

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-154-164

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ярославский Д.А.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
kgeu-toe@mail.ru

Резюме: в статье рассматривается задача мониторинга состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи с ЦЕЛЮ обеспечения бесперебойного и надежного снабжения потребителей электроэнергией.

МЕТОДЫ. В качестве параметров состояния определены стрела провеса, сила тяжения и погонная масса провода, висящего в пролете. Подчеркивается, что полную картину состояния воздушной линии можно установить, определяя спектральный состав колебаний провода с использованием навесных автоматизированных многопараметрических датчиков с акселерометрами в качестве сенсоров. В РЕЗУЛЬТАТЕ показано, что используемые в настоящее время динамические модели описания движения провода как маятника и как туго натянутой струны недостаточно полны для представления колебания провода во всех трех пространственных координатах, не охватывают колебаний с нечетными гармониками и симметричных колебаний. получена система уравнений, позволяющая описывать пространственные колебания провода по всем трем осям, учитывающая разницу высот точек подвеса провода. В ЗАКЛЮЧЕНИИ показано, что анализ высших гармоник спектра колебаний провода дает возможность определения всех основных механических параметров проводов ВЛЭП.

Ключевые слова: мониторинг состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи; модели колебаний провода, пространственные координаты, высшие гармоники спектра колебаний.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме "Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей" (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Для цитирования: Ярославский Д.А. Аналитические модели движения проводов воздушных высоковольтных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 154-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-154-164.

ANALYTICAL MODELS OF MOVEMENT OF WIRES OF AIR HIGH-VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINES

DA. Yaroslavsky

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

kgeu-toe@mail.ru

Abstract: The article *PURPOSE* with the problem of monitoring the state of high-voltage overhead power lines in order to ensure uninterrupted and reliable supply of consumers with electricity. *METHODS.* As parameters of the state, the sag, the tensile force and the mass per unit length of the wire hanging in the span are defined. *IT IS STRESSED* that a complete picture of the state of an overhead line can be established by determining the spectral composition of the wire vibrations using mounted automated multi-parameter sensors with accelerometers as sensors. It is shown that the currently used dynamic models for describing the motion of a wire as a pendulum and as a tightly stretched string are not complete enough to represent the vibrations of the wire in all three spatial coordinates, do not cover vibrations with odd harmonics and symmetrical vibrations. A system of equations has been *OBTAINED* that makes it possible to describe the spatial oscillations of the wire along all three axes, taking into account the difference in heights of the wire suspension points. *IT IS SHOWN* that the analysis of the higher harmonics of the spectrum of vibrations of the wire makes it possible to determine all the main mechanical parameters of the wires of overhead power lines.

Keywords: monitoring of the state of high-voltage overhead power transmission lines; models of wire oscillations, spatial coordinates, higher harmonics of the spectrum of oscillations.

Acknowledgments: The research work was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the scope of the state Research and Development task no. 075-03-2022-151 of 14.01.2022 "Distributed automated systems of monitoring and diagnostics for technical condition of overhead power lines and substations based on broadband data transmission technology through power lines and the industrial Internet of Things".

For citation: DA. Yaroslavsky. Analytical models of movement of wires of air high-voltage power transmission lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):154-164. doi: 10.30724 / 1998-9903-2022-24-4-154-164.

Введение (Introduction)

В силу большой протяженности и географического положения территории Российской Федерации передача энергии от источников генерации до потребителей осуществляется через высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП). Линии электропередачи находятся под постоянным воздействием силы тяжести и климатических факторов: температуры, влажности, ветровых воздействий, осадков, гололедно-изморозевых отложений (ГИО) на проводах, приводящих к обрывам и перехлестам проводов, вызывающих короткие замыкания [1-3]. Главная задача электрических сетей - постоянное и надежное обеспечение потребителей электрической энергией - возможно только в условиях непрерывного мониторинга состояния ВЛЭП [4, 5]. Следовательно, разработка устройств и методик для мониторинга ВЛЭП является актуальной задачей.

В мониторинге и диагностике состояния ВЛЭП по степени важности среди других параметров можно выделить три главных механических параметра: стрелу провеса, силу тяжения и погонную массу провода. Система мониторинга строится на основе разработки аналитических моделей, связывающих между собой эти три параметра ВЛЭП и позволяющих проводить их косвенное измерение [6, 7].

В связи с этим в работе было проведено моделирование колебаний провода как физического маятника с учетом небольшой ангармоничности и затухания, а также разработана математическая модель колебаний провода в полете по всем трем осям координатной системы. Получены аналитические выражения зависимости амплитуд и круговых частот свободных колебаний провода от трех главных механических параметров: стрелы провеса, силы тяжения и погонной массы провода. Все выражения учитывают разницу высот точек подвеса провода. Применение полученной аналитической модели при

разработке датчика мониторинга ЛЭП позволит снизить относительную погрешность измерения периода колебаний спектральным методом. Дополнительно появляется возможность установки датчика возле точки подвеса и применения инклинометрического способа определения стрелы провеса в качестве резервного метода.

Научная и практическая значимость данного исследования заключается в возможности изготовления простого датчика для мониторинга на основе трехосевого акселерометра с применением полученной математической модели для косвенных измерений главных параметров ВЛЭП.

Литературный обзор (Literature Review)

Имеется множество методов измерения стрелы провеса, например: инклинометрический [8, 9], оптический [10], емкостный, электростатический, на основе колебаний [11, 12] и т.д. В связи с появлением недорогих интегральных малогабаритных акселерометров, одними из наиболее перспективных методов определения важных параметров проводов ВЛЭП представляются методы, основанные на колебаниях провода.

При исследовании состояния ВЛЭП наиболее предпочтительным решением является применение стационарных систем мониторинга состояния ВЛ, поэтому для сбора данных был сделан выбор следующих трех методов: инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, инклинометрического метода с учетом угла вращения провода вокруг своей оси и метода определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний [12, 13].

Инклинометрический метод на основе гиперболических уравнений используется наиболее широко, поскольку позволяет определять механические нагрузки на провод независимо от типа, строения опор и провода в пролете. Тем не менее, данный метод не позволяет учитывать перетяжку провода в пролете при отсутствии устройств контроля в соседних смежных пролетах [14].

Инклинометрический метод с учетом угла вращения провода вокруг своей оси, в отличие от инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, учитывает влияние смещения точек подвеса провода в пролете. Однако, учитывающий угол вращения провода улучшенный инклинометрический метод применяется только в пролетах с одной анкерной опорой и с проводами с одним слоем навивки относительно центральной жилы (например, А-70, АС-70/11) [15].

Метод определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний дает упростить расчеты геометрии провода в пролете, поскольку для определения стрелы провеса провода достаточно знать только период его собственных колебаний. Данный метод может быть использован в любом пролете при любой марке провода и учитывает перетяжку провода между соседними пролетами, так как стрела провеса провода ВЛ определяется через период колебаний провода и не зависит от расстояния между его точками подвеса [16].

По разработанным методикам погрешность не превышает 5% определения силы тяжения провода.

Разработанные методы [14, 17, 18, 19] могут применяться в зависимости от условий мониторинга. Представленные методы повышают надежность и достоверность мониторинга состояния ВЛ, дополняя друг друга. Представленные три метода контроля состояния ВЛ используются в системе автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «Татнефть» [20].

Материалы и методы (Materials and methods)

Под действием силы тяжести и порывов ветра провод может совершать множество видов колебаний различной природы. Наиболее тщательно были исследованы маятниковые колебания в работе В.Ю. Кабашова [21]. Из измерений параметров маятниковых колебаний провода в пролете можно непосредственно получить значение стрелы провеса [21]:

$$\omega_0 = 3.5 f^{-1/2} \quad (1)$$

где ω_0 - круговая частота свободных гармонических маятниковых колебаний, а f - стрела провеса провода.

Выражение для круговой частоты негармонических колебаний с повышенной амплитудой, найденное тем же автором путем разложения в ряд функции синус, имеет вид

$$\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{17\varphi_0^4}{1536} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где φ_0 - угловая амплитуда маятниковых колебаний. При малых угловых отклонениях данная круговая частота будет незначительно отклоняться от гармонической в меньшую сторону.

В некоторых исследованиях для негармонических маятниковых колебаний с диссипативными силами прогнозируется появление третьей и пятой гармоники маятниковых колебаний [22, 23]. Однако, эксперименты по измерению ускорения колебаний провода при помощи акселерометра показали наличие множество высших гармоник, включая четные. Для уточнения результатов, полученных перечисленными авторами, нами были проведены численные эксперименты нелинейных маятниковых колебаний с диссипативными силами по следующей модели, представленной уравнением

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + c \sin \varphi + k_1 \frac{d\varphi}{dt} + k_2 \frac{d\varphi}{dt} \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = 0.$$

В расчетах коэффициент c , являющийся отношением гравитационной постоянной к длине подвеса маятника был принят равным $c = \frac{g}{L} = 1$, коэффициенты k_1 и k_2 , учитывающие затухание колебаний, изменялись для совпадения с экспериментальными данными. Начальный угол отклонения в численном эксперименте был принят $\varphi = \frac{\pi}{6}$, начальная

угловая скорость принята за ноль. Несколько спектров колебаний представлены на рисунке 1. В данном случае частоты спектра нормированы к частоте собственных незатухающих колебаний гармонического маятника. Амплитуда нормирована к начальной амплитуде колебаний.

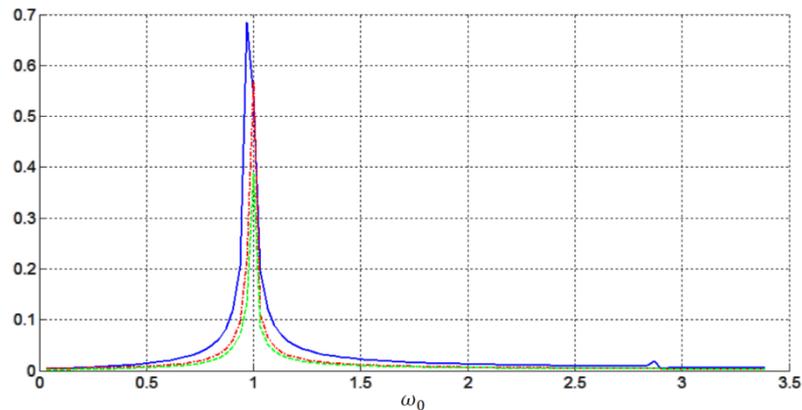


Рис. 1. Гармонический состав маятниковых колебаний: непрерывная голубого цвета при $k_1 = k_2 = 0$; штрих-пунктирная линия красного цвета при $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0$; пунктирная линия при $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0,012$.

Fig 1 Harmonic composition of pendulum oscillations: continuous blue line at $k_1 = k_2 = 0$; dashed red line at $k_1 = 0,01$ and $k_2 = 0$; dotted line at $k_1 = 0,01$ and $k_2 = 0,012$.

Из многочисленных численных экспериментов можно сделать следующий вывод. Негармонические незатухающие колебания действительно снижают частоту колебаний и достаточно хорошо описываются формулой (2). Однако диссипативные силы "возвращают" круговую частоту к частоте свободных колебаний. Высшие гармоники по амплитуде пренебрежимо малы по сравнению с основной. Заметное глазу появление третьей, пятой и седьмой гармоники наблюдается при отклонении маятника на углы более $\frac{\pi}{4}$.

Четные гармоники в решениях отсутствуют вовсе.

Спектр, который был получен нами в пролете длиной $l = 64$ м и стрелой провеса $f = 1,25$ м, представлен на рисунке 2.

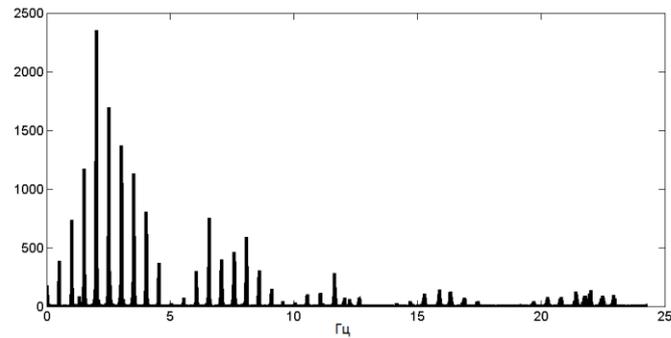


Рис. 2. Спектр колебаний провода в плоскости, *Fig 2 The spectrum of vibrations of the wire in a*
перпендикулярной плоскости провиса *plane perpendicular to the plane of the sag*

Результат моделирования противоречит экспериментальным данным, из чего можно сделать вывод, что провод в полете, помимо маятниковых колебаний, совершает другие виды колебаний, частоты которых также зависят от стрелы провиса.

Для уточнения полной картины колебаний провода в полете необходимо составить пространственную динамическую модель. В теоретической механике есть подходящая модель, именуемая гибкой нитью, которая позволяет это сделать. Уравнение динамического баланса элемента нити отличается от уравнения статического баланса, из которого получается хорошо известный провис провода в поле тяготения, обусловленный лишь наличием силы, вызванной вторым законом Ньютона [24]. Однако, при получении аналитического решения координатных уравнений возникают некоторые трудности. Первая трудность - это то, что рассмотрение колебаний нерастяжимой цепной линии, несмотря на то, что оно получено с привлечением математического аппарата вариационного исчисления, всё равно не дает аналитического решения, а всего лишь приводит к уравнению, пригодному для численного моделирования [24]. Вторая трудность заключается в том, что, упростив уравнение динамического баланса нити тем же способом, что и при выводе уравнения нити с малой стрелой провиса, мы теряем неголономную связь проекций элемента нити, после чего оно распадается на независимые уравнения. Третья трудность в том, что никакая реальная нить, по сути, не является нерастяжимой, а непосредственное введение свойства растяжимости в координатные уравнения снова не дает возможности получения его аналитического решения. Отсутствие растяжимости нити, например, не дает возможности для существования симметричных поперечных колебаний в плоскости провиса, что противоречит наблюдениям.

Для преодоления описанных трудностей применим метод малых отклонений. Предположительно, отклонение элемента от положения статического равновесия будет незначительным, особенно в плоскости провиса. Координатные уравнения баланса элемента нити для малых отклонений имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dx}{ds} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dy}{ds} + \frac{\partial v}{\partial s} \right) \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - q, \\ \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \frac{\partial w}{\partial s} \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases}$$

здесь s - криволинейная координата вдоль нити; $T = T(x)$ и $\tau = \tau(x,t)$ - сила тяжения и малое дополнительное тяжение вдоль оси малого элемента; ∂u , ∂v и ∂w - малое дополнительное удлинение элемента по координатам x , y и z , соответственно; q - погонный вес единицы длины провода; g - ускорение свободного падения. Сделав упрощение, примененное при выводе модели нити с малой стрелой провиса, и пренебрегая членами второго порядка малости, получим систему.

$$\begin{cases} H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + h \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases}$$

здесь, $H = \text{const}$ и $h = h(t)$ - статическое и малое дополнительное горизонтальное тяжение. Однако, данная система не имеет совместного решения из-за ранее описанных проблем номер два и три.

Авторы статьи [25] предлагают следующий способ решения данной проблемы. Первое уравнение необходимо удалить из системы по причине того, что продольные колебания имеют малые амплитуды, но вызывают значительные удлинения элемента нити, следовательно, имеет максимальную погрешность. Два оставшихся уравнения дополняются отдельным геометрическим уравнением растяжения элемента нити по закону Гука с пренебрежением величинами второго порядка малости. В итоге получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \alpha * h \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases},$$

где α^* - удельное относительное удлинение нити.

Глядя на систему уравнений, можно сделать вывод, что второе уравнение полностью отделилось от двух остальных, и колебания, перпендикулярные плоскости провиса, не вызывают дополнительных тяжений. Это уравнение описывает колебания идеальной струны, на которую действует единственная статическая сила натяжения. Это хорошо подтверждается наблюдением, так как модой, которую можно легко возбудить, воздействуя на середину нити в плоскости горизонта, является первая мода. Первое же уравнение имеет аналитическое решение, которое, однако, необходимо разбить на два решения: для асимметричных колебаний и для симметричных колебаний в плоскости провиса.

Начнем с самого простого вида колебания в плоскости, перпендикулярной плоскости провиса, уравнение которого имеет вид:

$$H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

Это колебания натянутой струны. Частное решение данного уравнения для n -ой гармоники будет иметь амплитуду и круговую частоту:

$$W_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad \omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{ag}, \quad (3)$$

где n - любое натуральное число, $a = H/q$.

Асимметричные колебания, которые возникают в плоскости провиса, можно в хорошем приближении описать, приняв удлинение нити $h = 0$ и произведя замену $v(x,t) = V(x)e^{j\omega t}$, $u(x,t) = U(x)e^{j\omega t}$ в исходных уравнениях. Тогда имеем два уравнения, зависящие только от одной координаты

$$H \frac{d^2V}{dx^2} + \frac{q}{g} \omega^2 V = 0,$$

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx} = 0.$$

Или учитывая граничные условия $V(0) = V\left(\frac{l}{2}\right) = 0$ из первого уравнения, сразу же получаем амплитуду и круговую частоту n -й гармоники вертикальных асимметричных колебаний:

$$V_n(x) = A_n \sin \frac{2n\pi x}{l}, \quad \omega_n = \frac{2n\pi}{l} \sqrt{ag}.$$

Интегрируя второе уравнение от 0 до координаты x , имеем

$$U = -\frac{dy}{dx} V - \frac{1}{a} \int_0^x V dx.$$

И, учитывая граничные условия $U(0) = U(l) = 0$, получаем амплитуду n -й гармоники горизонтальных колебаний провода

$$U_n(x) = \frac{A_n}{a} \left[(x - \sigma) \sin \frac{2n\pi x}{l} - \frac{l}{2n\pi} \left(1 - \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \right],$$

где σ - координата нижней точки кривой, при отсутствии разницы высот точек подвеса s .

Описание симметричных колебаний в плоскости провиса можно вывести, приняв дополнительно, что $h(t) = \hbar e^{j\omega t}$.

$$H \frac{d^2V}{dx^2} + \frac{q}{g} \omega^2 V = \frac{\hbar}{a},$$

$$\alpha^* \hbar \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = \frac{dU}{dx} + \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx}.$$

Граничные условия учитывают неподвижность точек крепления провода

$$U(0) = U(l) = 0 \text{ и } V(0) = V(l) = 0.$$

Решение первого уравнения необходимо искать в виде

$$V(x) = \frac{\hbar}{H} \frac{1}{a\beta^2} \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} \sin \beta x - \cos \beta x \right),$$

где принято $\beta = \frac{\omega}{\sqrt{ag}}$.

Исключить неизвестную \hbar можно интегрированием второго уравнения по всей длине пролета l

$$\alpha^* \hbar L_e = \int_0^l \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx} dx = \frac{1}{a} \int_0^l V(x) dx = \frac{\hbar}{H} \frac{1}{(\beta a)^2} \left(l - \frac{2}{\beta} \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} \right),$$

где, в качестве L_e , пренебрегая малыми величинами выше второго порядка малости, принимаем

$$L_e = \int_0^l \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = l + \frac{3}{2a^2} \left(l\sigma^2 - l^2\sigma + \frac{l^3}{3} \right) \cong l + \frac{l^3}{8a^2}.$$

Полученное уравнение можно привести к виду

$$\operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} = \frac{\beta l}{2} - \frac{4}{\lambda^2} \left(\frac{\beta l}{2} \right)^3. \quad (4)$$

Здесь в качестве величины λ^2 принято выражение

$$\lambda^2 = \left(\frac{l}{a} \right)^2 \frac{l}{a^* H L_e}.$$

Уравнение (4) сильно нелинейно. Можно особо выделить два предельных случая.

Первый случай, когда $\lambda^2 = \infty$, что будет соответствовать абсолютно нерастяжимой нити. Решением уравнения

$$\operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} = \frac{\beta l}{2}$$

для первых двух гармоник будет

$$(\beta l)_1 = 2,86\pi; (\beta l)_2 = 4,92\pi.$$

Высшие гармоники хорошо описываются уравнением

$$(\beta l)_n = (2n+1)\pi.$$

Второй случай, когда $\lambda^2 = 0$, что будет соответствовать натянутой струне с решением

$$(\beta l)_n = (2n-1)\pi.$$

Промежуточное решение исходного полного уравнения будет, соответственно, лежать в диапазоне

$$(2n-1)\pi < (\beta l)_n < (2n+1)\pi.$$

Амплитуду продольных колебаний можно найти интегрированием второго дифференциального уравнения от нуля до координаты x

$$\begin{aligned} U(x) &= \alpha^* \hbar \int_0^x \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx - \frac{dy}{dx} V(x) - \frac{1}{a} \int_0^x V(x) dx = \\ &= \alpha^* \hbar \left[x + \frac{3}{2a^2} \left(x\sigma^2 + x^2\sigma + \frac{x^3}{3} \right) \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} \left[(\sigma - x)V(x) + \frac{\hbar}{H} \frac{1}{\beta^3 a} \left(\beta x + \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} (\cos \beta x - 1) - \sin \beta x \right) \right]. \end{aligned}$$

Обсуждение результатов и заключение (Discussion of the results and conclusion)

В работе были выведены аналитические выражения зависимости амплитуд и круговых частот свободных колебаний провода от трех главных механических параметров: стрелы провеса, силы тяжения и погонной массы провода. Все выражения учитывают разницу высот точек подвеса провода. Выражения для колебаний в плоскости перпендикулярной плоскости провиса хорошо согласуются с экспериментальными данными. Была доказана возможность применения данных аналитических выражений в целях мониторинга. Показано, что применение высших гармоник в целях мониторинга уменьшает относительную погрешность косвенных измерений механических параметров.

В плоскости, перпендикулярной плоскости провеса, период колебаний первой гармоники (3) отличается от периода свободных гармонических маятниковых колебаний провода (1) менее чем на 1% при отсутствии разницы высот. По полученной модели, провод в полете может совершать любые высокочастотные колебания с гармониками, кратными первой, включая четные гармоники в данной плоскости.

В целях мониторинга определение стрелы провеса по высшим гармоникам представляется более целесообразным, так как снижается относительная погрешность измерения периода колебаний спектральным методом. Второе преимущество заключается в том, что появляется возможность установки датчика возле точки подвеса и дополнительно использовать инклинометрический способ определения стрелы провеса. Оптимальный номер гармоники n можно выбрать, максимизируя выражение:

$$\left| \sin \frac{n\pi x}{l} \right|,$$

где x - координата места установки датчика. Дополнительно, из уравнения (4) при известной стреле провеса можно найти горизонтальную проекцию силы тяжения H . Зная H , можно определить погонный вес провода q , включая случай наличия на проводе ГИО. Возможен также способ определения силы тяжения H по значению амплитуды симметричных колебаний в месте установки датчика $U(x)$ и $V(x)$.

Таким образом, предлагаемый метод дает возможность определения всех основных механических параметров проводов ВЛЭП на основе измерения характеристик высших гармоник.

Литература

1. Zangl H., Bretterklierer T., Brasseur G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Т. 58. №. 5. pp. 1789-1796.
2. Castro P. et al. Study of different mathematical approaches in determining the dynamic rating of overhead power lines and a comparison with real time monitoring data // Applied Thermal Engineering. 2017. Т. 111. pp. 95-102.
3. Lindsey K. E., Spillane P. E., An-Chyun W. Dynamic real time transmission line monitor and method of monitoring a transmission line using the same. Патент США №15725207. 2018.
4. De Paulis F. et al. Detectability of degraded joint discontinuities in HV power lines through TDR-like remote monitoring // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Т. 65. № 12. pp. 2725-2733.
5. Hung K. S. et al. On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2010. pp. 309-314.
6. Aggarwal R.K. et al. An overview of the condition monitoring of overhead lines //Electric Power systems research. 2000. Т. 53. № 1. pp. 15-22.
7. Sun Z., Zhao T., Che C. Design of electric power monitoring system based on ZigBee and GPRS // 2009 international symposium on computer network and multimedia technology. IEEE, 2009. pp. 1-4.
8. Титов Д.Е., Петренко С.А., Сошинов А.Г. Система мониторинга интенсивности гололедообразования "Миг" для воздушных линий электропередачи // Электроэнергетика глазами молодежи. 2015. С. 598-601.
9. Костиков И. Система мониторинга «САР-1»-эффективная защита ВЛЭП от гололеда// Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 1-4. С. 32-35
10. Шилин А. Н., Дементьев С. С. Оптический метод регистрации прогибов линейной опоры для диагностики состояния ЛЭП // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 6. С. 490-497.
11. Кабашов В.Ю. Защита сельских воздушных линий электропередачи 6–10 кВ от низкочастотных колебаний проводов при гололедно-ветровых нагрузках: монография / В.Ю. Кабашов. Уфа: Здравоохранение Башкортостана, 2010. 168 с.
12. Нгуен Ван Ву. Метод определения стрелы провеса провода по периоду его собственных колебаний и усовершенствованная система автоматизированного мониторинга состояния ВЛЭП: дис. ... канд. тех. наук. Казанский государственный энергетический университет, 2021.
13. Сацук Е. И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук. – Новочеркасск, 2011. С.314
14. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A. *et al.* Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. №22. pp. 6479-6482.
15. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок [Текст]: дис. ... докт. техн. наук. МГАУ. Москва. 2011. 353 с.
16. Ланда П.С. Срывной флаттер как один из механизмов возбуждения автоколебаний линий электропередач // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 2. С. 3-15. DOI 10.18500/0869-6632-2009-17-2-3-15.
17. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Galiyeva T.G., Goryachev M.P., Tyurin V.A. Inclimetric method for determining the mechanical state of an overhead power transmission line // E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. 2019. С. 05022.
18. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия. Т.5. Стробоскопические приборы. Яркость. 1998. С.10.
19. Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 3. с. 97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106>
20. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А. и др. Внедрение системы автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «Татнефть» // Нефтяное хозяйство. 2020. №7. С.53-55.

21. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок: дис. ... д-ра тех. наук. Башкирский государственный аграрный университет, 2011.
22. Макаров А. А. Экспериментальное определение затуханий колебания тела в потоке воздуха. // Надежность и долговечность строительных конструкций. Волгоград, 1974. С. 146-149.
23. Горошков Ю.И. Ветроустойчивость контактной сети / Ю. И. Горошков, А. И. Гуков. М.: Транспорт, 1969. 128 с.
24. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
25. Irvine H.M., Caughey T.K. The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable. Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A, 1974. V. 341, pp. 299-315.

Авторы публикации

Ярославский Данил Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», с.н.с. научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики», Казанский государственный энергетический университет.

Reference

1. Zangl H., Bretterkieber T., Brasseur G. *A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009; 58(5):1789-1796.
2. Castro P. *et al. Study of different mathematical approaches in determining the dynamic rating of overhead power lines and a comparison with real time monitoring data*. Applied Thermal Engineering. 2017; 111:95-102.
3. Lindsey K. E., Spillane P. E., An-Chyun W. *Dynamic real time transmission line monitor and method of monitoring a transmission line using the same*: patent 15725207 USA. 2018.
4. De Paulis F. *et al. Detectability of degraded joint discontinuities in HV power lines through TDR-like remote monitoring*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016; 65(12): 2725-2733.
5. Hung K. S. *et al. On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems*. First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2010; 309-314.
6. Aggarwal R. K. *et al. An overview of the condition monitoring of overhead lines //Electric Power systems research*. 2000; 53(1): 15-22.
7. Sun Z., Zhao T., Che C. *Design of electric power monitoring system based on ZigBee and GPRS*. International symposium on computer network and multimedia technology. – IEEE, 2009;32(16):1-4.
8. Titov D. E., Petrenko S. A., Soshinov A. G. *Sistema monitoringa intensivnosti gololedoobrazovaniya "Mig" dlya vozdushnykh linii elektroperedachi*. *Elektroenergetika glazami molodezhi*. 2015;598-601.
9. Kostikov I. *Sistema monitoringa «SAT-1»-effektivnaya zashchita VLEP ot gololeda*. *Elektroenergiya*. Peredacha i raspredelenie. 2011;32-35: 1-4.
10. Shilin A. N., Dement'ev S. S. *Opticheskii metod registratsii progibov lineinoi opory dlya diagnostiki sostoyaniya LEP*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*. 2018; 61(6): 490-497.
11. Kabashov V.Yu. *Zashchita sel'skikh vozdushnykh linii elektroperedachi 6–10 kV ot nizkochastotnykh kolebanii provodov pri gololeдно-vetrovykh nagruzkakh*: monografiya. V.Yu. Kabashov. Ufa: Zdravookhranenie Bashkortostana, 2010;168
12. Nguen Van Vu. *Metod opredeleniya strely provesa provoda po periodu ego sobstvennykh kolebanii i usovershenstvovannaya sistema avtomatizirovannogo monitoringa sostoyaniya VLEP*: дис. ... канд. тех. наук. – Kazanskiy gosudarstvennyi energeticheskii universitet. 2021.
13. Satsuk, E. I. *Programmno-tekhnicheskie sredstva monitoringa vozdushnykh linii elektroperedachi i upravleniya energosistemoi v ekstremal'nykh pogodnykh usloviyakh* [Tekst]: дис. ... д-ра тех. наук. Novocheboksaysk, 2011; 314.

14. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A. et al. *Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; 12(22):6479.

15. Kabashov V. Yu. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh vozdukhnykh linii elektroperedachi 10 (6) kV v usloviyakh vozdeistviya vetrovykh i gololednykh nagruzok* [Tekst]: dis. ...dokt. tekhn. nauk. – MGAU. Moskva. 2011;353

16. Landa, P. S. Sryvnoi flatter kak odin iz mekhanizmov vzbuzhdeniya avtokolebanii linii elektroperedach. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika*. 2009; 17(2):3-15. DOI 10.18500/0869-6632-2009-17-2-3-15.

17. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Galiyeva T.G., Goryachev M.P., Tyurin V.A. Inclimetric method for determining the mechanical state of an overhead power transmission line // *E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019*. 2019. C. 05022.

18. Prokhorov. A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya M.: Sov. entsiklopediya. Stroboskopicheskie pribory - Yarkost'*. 1998;5(10).

19. Yaroslavskii D.A., Nguen V.V., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Naumov A.A. Model' sobstvennykh garmonicheskikh kolebanii provoda dlya zadach monitoringa sostoyaniya vozdukhnykh linii elektroperedachi. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(3):97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106>.

20. Sadykov M.F., Yaroslavskii D.A., Ivanov D.A. i dr. Vnedrenie sistemy avtomatizirovannogo monitoringa gololedoobrazovaniya v raspredelitel'nykh setyakh PAO «Tatneft'». *Neftyanoe khozyaistvo*. 2020;(7):53-55.

21. Kabashov V. Yu. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh vozdukhnykh linii elektroperedachi 10 (6) kV v usloviyakh vozdeistviya vetrovykh i gololednykh nagruzok*: dis. ... d-ra tekhn. nauk. – Bashkirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2011.

22. Makarov A. A. Eksperimental'noe opredelenie zatukhanii kolebaniya tela v potoke vozdukh. A. A. Makarov. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh konstruksii*. Volgograd, 1974; 146-149.

23. Goroshkov Yu. I. *Vetroustoichivost' kontaktnoi seti*. Yu. I. Goroshkov, A. I. Gukov. - M.: Transport, 1969; 128

24. Merkin D.R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti*. – M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1980;240.

25. Irvine H.M., Caughey T.K. *The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable*. Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A, 1974; 341: 299-315

Authors of the publication

Danil A. Yaroslavsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 20.06.2022 г.

Отредактировано 08.07.2022 г.

Принято 12.07.2022 г.