на проводе $P = \rho U_\infty^2 / 2$, где U_∞ — характерная скорость набегающего потока, ρ — плотность среды; максимальный прогиб $W = r \left[1 - \sqrt{1 - (a/(2r))^2} \right]$; центральный угол для радиуса дуги окружности $\phi = (3Pda/E)^{1/3} \left[1 + (3Pda/E)^{2/3} / 60 \right]$; натяжение в проводе $T = P \cdot r$.

Расчеты дают максимальный прогиб $W = 2.192$ м, что хорошо согласуется с решением по методу конечных разностей стационарного значения максимального прогиба $W = 2.187$ м.

Выводы.

1. На основе этой работы можно создать устройство для монтажа линии электропередачи, обеспечивающей одинаковые прогибы на удаленном расстоянии, что обеспечит и оптимальное проектирование ВЛ;

2. По замеру расстояния от земли до точки максимального прогиба провода W можно определить и натяжение в проводе;

3. При численном решении динамической задачи деформирования провода ВЛ получены графики нелинейных характеристик изменения прогиба и натяжения во времени;

4. Исходя из характеристик провода, можно определить диапазон длин ВЛ, для которых справедлива модель деформирования абсолютно гибкой системы;

5. На основе гипотезы абсолютно гибкой системы приводятся аналитические решения стационарного состояния ВЛ при действии весовой и ветровой нагрузки по отдельности.

Литература

1. Il'gamov M.A. Introduction to nonlinear hydroelasticity. Moscow: Nauka, 1991. 200 p.
2. Il'gamov M.A. Interaction of instabilities in a hydroelastic system. PMM. Vol. 80. Iss. 5. 2016. P. 566–579.
3. Il'gamov M.A., «Bending of underwater pipeline during liting», Mech. Solids. 60. 1500–1509. (2025).
4. Гимадиев Р.Ш. Динамика мягких оболочек парашютного типа. Казань, 2006. 2008 с.
5. Гимадиев Р.Ш., Динмухаметов Ф.Ф. Моделирование разрыва линий передачи энергий // Известия высших учебных заведений. «Проблемы энергетики. Казан. гос. энерг. ун-т. №7-8-2008». С. 137–143.
6. Гимадиев Р.Ш., Динмухаметов Ф.Ф., Галимуллин Н.Р. Расчет пространственной динамики ЛЭП при совместном воздействии ветровой и весовой нагрузки // Известия высших учебных заведений. «Проблемы энергетики. Казан. гос. энерг. ун-т. № 3-4-2010». С. 28–37.
7. Gimadiev R.Sh. Power Line Deformation Dynamics // Mechanics of Solids, 2019. Vol. 54. No. 6. P. 903–914. <https://rdcu.be/b3doz>
8. Гимадиев Р.Ш., Якимов Н.Д., Халитов Ф.Г. Динамика деформирования высоковольтной линии при растапливании обледенения нагревом // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. № 2. С. 24–29.
9. Gimadiev R.Sh. Deformed state of onl wire taking into account bending rigidity. Dynamics 2022. 2. Firstage-lastpage. <https://doi.org/10.3390/www.mdpi.com/jornal/dynamics>
10. Гимадиев Р.Ш. Неустойчивые колебания провода с шарнирно закрепленными концами // Известия Уфимского научного центра РАН. 2025. № 3. С. 5–9.
11. Девнин С.И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании. Л.: Судостроение, 1975. 192 с.

12. Рахматулин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Гостехтеориздат, 1961. 399 с.

13. Гимадиев Р.Ш., Ильгамов М.А. Статическое взаимодействие профиля мягкого крыла с потоком несжимаемой жидкости // Известия вузов. Авиационная техника. 1998. № 1. С. 43–48.

14. Модифицированный провод для ЛЭП напряжением до 35 кв марок ЗАЛП и ЗАЛП-В. <http://ruscabel/zalp.htm>

15. Ryan, Hugh (2001), High Voltage Engineering and Testing, IET, p. 192, ISBN0-85296-775-6.

References

1. Il'gamov M.A. Introduction to nonlinear hydroelasticity. Moscow: Nauka, 1991. 200 p.
2. Il'gamov M.A. Interaction of instabilities in a hydroelastic system. PMM. Volume 80. Issue. 5, 2016, pp. 566-579.
3. Il'gamov M.A., «Bending of underwater pipeline during liting», Mech. Solids. 60. 1500-1509, (2025).
4. Gimadiev R.SH. Dinamika myagkikh obolochek parashyutnogo tipa. Kazan', 2006. 2008 s.
5. Gimadiev R.SH., Dinmukhametov F.F. Modelirovanie razryva linii peredachi energii // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. «Problemy energetiki. Kazan. gos. energ. un-t. №7-8-2008». S. 137-143 .
6. Gimadiev R.SH., Dinmukhametov F.F., Galimullin N.R. Raschet prostranstvennoi dinamiki LEP pri sovместnom vozdeistvii vetrovoi i vesovoi nagruzki // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. «Problemy energetiki. Kazan. gos. energ. un-t. №3-4-2010». S. 28-37.
7. Gimadiev R.Sh. Power Line Deformation Dynamics // Mechanics of Solids, 2019, Vol. 54. No. 6, pp. 903-914. <https://rdcu.be/b3doz>
8. Gimadiev R.SH, Yakimov N.D, Khalitov F.G. Dinamika deformirovaniya vysokovol'tnoi linii pri rastaplivanii obledeneniya nagrevom // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2021. № 2. S. 24-29.
9. Gimadiev R.Sh. Deformed state of onl wire taking into account bending rigidity. Dynamics 2022, 2, Firstage-lastpage. <https://doi.org/10.3390/www.mdpi.com/jornal/dynamics>
10. Gimadiev R.SH. Neustoichivye kolebaniya provoda s sharnirno zakreplennymi kontsami // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN. 2025. № 3. S. 5-9.
11. Devnin S.I. Gidrouprugost' konstruktсии pri otrivnom obtekanii. Leningrad: Sudostroenie, 1975.192 s.
12. Rakhmatulin KH.A., Dem'yanov YU.A. Prochnost' pri intensivnykh kratkovremennykh nagruzkakh. Moscow: Gostekhteorizdat, 1961. 399 s.
13. Gimadiev R.SH., Il'gamov M.A. Staticheskoe vzaimodeistvie profilya myagkogo kryla s potokom neszhimaimoi zhidkosti // Izvestiya vuzov. Aviationsnaya tekhnika. 1998. № 1. S. 43-48.

14. Modifitsirovannyi provod dlya LEP napryazheniem do 35 kv marok ZALP i ZALP-V. [http: ruscabel/zalp.htm](http://ruscabel/zalp.htm)

15. Ryan, Hugh (2001), High Voltage Engineering and Testing, IET, p. 192, ISBN 0-85296-775-6.



ON THE INFLUENCE OF FLEXURAL RIGIDITY AND WIRE LENGTH ON POWER LINE DEFORMATION

© R.Sh. Gimadiev

Numerical studies of the deformation dynamics of a high-voltage transmission line conductor were based on the hypothesis of a perfectly flexible model, taking into account compressive and tensile forces. Of practical interest is the effect of the conductor's bending stiffness on its deformation state depending on the span length. Nonlinear equations of conductor dynamics are solved using the finite difference method using an explicit scheme. The ultimate equilibrium state of a wire is determined using a dynamic problem formulation method. A numerical experiment is used to determine the effect of bending stiffness on the wire's equilibrium shape. A range of wire lengths is determined for which bending stiffness can be ignored and calculations can be performed using a perfectly flexible system model, which in some cases allows for analytical solutions.

Keywords: power transmission line, deformation, numerical experiment, influence of bending rigidity, sag, tension.