

Сергей И.И., Виноградов А.А., Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н. О моделировании пляски проводов воздушных ЛЭП и параметрическом анализе эффективности маятниковых гасителей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 256-265. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.23

Sergey I.I., Vinogradov A.A., Danilin A.N., Kurdyumov N.N. On modeling of overhead TLC galloping and parametric analysis of pendulum dampers efficiency. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 256-265. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.23



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.23

УДК 534.1:539.3

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП И ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЯТНИКОВЫХ ГАСИТЕЛЕЙ

И.И. Сергей¹, А.А. Виноградов², А.Н. Данилин^{2,3}, Н.Н. Курдюмов^{3,2}

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Белоруссия

²Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 июля 2018 г.
Принята: 09 сентября 2018 г.
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

пляска проводов воздушных ЛЭП, маятниковые гасители, моделирование, конечно-разностная дискретизация, оптимизация расстановки.

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты численного моделирования пляски (галопирования) проводов воздушных ЛЭП с маятниковыми гасителями с целью анализа эффективности их применения.

Исследования показывают, что при пляске наряду с выраженными вертикальными движениями проводов имеют место синхронизированные с ними крутильные колебания. Закручивание провода приводит к дополнительному увеличению подъемных аэродинамических сил и, как следствие, амплитуд колебаний по сравнению с «чистым» вертикальным движением проводов. Поэтому управление крутильными колебаниями является одним из эффективных способов защиты проводов ЛЭП от низкочастотных колебаний. Для этого используются маятниковые гасители различных конструктивных схем.

Провода рассматриваются как абсолютно гибкие нити, обладающие упругостью на растяжение и кручение. Тяжение в пределах пролёта считается постоянным. Принимается, что точки оси провода совершают движение только в плоскости, перпендикулярной продольной оси. Записываются уравнения динамики в частных производных, описывающих поступательные и крутильные колебания провода. Для учёта гасителей провод разбивается на участки, между которыми помещаются гасители. Записываются уравнения движения сосредоточенных масс гасителей под действием приложенных от проводов силовых факторов. Процедура численного интегрирования строится на основе конечно-разностного аналога полученных уравнений колебаний.

В результате численных экспериментов для одиночных проводов обоснована схема совместной установки вертикальных и горизонтальных маятников и их параметры, при которых успешно гасятся низкочастотные колебания проводов наиболее опасных форм пляски. Определены первоначальные углы установки горизонтальных маятников, наиболее эффективных для расстройки крутильных и поперечных колебаний.

© ПНИПУ

© Сергей Иосиф Иосифович – д.т.н., проф., зав. каф., e-mail: ef@bntu.by, [ID 0000-0001-6218-0471](https://orcid.org/0000-0001-6218-0471)

Виноградов Александр Абрамович – к.т.н., вед. н. с., e-mail: alex.vin35@gmail.com, [ID 0000-0001-8916-0374](https://orcid.org/0000-0001-8916-0374)

Данилин Александр Николаевич – д.ф.-м.н., проф., зав. каф., e-mail: andanilin@yandex.ru, [ID 0000-0001-7349-0600](https://orcid.org/0000-0001-7349-0600)

Курдюмов Николай Николаевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: nick.n.kurdyumov@gmail.com, [ID 0000-0002-6664-826X](https://orcid.org/0000-0002-6664-826X)

Iosif I. Sergey – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department,

e-mail: ef@bntu.by, [ID 0000-0001-6218-0471](https://orcid.org/0000-0001-6218-0471)

Alexander A. Vinogradov – CSc in Technical Sciences, Leading Researcher,

e-mail: alex.vin35@gmail.com, [ID 0000-0001-8916-0374](https://orcid.org/0000-0001-8916-0374)

Alexander N. Danilin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department,

e-mail: andanilin@yandex.ru, [ID 0000-0001-7349-0600](https://orcid.org/0000-0001-7349-0600)

Nickolay N. Kurdyumov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

e-mail: nick.n.kurdyumov@gmail.com, [ID 0000-0002-6664-826X](https://orcid.org/0000-0002-6664-826X)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ON MODELING OF OVERHEAD TLC GALLOPING AND PARAMETRIC ANALYSIS OF PENDULUM DAMPERS EFFICIENCY

I.I. Sergey¹, A.A. Vinogradov², A.N. Danilin^{2,3}, N.N. Kurdyumov^{3,2}

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 July 2018
Accepted: 09 September 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

galloping of overhead transmission lines conductors, pendulum dampers, modeling, finite-difference discretization, optimization of arrangement.

ABSTRACT

The paper presents the results of a numerical simulation of the galloping of overhead transmission lines conductors (TLC) with pendulum dampers in order to analyze the efficiency of their application.

Studies show that during galloping, along with the pronounced vertical movements of the conductors, there are synchronized torsional vibrations associated with them. Twisting of the conductors leads to an additional increase in the lifting aerodynamic forces and, as a result, the amplitudes of the vibrations in comparison with the "clean" vertical movement of the conductors. Therefore, the control of torsional vibrations is one of the effective ways to protect the transmission lines conductors from low-frequency oscillations. For this purpose, pendulum dampers of various structural schemes are used.

Wires are considered as absolutely flexible threads, which have elasticity for tension and torsion. The tension within the span is considered constant. It is assumed that the points of the conductor axis move only in a plane that is perpendicular to the longitudinal axis. The equations of dynamics in partial derivatives describing translational and torsional vibrations of a wire are written. To account for the dampers, the conductor is divided into sections between which the dampers are placed. The equations of dampers motion under the action of the conductors are written. The numerical integration procedure is based on the finite-difference analogue of the obtained oscillation equations.

As a result of the numerical experiments for single conductors, the scheme is justified for the joint installation of vertical and horizontal pendulums and their parameters, under which low-frequency oscillations of conductors of the most dangerous forms of galloping are successfully damped. The initial installation angles are determined for horizontal pendulums which are most effective for detuning torsional and transverse oscillations.

© PNRPU

Введение

Пляска проводов воздушных ЛЭП представляет собой самовозбуждающийся колебательный процесс с аэродинамической обратной связью, обусловленной изменением действующей на провод с гололедом подъемной силы при изменении угла атаки. Пляска относится к низкочастотным видам колебаний (0,15–1,0 Гц) и характеризуется значительными амплитудами [1, 2]. Наиболее опасной, как правило, является однополуволновая пляска, при которой амплитуды вертикальных колебаний проводов и соответствующие вариации величины тяжения (т. е. силы натяжения проводов) максимальны [3]. Пляска проводов с двумя, тремя и четырьмя полуволнами [4, 5] приводит к меньшим амплитудам колебаний и встречается реже.

Многочисленные наблюдения и экспериментальные исследования показывают, что при пляске наряду с выраженными вертикальными движениями проводов имеют место синхронизированные с ними крутильные колебания. Закручивание сечения провода может привести к дополнительному увеличению подъемных аэродинамических сил и, как следствие, амплитуд пляски по сравнению с «чистым» вертикальным движением проводов по Ден-

Гартгоу [1]. Сближение крутильной частоты с величиной частоты вертикальных колебаний происходит за счет совместного влияния аэродинамического момента, подъемной силы и массы гололеда, откладывающегося на проводе. При отсутствии гололеда частота вертикальных колебаний провода намного ниже его крутильной частоты для воздушных ЛЭП с одиночными проводами, эта разница составляет для наиболее массовых типов проводов и длин пролетов 5–7 крат. Но при образовании гололедного осадка и дальнейшем его росте частота крутильных колебаний падает очень значительно (она приблизительно пропорциональна второй степени диаметра обледеневшего провода) и может стать близкой к частоте вертикальных колебаний, которая изменяется намного медленнее (приблизительно в пропорции первой степени диаметра обледеневшего провода). Это основные параметры, влияющие на сближение частот крутильных и поперечных колебаний. Вклад аэродинамических сил незначителен, на уровне единиц или десятков процентов.

В связи с этим управление крутильными колебаниями провода является одним из важнейших способов борьбы с пляской проводов воздушных ЛЭП. Сложность создания гасителей пляски заключается в том, что из-за многообразия условий ее возникновения трудно выбрать наиболее

эффективный метод борьбы. Опыты, проведенные авторами на ветровом полигоне КазНИИЭ (2007, INTAS Project ID: 03-51-3736), показали несколько реальных положений гололеда на проводе, вызывающих пляску. А формы профиля могут быть разными, и это чрезвычайно усложняет задачу. Другими словами, пляска есть следствие сочетания ряда факторов: особенностей образования на проводе гололеда, конструктивных параметров линии, а также направления и силы ветра. Выпадение гололеда на проводах ВЛ создает потенциально опасность пляски, а будет она реализована или нет, зависит от стечения обстоятельств. Поэтому есть линии, которые очень подвержены пляске, а на других ВЛ она возникает лишь изредка.

Наибольшее практическое применение получили гасители в виде вертикально монтируемых расстраивающих маятников Хаварда (рис. 1, а) и в виде эксцентриковых грузов, монтируемых с подкруткой провода (рис. 1, б, в, г). Оба типа обеспечивают рассогласование частот и фаз крутильных и вертикальных колебаний проводов с помощью инерциальных маятников. В России получили распространение комбинированные схемы установки маятников, расположенных вертикально и горизонтально.

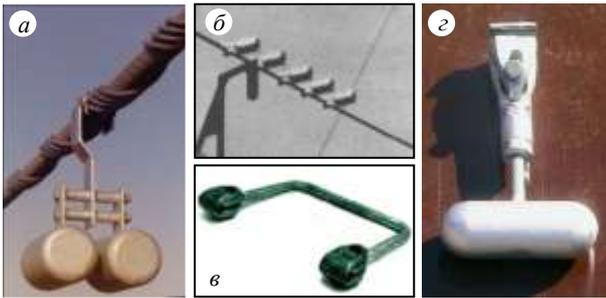


Рис. 1. Гасители пляски: а – расстраивающий маятник Хаварда (Канада) [3]; б – эксцентричные грузы (США) [1]; в – гасители пляски проводов ГПП (Россия) [8]; г – гаситель пляски проводов ГП (Россия) [7, 8]

Fig. 1. Dance absorbers: a – Havard’s detuning pendulum (Canada) [3]; b – eccentric loads (USA) [1]; c – conductor galloping, GPP type (Russia) [8]; d – conductor galloping, GP type (Russia) [7, 8]

Несмотря на выполненный комплекс исследований и положительный опыт применения различных типов гасителей, по сведениям СИГРЭ [1], отсутствует универсальный метод для предотвращения пляски проводов. Поэтому в этой области требуются как практические работы [5, 6, 9–14], так и теоретические [15–35] по оценке эффективности устройств подавления пляски проводов воздушных ЛЭП с различными техническими параметрами.

При проектировании защиты проводов воздушных ЛЭП от пляски, необходимо выбрать оптимальные геометрические размеры и массу маятников, а также схемы их расстановки в пролете. Проведенные в России исследования показали, что наиболее целесообразна совместная установка горизонтальных и вертикальных маятников в пролете ЛЭП [9].

1. Уравнения колебаний провода с гололёдом

При анализе пляски проводов их изгибной жесткостью пренебрегают, так как длина полуволны составляет как минимум несколько десятков метров. Поэтому в качестве расчетной модели провода может быть принята абсолютно гибкая нить, обладающая упругостью на растяжение и кручение. Для проводов ЛЭП, имеющих относительную стрелу провеса менее 5 %, изменением тяжения вдоль пролета можно пренебречь [32]. Также для упрощения задачи можно принять, что точки оси провода совершают движение только в плоскости, перпендикулярной продольной оси Ox .

Математическое описание движения проводов при пляске основано на системе дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих поступательные и крутильные колебания провода [32–34]. С учётом указанных допущений уравнения колебаний провода могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 & m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - m \left[h \sin \theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + h \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \\
 & \quad + \delta \frac{\partial y}{\partial t} = mg + N \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} + Y, \\
 & m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + m \left[h \cos \theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - h \sin \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \\
 & \quad + \delta \frac{\partial z}{\partial t} = N \frac{\partial^2 z}{\partial s^2} + Z, \\
 & (I + mh^2) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + mh \left(\cos \theta \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - \sin \theta \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) + \\
 & \quad + f \frac{\partial \theta}{\partial t} = mg h \cos \theta + GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} + M.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь y, z – проекции радиуса-вектора положения точки оси жесткости провода, натянутого вдоль продольной оси x ; θ – угол кручения провода; δ – коэффициент демпфирования поперечных колебаний; m – масса единицы длины растянутого провода; h – расстояние между центрами массы и жесткости сечения провода с гололёдом (эксцентриситет); g – ускорение свободного падения; N – тяжение провода; I – момент инерции кручения провода с гололёдом; f – коэффициент демпфирования крутильных колебаний; GJ – крутильная жесткость провода; Y, Z – проекции погонной аэродинамической силы на координатные оси Oy и Oz ; M – погонный аэродинамический момент.

В отсутствие ветра коэффициент демпфирования $\delta = 0,02 \dots 0,04$. По мере роста скорости ветра W его значение быстро растёт: при $W = 5 \dots 6$ м/с коэффициент $\delta = 0,06 \dots 0,08$.

Коэффициент демпфирования крутильных колебаний примерно равен коэффициенту демпфирования поперечных колебаний при отсутствии ветра, т.е. $f = 0,02 - 0,04$.

Если L° – начальная (монтажная) длина провода, L – расстояние между точками его подвеса, a – коэффициент температурного удлинения, ΔT – приращение температуры, то начальное удлинение провода $\Delta^\circ = (1 + a\Delta T)L^\circ - L$. Тогда тяжение $N = EF(\varepsilon - \Delta^\circ/L)$, где EF – жесткость провода на растяжение, а ε – его продольная деформация.

2. Аэродинамическая нагрузка

Как видно из рис. 2, угол атаки провода с гололёдом $\alpha = \theta + \tilde{\alpha}$, где θ – угол поворота сечения провода вокруг продольной оси Ox , $\tilde{\alpha}$ – угол сноса потока, вызванный движением провода под действием аэродинамической нагрузки. Очевидно, что

$$\tilde{\alpha} = \arctg \frac{\dot{z}}{W - \dot{y}} \approx \arctg \frac{\dot{z}}{W},$$

где W – скорость ветра; $V = \sqrt{(W - \dot{y})^2 + \dot{z}^2}$ – величина скорости воздушного потока, набегающего на движущийся провод; \dot{y} , \dot{z} – компоненты скорости движения провода с гололёдом.

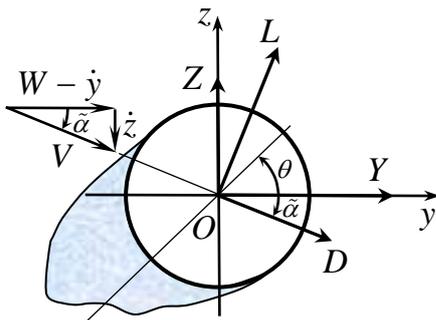


Рис. 2. Аэродинамические силы, действующие на провод с гололёдом
Fig. 2. Aerodynamic forces acting on the wire with ice

Компоненты аэродинамической силы Y , Z связаны с подъемной силой L и силой лобового сопротивления D формулами

$$Y = L \sin \tilde{\alpha} + D \cos \tilde{\alpha}, \quad Z = L \cos \tilde{\alpha} - D \sin \tilde{\alpha},$$

где $L = 0,5\rho V^2 d C_L$, $D = 0,5\rho V^2 d C_D$. Здесь ρ – плотность воздуха; V – скорость набегающего потока; d – диаметр провода; $C_L = C_L(\alpha)$, $C_D = C_D(\alpha)$ – аэродинамические коэффициенты подъемной силы и силы лобового сопротивления.

Аэродинамический момент $M = 0,5\rho V^2 d^2 C_M(\alpha)$.

Зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки строятся по результатам экспериментальных исследований. На рис. 3 показан пример таких зависимостей [1, 16, 27, 31].

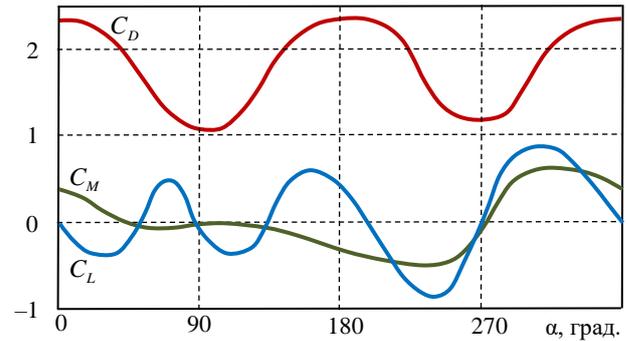


Рис. 3. Зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки профиля провода ACSR – 95 мм² с гололёдом
Fig. 3. Dependences of the aerodynamic coefficients on the angle of attack of the ACSR wire profile – 95 mm² with icing

3. Уравнения движения гасителей пляски

При наличии гасителей провод разбивается на участки, между которыми помещаются гасители. Записываются уравнения движения сосредоточенных масс гасителей под действием приложенных от проводов силовых факторов при заданных координатах краевых точек [32–34].

В качестве примера на рис. 4 показана обобщенная расчётная схема гасителя, учитывающая возможное применение гасителей пляски для двух и более проводов воздушной ЛЭП (защита расщепленных проводов линий сверхвысокого напряжения или одновременная защита более чем одной фазы), цифрами 1 и 2 обозначены провода двухфазной линии.

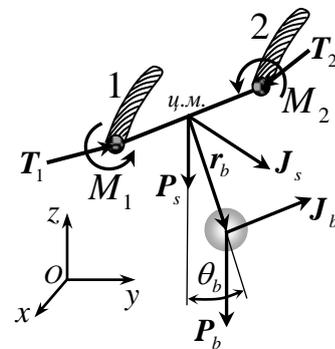


Рис. 4. Расчётная схема гасителя пляски маятникового типа
Fig. 4. The design scheme of the pendulum galloping damper

Составляются уравнения движения центра масс (ц.м.) гасителя и вращения вокруг него в плоскости Oyz :

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_b &= \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \mathbf{P}_s + \mathbf{P}_b, \\ I_s \frac{d^2\theta_b}{dt^2} + r_{by} J_{bz} + r_{bz} J_{by} &= M_1 + M_2 - P_b r_{by}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь векторные величины: \mathbf{J}_s – сила инерции силовой рамы гасителя, приложенная в центре его массы; \mathbf{J}_b – сила инерции груза, приложенная на расстоянии r_b от

точки его крепления на раме; P_s, P_b – силы веса рамы гасителя и груза соответственно; T_1, T_2, M_1, M_2 – силы и моменты, приложенные к раме гасителя от воздействия проводов; r_{by}, r_{bz} – компоненты радиуса-вектора r_b ; I_s – момент инерции рамы относительно центра массы.

4. Вычислительный алгоритм

Начальное (статическое) положение проводов определялось из уравнений их равновесного положения, которые следуют из уравнений движения исключением производных по времени.

Для определения положения маятников после их монтажа на проводах в пролёте ЛЭП использовались уравнения движения проводов под действием только динамических нагрузок, возникающих в момент освобождения гасителей от связей монтажного положения. При этом возникают затухающие крутильные и поперечные колебания, в результате которых устанавливается положение проводов, близкое к равновесному, с учетом первоначального расположения горизонтальных и вертикальных маятников, задаваемого при монтаже.

Затем с помощью ветрового воздействия возбуждается пляска проводов и изучается влияние маятников на ее ограничение.

Для численного интегрирования система уравнений колебаний участков проводов между гасителями (1) и уравнения колебаний гасителей (2) заменялась системой конечно-разностных уравнений. Для обеспечения устойчивости вычислительного процесса шаги интегрирования по времени τ и по длине провода h согласовывались с использованием условия Куранта [35] в виде

$$\sqrt{\frac{EA}{m}} \frac{\tau}{h} < 1,$$

где A – площадь поперечного сечения провода; E – модуль упругости; m – погонная масса.

5. Анализ эффективности защиты проводов лэп от пляски с помощью маятниковых гасителей

Описанная выше математическая модель использовалась для моделирования пляски как одиночных проводов, так и проводов расщепленной фазы с гасителями маятникового типа. В качестве примера ниже представлены результаты моделирования колебаний одиночных проводов воздушной ЛЭП с пролетами 100–240 м и проводами сечением 95–150 мм². Расчёты проводились для двух схем расстановки маятниковых гасителей, показанных на рис. 5.

В первой расчетной схеме (I) (см. рис. 5) в пролете были установлены: один вертикальный маятник на расстоянии (2/3) от длины пролета, и группами по два разнонаправленных горизонтальных – по обе стороны от вертикального на расстояниях λ_1 и λ_2 , как показано на

схеме. Во второй схеме (II) (см. рис. 5) в отличие от схемы (I) в группах были применены однонаправленные горизонтальные маятники, как показано на рисунке. Оценивалось влияние углов первоначальной установки гасителей и параметров λ_1 и λ_2 на ограничение и гашение пляски проводов.

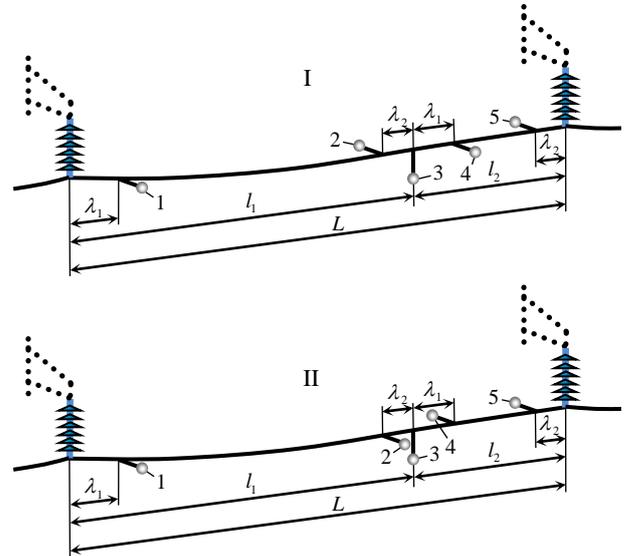


Рис. 5. Схемы расстановки маятниковых гасителей в пролёте ЛЭПа

Fig. 5. Layout schemes of pendulum absorbers in the span of a power line

Некоторые результаты расчетов представлены в таблице и на рис. 6–8. В таблице L – длина пролёта; f_0 и T_0 – стрела провеса и тяжение провода в статическом состоянии; θ_0 – первоначальный угол установки маятников (в момент монтажа); l_h, l_v – длины горизонтальных и вертикальных маятников соответственно, а P_h, P_v – их веса; GJ – крутильная жесткость провода; расположение маятников по схеме I.

Расчёты показали, что для схемы с одним вертикальным и четырьмя горизонтальными маятниками в пролете воздушной ЛЭП обеспечивается гашение наиболее опасных низкочастотных колебаний с числом полувольт от 1 до 4.

Из рис. 5 видно, что полное затухание колебаний для схемы с разнонаправленными маятниками происходит только при $\theta_0 = 95^\circ$, в то время как в другой схеме затухание наступает уже при $\theta_0 = 30^\circ$. Причина этого заключается в значительном снижении максимальных углов крутильных колебаний проводов (на 30% и более) в схеме с однонаправленными маятниками, что сопровождается резким уменьшением амплитуд вертикальных перемещений. В связи с этим необходимы конструктивные проработки схемы с однонаправленными маятниками и ее дальнейшее исследование.

На рис. 7 даны примеры осциллограмм колебаний, полученных расчётным путём для средней точки пролёта. Траектория движения этой точки показана на рис. 8.

Результаты расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП с пятью маятниками
при скорости ветра 12 м/с

The calculation results of single wire galloping of overhead transmission lines with five pendulums
at wind speeds of 12 m/s

Расстояния $\lambda_{1,2}$, м	φ_0 / углы положения осей маятников после монтажа, град.	Характер процесса
Провод АС-95/16, $GJ = 16 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{рад}$; $L = 100 \text{ м}$, $f_0 = 1,5 \text{ м}$, $T_0 = 3200 \text{ Н}$; $\theta_0 = 90^\circ$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$		
$P_h = 1,0 \text{ кг}$, $P_v = 2,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 15$, $\lambda_2 = 8$	+54; -54; -1; +68; -69	гашение
$P_h = 0,5 \text{ кг}$, $P_v = 1 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 15$, $\lambda_2 = 8$	+68; -69; -0,5; +78; -80	пляска
$P_h = 1,5 \text{ кг}$, $P_v = 3 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 15$, $\lambda_2 = 8$	+45; -45; -1; +60; -61	гашение
Провод АС-120/19, $GJ = 24 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{рад}$; $L = 160 \text{ м}$, $f_0 = 2 \text{ м}$, $T_0 = 8000 \text{ Н}$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$; $P_h = 1,5 \text{ кг}$, $P_v = 3,0 \text{ кг}$		
$\theta_0 = 135^\circ$		
$\lambda_1 = 12$, $\lambda_2 = 6$	+101; -105; -1,5; +118; -124	гашение
$\lambda_1 = 15$, $\lambda_2 = 8$	+94; -103; -1,5; +113; -120	гашение
$\lambda_1 = 24$, $\lambda_2 = 12$	+43; -44; -0,5; +67; -69	гашение
$\theta_0 = 50^\circ$		
$\lambda_1 = 18$, $\lambda_2 = 9$	+38; -40; -1; +46; -48	пляска
$\theta_0 = 70^\circ$		
$\lambda_1 = 18$, $\lambda_2 = 9$	+41; -43; -1,5; +52; -53	гашение
$\theta_0 = 50^\circ$		
$\lambda_1 = 24$, $\lambda_2 = 12$	+27; -28; -0,5; +34; -37	пляска
$\theta_0 = 60^\circ$		
$\lambda_1 = 24$, $\lambda_2 = 12$	+32,5; -35; -0,5; +43; -44	гашение
$\theta_0 = 55^\circ$		
$\lambda_1 = 27$, $\lambda_2 = 14$	+29; -32; 0; +39; -39	пляска
$\theta_0 = 60^\circ$		
$\lambda_1 = 27$, $\lambda_2 = 14$	+29; -32; 0; +39; -39	гашение
Провод АС-120/19, $GJ = 24 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{рад}$; $L = 240 \text{ м}$, $f_0 = 3,5 \text{ м}$, $T_0 = 12000 \text{ Н}$		
$\theta_0 = 60^\circ$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$; $P_h = 1,0 \text{ кг}$, $P_v = 2,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+30; -35; -3,5; +22; -45	пляска
$\theta_0 = 60^\circ$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$; $P_h = 0,5 \text{ кг}$, $P_v = 1,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+39; -47; -3,5; +46; -52	пляска
$\theta_0 = 60^\circ$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$; $P_h = 1,5 \text{ кг}$, $P_v = 3,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+19; -30; -3; +34; -40	гашение
$\theta_0 = 60^\circ$; $l_h = 0,25 \text{ м}$, $l_v = 0,5 \text{ м}$; $P_h = 0,5 \text{ кг}$, $P_v = 1,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+33; -38; -3,5; +41; -48	пляска
$\theta_0 = 135^\circ$; $l_h = 0,25 \text{ м}$, $l_v = 0,5 \text{ м}$; $P_h = 1,0 \text{ кг}$, $P_v = 2,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+58; -67; -4,5; -85; -102	гашение
$\theta_0 = 135^\circ$; $l_h = 0,15 \text{ м}$, $l_v = 0,3 \text{ м}$; $P_h = 1,0 \text{ кг}$, $P_v = 2,0 \text{ кг}$		
$\lambda_1 = 20$, $\lambda_2 = 10$	+80; -92; -3,5; +100; -117	гашение

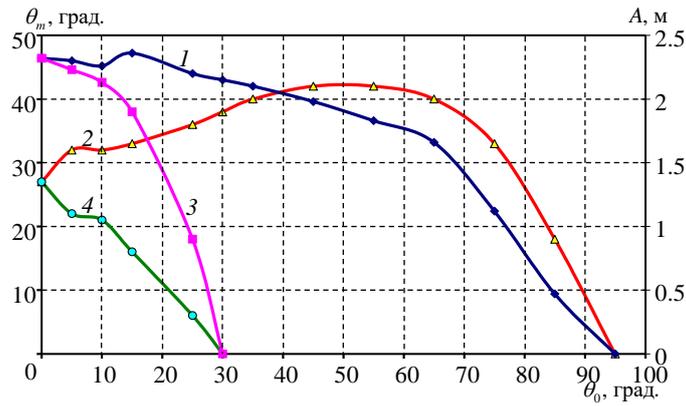


Рис. 6. Зависимости максимальных углов закручивания (θ_m) провода и «пик-пик» амплитуд (A_{m-m}) колебаний от угла установки горизонтальных маятников при $\lambda_1 = 12\text{ м}$, $\lambda_2 = 6\text{ м}$: 1 – $A_{m-m}(\theta_0)$; 2 – $\theta_m(\theta_0)$ для случая разнонаправленных маятников; 3 – $A_{m-m}(\theta_0)$, 4 – $\theta_m(\theta_0)$ для случая однонаправленных маятников
 Fig. 6. Dependencies of maximum twist angles (θ_m) of the wire and peak-to-peak amplitudes (A_{m-m}) of oscillations on the angle of installation of horizontal pendulums at $\lambda_1 = 12\text{ m}$, $\lambda_2 = 6\text{ m}$: 1 – $A_{m-m}(\theta_0)$; 2 – $\theta_m(\theta_0)$ is for the case of multidirectional pendulums; 3 – $A_{m-m}(\theta_0)$; 4 – $\theta_m(\theta_0)$ is for the case of unidirectional pendulums

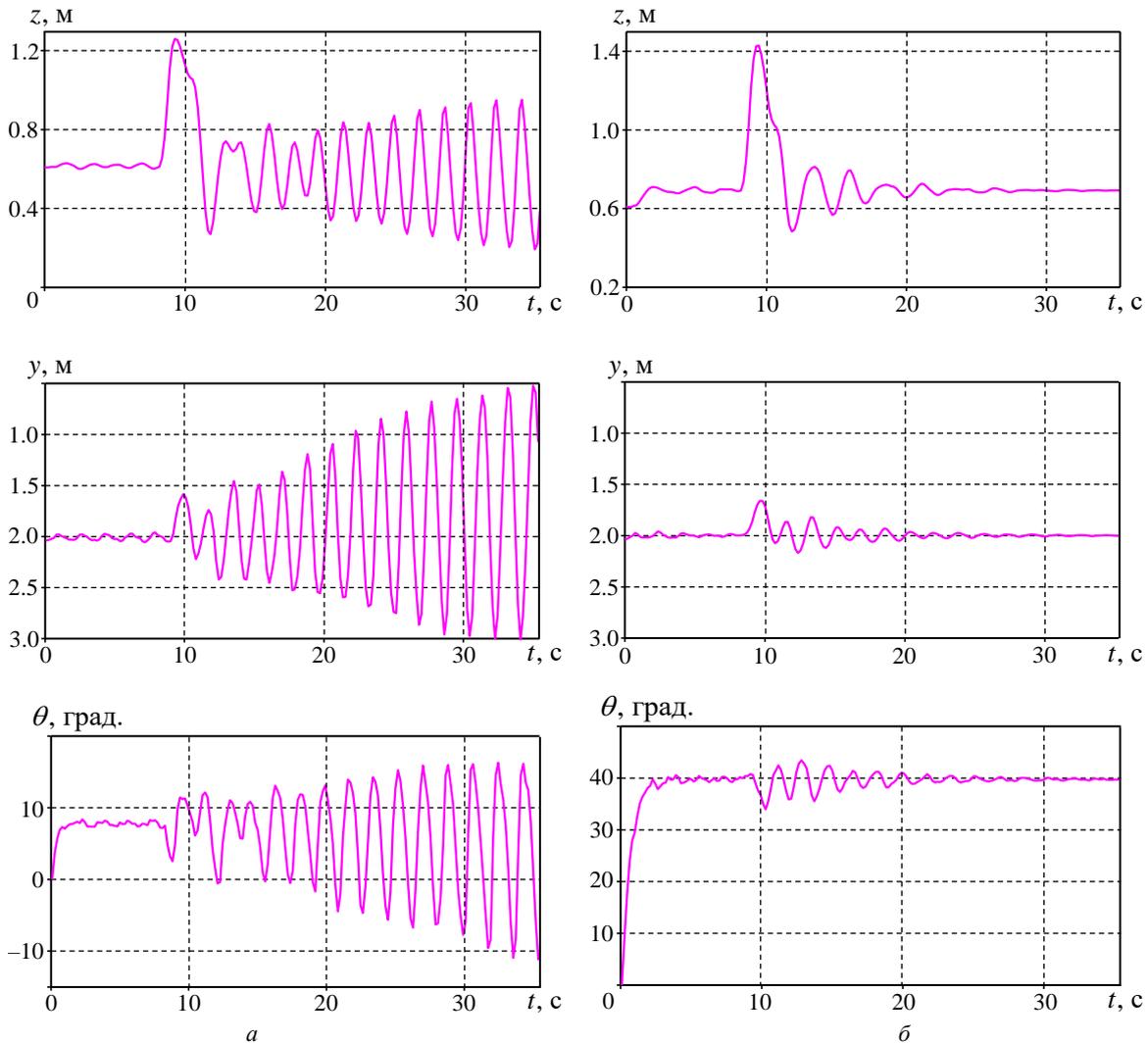


Рис. 7. Характерные осциллограммы вертикальных, горизонтальных и крутильных колебаний проводов в средней точке пролета длиной 160 м при установке однонаправленных горизонтальных маятников по схеме II: а – развитие пляски; б – гашение пляски
 Fig. 7. Characteristic oscillograms of vertical, horizontal and torsional vibrations of wires at the midpoint of a span of 160 m in length when installing unidirectional horizontal pendulums according to scheme II: a – galloping development; b – galloping damping

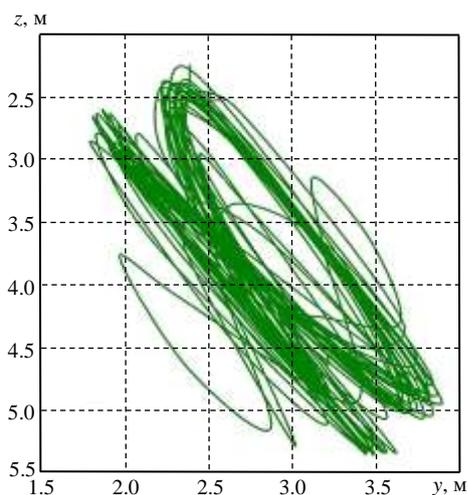


Рис. 8. Характерная траектория движения точки оси провода в середине пролета
Fig. 8. The characteristic trajectory of the point of the wire axis in the middle of the span

Заключение

В результате численного эксперимента для наиболее распространенных длин пролетов и марок проводов воздушных ЛЭП с одиночными проводами определены первоначальные углы установки горизонтальных маятников, при которых после монтажа они занимают положение, близкое к горизонтальному, наиболее эффективному для расстройки крутильных колебаний проводов.

Библиографический список

1. CIGRÉ Technical Brochure 322. State of the art of conductor galloping, by Task Force B2.11.16, Sept. 2003. – URL: http://gallopingsolutions.com/wp-content/uploads/2016/11/WGB21106_brochure_061106.pdf (accessed 30 June 2018).
2. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Рабинский Л.Н. Деформирование многослойных проволочных конструкций спирального типа. Математическое моделирование, примеры использования. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 168 с.
3. Havard D.G. Detuning for controlling galloping of single conductor transmission lines // IEEE Symposium on Mechanical Oscillations of Overhead Transmission Lines. Paper A 79 500-0. – Vancouver, Canada, July 1979.
4. Havard D.G. Dynamic loads on transmission line structures during galloping // International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. – Brno, Czech Republic, 2002.
5. Havard D.G. Dynamic loads on transmission line structures during galloping – field data and elastic analysis // Proceedings of 5th International Symposium on Cable dynamics. – Santa Margherita, Italy, Sep. 15–18, 2003. – P. 93–100.
6. Havard D.G., Amm D.E. A review of Ontario Hydro experience with conductor vibration and galloping problems – existing and future solutions // CEA Workshop on the Control of Transmission Line Vibration. – Montreal, March 19, 1980.
7. ТУ 3449-006-00113483-2002. Гасители пляски типа ГПР. ИЦ ОРГЭС [Электронный ресурс]. – URL: <http://orgres-es.ru/products/gasiteli-plyaski-gpr-i-gvp/> (дата обращения: 30.06.2018).

Найдены предельные углы откручивания горизонтальных маятников после монтажа, при которых они обеспечивают гашение пляски проводов. Обоснована схема совместной установки вертикальных и горизонтальных маятников и их параметры, при которых успешно гасятся низкочастотные колебания проводов наиболее опасных форм пляски.

Для уточненных расчетов точек установки гасителей и их параметров необходимы экспериментальные данные по крутильной жесткости проводов и их аэродинамических характеристик для районов прохождений трассы воздушной ЛЭП.

Благодарность

Работа выполнена в ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук» (г. Москва) при финансовой поддержке ФЦП Министерства образования и науки (Соглашение № 14.604.21.0188, ID RFMEFI60417X0188).

Acknowledgements

This work was carried out at Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (Moscow) with the financial support from the Federal Targeted Program of the Ministry of Education and Science (Agreement No. 14.604.21.0188, ID RFMEFI60417X0188).

8. Сайт ООО «ЭнергоКомплект». – URL: <https://www.ekomplekt.ru/products/lineinaya-armatyra/gasiteli-plyaski-i-mayatniki.html> (дата обращения: 30.06.2018).
9. Пустыльников Л.Д., Шкапцов В.А. Метод гашения пляски проводов // Изв. Акад. наук. Энергетика. – 1992. – № 6. – С. 74–81.
10. Zhongguo Dian, Li KeXue, Yan Jiu Yuan. UHV transmission technology. – London, United Kingdom: Academic Press – Elsevier, 2018. – 759 p. – URL: http://www.worldcat.org/title/uhv-transmission-technology/oclc/962895587&referer=brief_results (accessed 30 June 2018).
11. Vinogradov A.A., Sergey I.I., Lilien J.-L. Highly efficient anti-galloping device TDD for transmission lines with bundled conductors – development, tests, design versions // Int. Conference Energy of Moldova – 2012. Regional aspects of development. – Chisinau, Republic of Moldova. October 4–6, 2012. – P. 223–228.
12. Lilien J.L., Havard D.G. Galloping database on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes // IEEE Transactions Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – Iss. 2. – P. 670–674. DOI: 10.1109/61.853003
13. The simulation method of galloping of overhead transmission line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. // Joint Meeting of UNIPED, CORECH-Galloping, Kyoto, Japan. 1983.
14. Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines / X.B. Meng, L.M. Wang, L. Hou, G.J. Fu, B.Q. Sun, M. MacAlpine, W. Hu, Y. Chen // Cold Regions Sci-

ence and Technology. – 2011. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 44–52. DOI.org/10.1016/j.coldregions.2011.01.005

15. Roshan Fekr M., McClure G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines // Atmospheric Research. – 1998. – Vol. 46. – Iss. 1–2. – P. 1–11.

16. Gurung C.B., Yamaguchi H., Yukino T. Identification of large amplitude wind-induced vibration of ice-accreted transmission lines based on field observed data // Engineering Structures. – 2002. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 170–188. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.485.4544&rep=rep1&type=pdf> (accessed: 30 June 2018).

17. Shehata A.Y., Damatty A.A.E., Savory E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading // Finite Elements in Analysis and Design. – 2005. – Vol. 42. – Iss. 1. – P. 71–89. DOI.org/10.1016/j.finel.2005.05.005

18. Asynchronous swaying character and prevention measures in the compact overhead transmission line / K.J. Zhu, X.M. Li, Y.X. Di, B. Liu // High Voltage Engineering. – 2010. – Vol. 36. – Iss. 11. – P. 2717–2723.

19. Hughes D.T. The dynamic loading of overhead conductors on 11kV lines // International Conference on Design and Construction. Theory and Practice. – London, 1988. – P. 178–181.

20. Yang F.L., Yang J.B., Zhang Z.F. Unbalanced tension analysis for UHV transmission towers in heavy icing areas // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – Vol. 70. – P. 132–140. doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.07.008

21. Wang S.H., Jiang X.L., Sun C.X. Characteristics of icing conductor galloping and induced dynamic tensile force of the conductor // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2010. – Vol. 25. – Iss. 1. – P. 159–166. – URL: <https://www.jvejournal.com/article/15065> (accessed: 30 June 2018).

22. Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors / M. Baenziger, W. James, B. Wouters, L. Li // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 40–49.

23. Naif B. Almutairi, Zribi M., Abdel-Rohman M. Lyapunov-Based control for suppression of wind-induced galloping in suspension bridges // Mathematical Problems in Engineering. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–23. DOI.org/10.1155/2011/310938.

24. Barbieri R., Barbieri N., Junior O.H.S. Dynamical analysis of transmission line cables. Part 3-Nonlinear theory // Mechanical System and Signal Processing. – 2008. – Vol. 22. – P. 992–1007. DOI.org/10.1016/j.ymsp.2007.10.002

25. McClure C., Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines // Computers and

Structures. – 2003. – Vol. 81. – P. 825–834. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00472-8

26. Nonlinear aeroelastic vibrations and galloping of iced conductor lines under wind / A.N. Danilin, F.N. Shklyarchuk, J.-L.Lilien, D.V. Snegovskiy, A.A. Vinogradov, M.A. Djamanbayev // 7th International Symposium on Cable Dynamics. Vienna (Austria), 10–13 December 2007. – P. 129–134.

27. Keutgen R. Galloping phenomena. A finite element approach. Ph.D. Thesis. Collection des publications de la Faculté des Sciences. – Liège: Appliquées de l'Université de Liège, 1999. – No. 191. – 202 p.

28. Rawlins C.B. Numerical studies of the galloping stability of single conductors. Technical Paper No. 30. – Spartanburg: Alcoa Conductor Products Company, Spartanburg, Sc. June. 1993.

29. Shalashilin V.I., Danilin A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Model of overhead line conductor with interaction of layers // Proceedings of Sixth International Symposium on Cable Dynamics. Charleston, South Carolina (U.S.A.). Sept 19–22, 2005. – P. 371–377.

30. Виноградов А.А., Данилин А.Н. Применение МКЭ для анализа статических и динамических режимов многопролётных участков воздушных ЛЭП // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 465–478.

31. Данилин А.Н., Шклярчук Ф.Н. Аэроупругие колебания проводов воздушных ЛЭП: Формулировка задачи, нелинейные уравнения движения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 328–337.

32. Сергей И.И., Климович П.И. Вычислительный эксперимент для различных видов динамики проводов электроустановок энергосистем // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. – 2004. – № 6. – С. 12–19. DOI.org/10.21122/1029-7448-2004-0-6-12-19.

33. Сергей И.И., Климович П.И., Цветков Ю.Л. Численный метод расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП, оснащенных механическими гасителями колебаний // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. – 2002. – № 5. – С. 3–10.

34. Сергей И.И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП // Энергетика. Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. – 1999. – № 6. – С. 21–32.

35. Сергей И.И., Стрелюк М.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях. Теория и вычислительный эксперимент. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

References

1. CIGRÉ Technical Brochure 322, "State of the art of conductor galloping", by Task Force B2.11.16, Sept 2003 (http://gallopingolutions.com/wp-content/uploads/2016/11/WGB21106_brochure_061106.pdf).

2. Vinogradov A.A., Danilin A.N., Rabinskij L.N. Deformirovanie mnogoslojnyh provolochnyh konstrukcij spiral'nogo tipa. Matematicheskoe modelirovanie, primery ispol'zovaniya [Deformation of multilayer wire structures of a spiral type. Mathematical modeling, application examples]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo aviatsionnogo instituta, 2014, 168 p.

3. Havard D.G. Detuning for controlling galloping of single conductor transmission lines. Vancouver, IEEE Symposium on Mechanical Oscillations of Overhead Transmission Lines. Paper A, July 197979 500-0.

4. Havard D.G. Dynamic loads on transmission line structures during galloping. Brno, International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 2002.

5. Havard D.G. Dynamic loads on transmission line structures during galloping – field data and elastic analysis. Sep, Proceedings of 5th International Symposium on Cable dynamics. Santa Margherita, 2003, 15–18, pp. 93–100.

6. Havard D.G., Amm D.E. A review of Ontario Hydro experience with conductor vibration and galloping problems – existing and future solutions. CEA Workshop on the Control of Transmission Line Vibration. Montreal, 1980, March 19.

7. Gasiteli pljaski tipa GPR. TU 3449-006-00113483-2002. IC ORGRJES [Galloping GRP dampers. Technical specification 3449-006-00113483-2002. Engineering Centre ORGRES] (<http://orgres-ec.ru/products/gasiteli-plyaski-gpr-i-gvp/>).

8. Sajt ООО «JenergoKomplekt» [Site LLC "Energo-komplekt"]]: <https://www.ekomplekt.ru/products/lineinaya-armatyra/gasiteli-plyaski-i-mayatniki.html>.
9. Pustyl'nikov L.D., Shkapcov V.A. Metod gashenija pljaski provodov [A method of conductors galloping damping]. *Izvestija Akademii nauk. Jenergetika*, 1992, no. 6, pp. 74-81.
10. Zhongguo Dian, Li KeXue, Yan Jiu Yuan. UHV transmission technology. London, Academic Press, Elsevier, 2018, 759 p.
11. Vinogradov A.A., Sergey I.I., Lilien J.-L. Highly efficient anti-galloping device TDD for transmission lines with bundled conductors – development, tests, design versions. *Int. conference "Energy of Moldova – 2012. Regional aspects of development"*. Chisinau, Republic of Moldova. October, 2012, 4-6, pp. 223-228.
12. Lilien J.L., Havard D.G. Galloping database on single and bundle conductors prediction of maximum amplitudes. *IEEE Transactions Power Delivery*, 2000, vol. 15, iss. 2, pp. 670-674. DOI: 10.1109/61.853003
13. The simulation method of galloping of overhead transmission line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. Kyoto, *Joint Meeting of UNIPeDE, CORECH-Galloping*, 1983.
14. Meng X.B., Wang L.M., Hou L., Fu G.J., Sun B.Q., MacAlpine M., Hu W., Chen Y. Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 66, iss. 1, pp. 44-52. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.01.005
15. Roshan Fekr M., McClure G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines. *Atmospheric Research*, 1998, vol. 46, iss. 1-2, pp. 1-11.
16. Gurung C.B., Yamaguchi H., Yukino T. Identification of large amplitude wind-induced vibration of ice-accreted transmission lines based on field observed data. *Engineering Structures*, 2002, vol. 24, iss. 2, pp. 170-188. (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.485.4544&rep=rep1&type=pdf>).
17. Shehata A.Y., Damatty A.A.E., Savory E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, vol. 42, iss. 1, pp. 71-89. DOI: 10.1016/j.finel.2005.05.005
18. Zhu K. J., Li X. M., Di Y. X., Liu B. Asynchronous swaying character and prevention measures in the compact overhead transmission line. *High Voltage Engineering*, 2010, vol. 36, iss. 11, pp. 2717-2723.
19. Hughes D. T. The dynamic loading of overhead conductors on 11kV lines. London, *International Conference on Design and Construction. Theory and Practice*, 1988, pp. 178-181.
20. Yang F. L., Yang J. B., Zhang Z. F. Unbalanced tension analysis for UHV transmission towers in heavy icing areas. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, vol. 70, pp. 132-140. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.07.008
21. Wang S. H., Jiang X. L., Sun C. X. Characteristics of icing conductor galloping and induced dynamic tensile force of the conductor. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, vol. 25, iss. 1, pp. 159-166. (<https://www.jvejournal.com/article/15065>).
22. Baenziger M., James W., Wouters B., Li L. Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 9, iss. 1, pp. 40-49.
23. Naif B. Almutairi, Zribi M., Abdel-Rohman M. Lyapunov-Based control for suppression of wind-induced galloping in suspension bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011, vol. 2011, pp. 1-23. DOI: 10.1155/2011/310938
24. Barbieri R., Barbieri N., Junior O. H. S. Dynamical analysis of transmission line cables. Part 3-Nonlinear theory. *Mechanical System and Signal Processing*, 2008, vol. 22, pp. 992-1007. DOI: 10.1016/j.ymssp.2007.10.002
25. McClure C., Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. *Computers and Structures*, 2003, vol. 81, pp. 825-834. DOI:10.1016/S0045-7949(02)00472-8
26. Danilin A.N., Shklyarchuk F.N., Lilien J.-L., Snegovskiy D.V., Vinogradov A.A., Djamanbayev M.A. Nonlinear aeroelastic vibrations and galloping of iced conductor lines under wind. *Viena, 7th International Symposium on Cable Dynamics*, 10-13 December 2007, pp. 129-134.
27. Keutgen R. Galloping phenomena. A finite element approach. Ph.D. Thesis. Collection des publications de la Faculté des Sciences. Liège, *Appliquées de l'Université de Liège*, 1999, no. 191, 202 p.
28. Rawlins C.B. Numerical studies of the galloping stability of single conductors. Technical Paper No. 30. – Spartanburg: Alcoa Conductor Products Company. Spartanburg, Sc. June. 1993.
29. Shalashilin V.I., Danilin A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. Model of overhead line conductor with interaction of layers. *Proceedings of Sixth International Symposium on Cable Dynamics*. Charleston, South Carolina (U.S.A.). Sept 19-22, 2005, pp. 371-377.
30. Vinogradov A.A., Danilin A.N. Primenenie MKJe dlja analiza staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov mnogoproljotnyh uchastkov vozdušnyh LJeP [Application of FEM for analysis of static and dynamic modes of multi-span sections of overhead power lines]. *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, 2007, vol. 13, no. 4, pp. 465-478.
31. Danilin A.N., Shklyarchuk F.N. Ajerouprugie kolebanija provodov vozdušnyh LJeP: Formulirovka zadachi, nelinejnye uravnenija dvizhenija [Aeroelastic vibrations of overhead transmission lines conductors: The problem formulation, nonlinear equations of motion]. *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 328-337.
32. Sergej I.I., Klimkovich P.I. Vychislitel'nyj jeksperiment dlja razlichnyh vidov dinamiki provodov jelektrostanovok jenergosistem [Computational experiment for dynamic problems of overhead transmission lines conductors]. *Jenergetika. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG*, 2004, no. 6, pp.12-19. DOI:10.21122/1029-7448-2004-0-6-12-19
33. Sergej I.I., Klimkovich P.I., Cvetkov Ju.L. Chislennyj metod rascheta pljaski odinochnykh provodov vozdušnyh LJeP, osnawennykh mehanicheskimi gasiteljami kolebanij [A numerical modelling of the galloping of overhead transmission lines single conductors with mechanical vibration dampers]. *Jenergetika. Izv. vyssh. ucheb. Zavedenij i jenerg. ob#edinenij SNG*, 2002, no. 5, pp. 3-10.
34. Sergej I.I. Matematicheskoe modelirovanie gasitelej kolebanij rasweplennykh provodov vozdušnyh LJeP [Mathematical modelling of overhead transmission lines dampers]. *Jenergetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i jenerg. ob#edinenij SNG*, 1999, no. 6, pp. 21-32.
35. Sergej I.I., Streljuk M.I. Dinamika provodov jelektrostanovok jenergosistem pri korotkih zamykanijah: Teorija i vychislitel'nyj jeksperiment [Dynamics of conductors of electrical installations of power systems in case of short circuits: Theory and computer experiment], *Minsk, VUZ-JuNITI*, 1999, 252 p.