

УДК 621.315.2

## ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Гимадиев Равиль Шамсутдинович

Казанский государственный энергетический университет

420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51

Разработана математическая модель динамики деформирования провода воздушной линии электропередачи. Проведено численное исследование нагружения линии электропередачи при совместном воздействии весовой и ветровой нагрузки. Исследуется процесс теплопроводности и динамики деформирования линии при растапливании обледенения нагревом, изучаются переходные процессы при деформировании воздушных линий электропередач. Для частных случаев нагружения получены аналитические решения деформирования провода воздушной линии.

Ключевые слова: высоковольтная линия, динамика деформирования, теплопроводность, обледенение.

A mathematical model of deformation dynamics of an overhead power transmission line is created. A numerical study of the loading of the power transmission line is carried out under the combined action of a weight and wind load. The process of thermal conductivity and the dynamics of the deformation of the line are studied in the case of ice melting by heating, the transient processes during the deformation of overhead power lines are studied. For special cases of loading, analytical solutions for the deformation of the wire are obtained.

**Введение.** Провода высоковольтных линий (ВЛ) подвергаются значительным механическим нагрузкам. Они постоянно нагружены собственным весом и ветровой нагрузкой. Во многих регионах нашей страны в осенне-весенний период создаются благоприятные условия для образования гололедных отложений на линиях электропередачи. Обнаружению обледенения ВЛ посвящена работа [1]. Провода ВЛ представляют собой деформируемое тело, диаметр которого можно считать пренебрежимо малым по сравнению с его длиной. Провод ВЛ моделируется абсолютно гибкой линейной связью [2 ÷ 4].

**1. Постановка.** Гибкая система ВЛ не воспринимает изгибных напряжений, но работает на растяжение и сжатие. Движение ВЛ с линейной плотностью  $\rho_0(s)$  рассматривается в декартовой системе координат  $Ox_1x_2x_3$ . Опоры ВЛ абсолютно жесткие и расположены в вертикальной плоскости  $Ox_2x_3$ . Деформация гибкой системы характеризуется степенью удлинения  $\lambda = 1 + e$ , где  $e$  – относительное удлинение.

**1.1. Уравнения движения ВЛ** в проекциях на оси декартовой системы координат  $Ox_1x_2x_3$  имеют вид [2]

$$\begin{aligned}\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{T}{\lambda} \frac{\partial x_1}{\partial s} \right) - F_n \cos \varphi \cos \alpha_1 \frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_1}{\partial s} \\ \rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{T}{\lambda} \frac{\partial x_2}{\partial s} \right) - F_n \cos \varphi \sin \alpha_1 \frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_2}{\partial s} \\ \rho_0 \frac{\partial v_3}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{T}{\lambda} \frac{\partial x_3}{\partial s} \right) + F_n \lambda \cos \varphi \sin \gamma + F_\tau \frac{\partial x_3}{\partial s} - \rho_0 g\end{aligned}\quad (1.1)$$

где  $v_1, v_2, v_3$  – проекции скорости элементов на координатные оси,  $T$  – натяжение,

$$\begin{aligned}\cos \alpha_1 &= \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta}}, \quad \sin \alpha_1 = \frac{\cos \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta}}, \quad \cos \alpha = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial x_1}{\partial s} \\ \cos \beta &= \frac{1}{\lambda} \frac{\partial x_2}{\partial s}, \quad \cos \varphi = 1, \quad \cos \gamma = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial x_3}{\partial s}, \quad \sin \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \gamma}\end{aligned}$$

В соответствии с решением дифференциальных уравнений движения (1.1) система через форму максимального нагружения и провиса переходит в равновесное состояние. При образовании гололеда масса провода увеличивается и система переходит в новое равновесное деформированное состояние. При включении нагрева провод еще больше провисает за счет температурного удлинения. После прогрева обледенение сбрасывается, температура по линейному закону спадает до температуры окружающей среды, и форма провода переходит снова в равновесное состояние, которое соответствует нагружению только весом самого провода.

**1.2. Уравнение теплопроводности** для линейного элемента имеет вид

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left( k \frac{\partial u}{\partial s} \right) + f_0(s, t), \quad (1.2)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $c$  – теплоемкость единицы массы,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $f_0$  – плотность тепловых источников,  $u$  – температура,  $t$  – время,  $s$  – лагранжева координата.

**1.3. Тестовые расчеты.** Проверка упругой части задачи проводится сравнением с аналитическими решениями: а) вес действует вдоль оси  $Ox_3$ , в работе [3] получено аналитическое решение для статического состояния ВЛ и численное решение по (1.1). При этом для статической задачи относительная погрешность ошибки по сравнению с точным решением составляет  $\theta \approx 0,12\%$ ; б) под действием ветровой нагрузки перепад давления действует по нормали к деформированной ВЛ. Для этого случая в [3] проведено сравнение численного решения уравнений (1.1) с приближенным аналитическим решением [5]. Относительная погрешность составляет менее  $\theta = 0,007\%$ . При этом погрешность самого приближенного решения не превышает величины  $\delta = 0,004 \cdot 10^{-2}\%$ .

*Проверка алгоритма задачи теплопроводности (1.2).* Аппроксимацию граничных условий проводится по линейному закону. В начальном состоянии температура провода равна температуре окружающей среды (минус  $5^\circ$ ). Пусть теплоизолированный провод разделен на две части. Мгновенно левый пролет нагрет до  $200^\circ\text{C}$  а правый имеет температуру окружающей среды минус  $5^\circ$ . В безразмерном виде эти температуры составят 1,7322 и 0,9817. Перераспределение температуры по длине и по времени происходит без потери тепла (теплоизолированный провод) и процесс продолжается до температуры выравнивания до теоретической величины  $(1,7322+0,9817)/2=1,35695$ , что соответствует  $97,5^\circ$  или  $370,65089\text{ K}^\circ$ . Численные расчеты по (1.2) дают 1,35689. Температура выравнивается за 2,1 с.

**1.4. Результаты численного эксперимента динамика ВЛ с учетом веса провода, веса обледенения и теплопроводности.** Пусть линейная плотность электрических проводов равна  $\rho_{\text{пров}} = 0,5\text{ [кг/м]}$ , а плотность обледенения  $\rho_{\text{обл}} = \rho_{\text{пров}}$ . Общая плотность составляет  $\rho = 1,0\text{ [кг/м]}$ ,  $g = 9,81\text{ [м/с}^2\text{]}$ ;  $a = 160\text{ [м]}$ ; скоростной напор действующий на провода при скорости ветра  $V_\infty = 20\text{ м/с}$  составляет  $q = \rho_{\text{возд}} V_\infty^2 / 2 = 25 \cdot g\text{ [кг/(м} \cdot \text{с}^2\text{)]}$ , диаметр провода  $d_{\text{пров}} = 0,01553\text{ [м]}$ ; погонная ветровая нагрузка равна  $p = qd_{\text{пров}} = 0,38825 \cdot g\text{ [Н/м]}$ ; коэффициент линейного расширения алюминиевого провода составляет  $\alpha_t = 23,8 \cdot 10^{-6}\text{ [1/K}^\circ\text{]}$ ; модуль упругости  $E = 6,25 \cdot 10^{10}\text{ [Н/м}^2\text{]}$ ; плотность материала провода  $\rho_{\text{пр}} = 2700\text{ [кг/м}^3\text{]}$ ; теплоемкость единицы массы  $c = 0,9\text{ [кДж/(кг} \cdot \text{K}^\circ\text{)]}$ ;  $f_0 = 0\text{ [Вт/м}^3\text{]}$  – плотность тепловых источников; коэффициент теплопроводности  $k = 209\text{ [Вт/(м} \cdot \text{K}^\circ\text{)]}$ ; абсолютная температура Кельвина  $\text{K}^\circ = -273,15^\circ$ . Количество дискретных элементов в разбиении длины провода для разностной схемы  $N = 50$ .

В соответствии с решением уравнения движения провод под действием только собственного веса перемещается до прогиба  $\max f = 3,4\text{ м}$ , при этом натяжение составляет  $T = 12\text{ кН}$ , затем в результате переходного процесса по истечении времени около 30 секунд самоустанавливается до формы равновесного состояния с прогибом  $\max f = 2,3\text{ м}$ . На эту форму равновесного состояния накладывается равномерная по длине масса обледенения. Система снова выходит на равновесное состояние с массой провода и обледенения, это состояние в момент времени  $t = 51\text{ с}$  приводится на рис. 1. При этом максимальный прогиб составляет  $\max f = 2,95\text{ м}$  и натяжение  $T = 9,8\text{ кН}$ . Считается, что в момент времени  $t = 51\text{ с}$  1/10 часть пролета мгновенно нагрета до температуры  $150^\circ\text{C}$ , и эта температура держится неизменной на этой части и нагревает остальную часть пролета за счет теплопроводности в течение 5 секунд. В течение этого времени эта температура успевает распространиться и выровняться до  $150^\circ\text{C}$  по всей длине. При этом происходит удлинение за счет теплового расширения. В конце нагрева прогиб достигает величины

$\max f = 6,2$  м, и температурное натяжение в проводе составляет величину 38 кН.

После этого масса обледенения считается сброшенной мгновенно, в течении одной секунды температура выравнивается с температурой окружающей среды, равной минус 5°C. Рассчитывается дальнейшее движение, система переходит в новое равновесное состояние с максимальным прогибом 2,3 м и натяжением в проводе 6,2 кН.

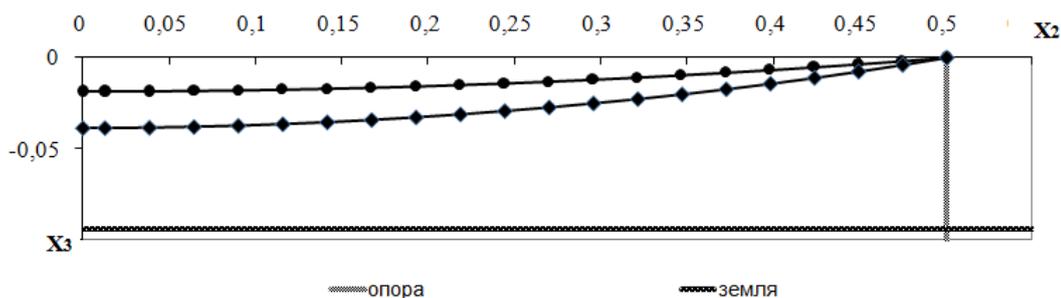


Рис. 1. Форма проводов ВЛ с учетом:

- веса провода с обледенением до начала нагрева ( $t=51$  с.)
- ◆— веса провода с обледенением в конце нагрева провода ( $t=56$  с.)

**Выводы:** Разработана математическая модель динамики деформирования ВЛ в пространственной постановке с учетом теплопроводности. Численные алгоритмы прошли тестовую отработку. Алгоритмы позволяют проводить численный эксперимент по растапливанию обледенения ВЛ в процессе нагружения весовой и ветровой нагрузкой в динамическом режиме.

#### Литература

1. Минуллин Р. Г., Фардиев И. Ш. Локационная диагностика воздушных линий электропередачи: монография / - Казан. гос. энерг. ун-т, Казань: 2008. - 203 с.
2. Гимадиев Р.Ш., Динмухаметов Ф.Ф. Моделирование разрыва линий передачи энергии // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 7-8. С. 137-143.
3. Гимадиев Р.Ш., Динмухаметов Ф.Ф., Галимуллин Н.Р. Расчет пространственной динамики ЛЭП при совместном воздействии ветровой и весовой нагрузки // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 28-37.
4. Гимадиев Р.Ш., Гимадиева Т.З. Математическое моделирование деформирования линии электропередачи с учетом теплопроводности// Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9. С. 51-59.
5. Гимадиев Р.Ш., Ильгамов М.А. Статическое взаимодействие профиля мягкого крыла с потоком несжимаемой жидкости// Изв. вузов. Авиационная техника. 1998, №1. С. 43-48.