

DOI: 10.18721/ JEST.230109

УДК 621.315.176

*Ю.Н. Бочаров, В.В. Титков, Р.Ш. Абитаева,
А.Б. Бекбаев, М.А. Джаманбаев*

СВОБОДНОЕ КРУТИЛЬНОЕ КОЛЕБАНИЕ РАСЩЕПЛЕННОГО ПРОВОДА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Рассматривается свободное крутильное колебание расщепленного провода воздушных линий электропередачи. На основании полученного авторами нелинейного дифференциального уравнения с использованием метода Бубнова–Галеркина рассчитаны крутильные колебания расщепленного провода, получены расчетные формулы для его крутильной жесткости. Установлены соотношения между характеристиками крутильных и поперечных колебаний расщепленного провода, позволяющие осуществлять оптимальный выбор параметров устройств подавления колебания и вибраций. Результаты расчетов хорошо согласуются как с экспериментальными данными, так и с известными теоретическими результатами. Полученные формулы рекомендуются для использования в практике проектирования новых и реконструкции существующих воздушных линий электропередачи с расщепленными проводами.

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; РАСЩЕПЛЕННЫЙ ПРОВОД; УРАВНЕНИЕ КРУТИЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ; КРУТИЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ.

Ссылка при цитировании:

Ю.Н. Бочаров, В.В. Титков, Р.Ш. Абитаева, А.Б. Бекбаев, М.А. Джаманбаев. Свободное крутильное колебание расщепленного провода линий электропередач // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 90–97. DOI: 10.18721/ JEST.230109

*Y.N. Bocharov, V.V. Titkov, R.S. Abitaeva,
A.B. Bekbaev, M.A. Jamambaev*

TORSION VIBRATIONS OF SPLITTED WIRE OF OVERHEAD TRANSMISSIONS

Free torsional oscillation of a split wire of an overhead transmission line is considered. Torsional oscillations of a split wire were calculated based on a non-linear differential equation obtained by the authors using the Bubnov–Galerkin method. Calculated formulas for torsional stiffness of a split wire have been derived. Ratios between the characteristics of torsional and lateral oscillations of a split wire were obtained, which allow optimal selection of parameters of the devices for vibration and oscillation dampening. The results of calculations agree with the experimental data as well as known the theoretical results. Obtained calculation formulas are recommended for use in design of new overhead transmission lines with split wires and reconstruction of lines already in operation.

OVERHEAD TRANSMISSIONS LINES; SPLITTING OF WIRE; TORSION MOTION EQUATION; TORSION HARDNESS; EXPERIMENTAL DATA AND CALCULATIONS COMPARISON.

Citation:

Y.N. Bocharov, V.V. Titkov, R.S. Abitaeva, A.B. Bekbaev, M.A. Jamambaev, Torsion vibrations of splitted wire of overhead transmissions, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 90–97, DOI: 10.18721/ JEST.230109

На воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения, как правило, применяются расщепленные провода (РП), позволяющие существенно снизить потери энергии, вызываемые коронным разрядом [1]. Конструкция расщепленного провода представляет собой совокупность одиночных проводников, центры сечения которых размещаются на окружности радиуса R (рис. 1). При таком расположении универсальными геометрическими характеристиками расщепленного провода становятся радиус кругового сечения одиночного проводника (r_0), упомянутый выше радиус расщепления R и количество одиночных проводов в фазе — n [1, 3].

Одной из проблем эксплуатации воздушных линий электропередачи высокого напряжения является обеспечение минимально допустимых расстояний между фазными проводами, а также между фазными проводами и элементами конструкции опор (стойки, траверсы) [2]. В условиях ветровых нагрузок наиболее опасный режим — это так называемая пляска проводов, сопровождающаяся их масштабными взаимными перемещениями [3].

Как известно, определенное влияние на процесс развития пляски наряду с соответствующими метеорологическими условиями оказывают характеристики крутильных движений расщепленного провода.

Синхронизированные вертикальные и крутильные колебания расщепленного провода вызывают периодические изменения угла атаки воздушного потока, воздействующего на провод [3, 4, 6]. Для линий с расщепленными проводами крутильные колебания проявляются в периодических закручиваниях фазы в целом.

Как известно, одно из предложений по борьбе с пляской проводов заключается в активном вмешательстве в этот процесс. Один из подходов основывается на достижении максимальных различий в частотах поперечных и крутильных колебаний, что повышает устойчивость РП к пляске. Широко используются гасители, принцип действия которых направлен на принудительную расстройку частот поперечных и крутильных движений РП (например, маятниковые гасители) [3, 5]. Для более эффективной реализации указанных мер интересно проанализировать крутильные движе-

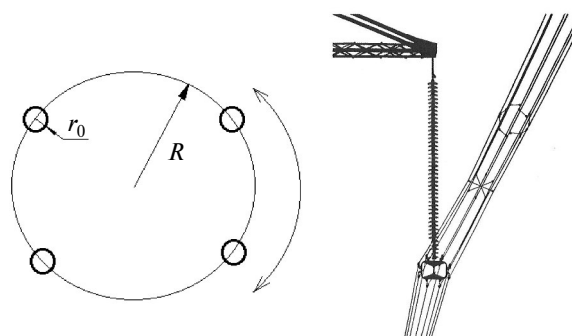


Рис. 1. Конструкция расщепленного провода

ния РП с целью установления соотношений частот крутильных и поперечных колебаний и влияния на них конструктивных параметров расщепленного фазного провода воздушной линии.

Кроме того, при расчете параметров некоторых типов гасителей, воздействующих на крутильные движения РП, необходимо иметь сведения о его крутильной жесткости. Сведения о крутильной жесткости полезно знать и при моделировании пляски РП с помощью эквивалентного провода, эквивалентных пружинных устройств и т. д. Для оценки крутильной жесткости применяются аналитические [7] и экспериментальные методы. Последние были, в частности, реализованы на опытном полигоне Казахстанского научно-исследовательского института энергетики.

В задачу данной работы входит определение частотных характеристик свободных колебаний и крутильной жесткости РП.

Уравнение крутильного движения РП

Уравнение крутильного движения РП определяем исходя из уравнения Лагранжа [8]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \dot{\varphi}(t)} \right) - \frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \varphi(t)} = 0, \quad (1)$$

где $L_{\Lambda} = E_k - E_d$ — функция Лагранжа; E_k — кинетическая энергия РП; E_d — энергия деформаций проводов расщепленной фазы.

При аппроксимации форм колебаний расщепленного провода функциями вида

$$\Phi(z, t) = \varphi(t) \sin \frac{\pi z}{\ell} \quad (2)$$

кинетическая энергия от вращательного движения РП равна

$$E_k = \int_0^{\ell} \frac{J_{\Phi}}{2} \left(\frac{\partial \Phi(z,t)}{\partial t} \right)^2 dz = \frac{n P_0 \ell R^2}{4g} \dot{\varphi}^2(t), \quad (3)$$

где $\varphi(t)$ — обобщенная координата; z — расстояние от опоры до произвольного сечения РП; ℓ — длина пролета; P_0 — масса одного метра провода; n — число расщеплений (число проводов в фазе); R — радиус расщепления; J_{Φ} — момент инерции РП,

$$J_{\Phi} = \frac{n P_0}{g} R^2. \quad (4)$$

При условии, что зависимость между удлинением и натяжением провода носит линейный характер, энергия деформация i -го проводника расщепленного провода может быть выражена с помощью формулы [9]

$$E_{di} = T_0 (L_{\varphi} - L_0) + \frac{EF}{2\ell} (L_{\varphi} - L_0)^2, \quad (5)$$

где E — модуль Юнга; F — площадь поперечного сечения провода; T_0 — начальное натяжение провода.

Длину провода L_0 в положении статического равновесия и длину L_{φ} , соответствующую закрученному состоянию i -го провода РП, определяем по приближенным формулам:

$$L_0 = \int_0^{\ell} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y(z)}{\partial z} \right)^2 \right] dz; \quad (6)$$

$$L_{\varphi} = \int_0^{\ell} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y_{\varphi}(z,t)}{\partial z} \right)^2 \right] dz,$$

где $y(z)$ и $y_{\varphi}(z,t)$ — функции, описывающие конфигурацию (провес) провода в пролете до и после закручивания РП.

Координатная функция, описывающая положение статического равновесия провода в пролете, определяется по известной формуле

$$y(z) = \frac{P_0}{2T_0} z(\ell - z). \quad (7)$$

После геометрических расчетов кручения РП вдоль пролета определено выражение для функций $y_{\varphi}(z,t)$:

$$y_{\varphi}(z,t) = y(z) + \frac{1}{2} R \sin \mu_i \varphi^2(t) \sin^2 \frac{\pi z}{\ell} - R \cos \mu_i \varphi(t) \sin \frac{\pi z}{\ell}. \quad (8)$$

Здесь угол μ_i определяет место расположения отдельных проводов в пучке. Если через μ_i обозначить начальную угловую координату одного из проводов фазы, условно принимаемого за первый, то последующие углы μ_i определяются по формуле

$$\mu_i = \mu_1 + \frac{2\pi(i-1)}{n}, \quad (9)$$

где $i = 1 - n$.

Например, для РП, состоящего из трех проводов ($n = 3$), согласно (9) имеем: $\mu_1 = 30^\circ$; $\mu_2 = 150^\circ$; $\mu_3 = 270^\circ$.

Длины проводов РП до (L_0) и после (L_{φ}) закручивания согласно формулам (6), (7), (8) равны следующим:

$$L_0 = \ell + \frac{P_0^2 \ell^3}{24T_0^2}; \quad (10)$$

$$L_{\varphi} = L_0 + \frac{P_0 \ell^2}{2\pi T_0} \left(k_1 - \frac{4}{\pi} k_2 \right) + \frac{\ell}{4} (k_1^2 + k_2^2) - \frac{4\ell}{3\pi} k_1 k_2; \quad (11)$$

где $k_1 = \frac{\pi}{2\ell} R \sin \mu_i \varphi^2(t)$; $k_2 = \frac{\pi}{\ell} R \cos \mu_i \varphi(t)$.

Подставляя разности длин проводов ($L_{\varphi} - L_0$) в формулу (5) и опуская промежуточные преобразования и вычисления, представим конечную формулу для энергии деформаций расщепленного провода в виде

$$E_d = \sum_1^n E_{di} = \frac{\pi^2 R^2 T_0}{4\ell} \left(1 + \frac{8EFP_0^2 \ell^2}{\pi^4 T_0^3} \right) \sum_1^n \cos^2 \mu_i \varphi^2(t) + \left[\frac{\pi^2 R^2 T_0}{16\ell} \left(1 + \frac{EFP_0^2 \ell^2}{2\pi^2 T_0^3} \right) \times \right.$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\sum_1^n \sin^2 \mu_i + \frac{\pi^4 R^4 EF}{32 \ell^3} \sum_1^n \cos^4 \mu_i \right] \varphi^4(t) + \\ & + \frac{\pi^4 R^4 EF}{64 \ell^3} \sum_1^n \sin^2 \mu_i \cos^2 \mu_i \varphi^6(t) + \\ & + \frac{\pi^4 R^4 EF}{512 \ell^3} \sum_1^n \sin^4 \mu_i \varphi^8(t). \end{aligned} \quad (12)$$

По выражениям (3) и (12) определяем функцию Лагранжа $L_\Lambda = E_k - E_d$. Подставляя L_Λ в уравнение (1), получим дифференциальное уравнение крутильного колебания:

$$\begin{aligned} & \ddot{\varphi}(t) + \omega_\Lambda^2 s_1 \varphi(t) + \\ & + \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} Ds_3 \right) \varphi^3(t) + \frac{3\pi^4}{16} Ds_5 \varphi^5(t) + \\ & + \frac{\pi^4}{32} Ds_4 \varphi^7(t) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где $D = \frac{gEFR^2}{P_0 \ell^4}$; $\Omega^2 = \frac{\pi^2 g T_0}{2 P_0 \ell^2} \left(1 + \frac{EFP_0^2 \ell^2}{2 \pi^2 T_0^3} \right)$; $\omega_\Lambda^2 = \frac{\pi^2 g T_0}{P_0 \ell^2} \left(1 + \frac{8EFP_0^2 \ell^2}{\pi^4 T_0^3} \right)$.

Здесь ω_Λ определяет собственную частоту поперечного колебания линеаризованной системы [10].

В табл. 1 приведены отличные от нуля значения тригонометрических коэффициентов.

Решение нелинейного дифференциального уравнение движения

Решение уравнения (13) осуществляется приближенным методом Бубнова — Галеркина [8].

Вариационная форма уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} & \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_k}} \left[\ddot{\varphi}(t) + \omega_\Lambda^2 s_1 \varphi(t) + \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} Ds_3 \right) \varphi^3(t) + \right. \\ & \left. + \frac{3\pi^4}{16} Ds_5 \varphi^5(t) + \frac{\pi^4}{32} Ds_4 \varphi^7(t) \right] \delta \varphi dt = 0. \end{aligned}$$

Положим

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos \omega_k t; \quad \delta \varphi = \delta \varphi_0 \cos \omega_k t,$$

где φ_0 — амплитуда крутильного колебания РП, ω_k — искомая частота крутильного колебания.

Интегрируя вариационное уравнение с учетом $\delta \varphi$, получим частотное уравнение

$$\begin{aligned} \omega_k = \omega_k \left[1 + \frac{3}{4\omega_k^2} \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} Ds_3 \right) \varphi_0^2 + \right. \\ \left. + \frac{15\pi^4}{128\omega_k^2} Ds_5 \varphi_0^4 + \frac{35\pi^4}{2048\omega_k^2} Ds_4 \varphi_0^6 \right]^{-\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где ω_k — собственная частота крутильного движения линеаризованной системы, определяемая по формуле

$$\omega_k = \omega_\Lambda \sqrt{s_1}. \quad (15)$$

Таблица 1

Числовые значения тригонометрических коэффициентов

Число расщепления n	$s_1 = \frac{\sum_1^n \cos^2 \mu_i}{n}$	$s_2 = \frac{\sum_1^n \sin^2 \mu_i}{n}$	$s_3 = \frac{\sum_1^n \cos^4 \mu_i}{n}$	$s_4 = \frac{\sum_1^n \sin^4 \mu_i}{n}$	$s_5 = \frac{\sum_1^n \sin^2 \mu_i \cos^2 \mu_i}{n}$
2	1	1	1	0	0
3	0,5	0,5	0,37	0,37	0,12
4	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25
5	0,5	0,5	0,37	0,37	0,12
6	0,5	0,5	0,37	0,37	0,12
8	0,5	0,5	0,37	0,37	0,12

Как следует из формулы (15), отношение собственных частот поперечного и крутильного движения РП — величина постоянная и составляет

$$\frac{\omega_{\Lambda}}{\omega_k} = \frac{1}{\sqrt{s_1}} = \sqrt{2}. \quad (16)$$

Формула (16) не учитывает влияния амплитуды поперечного и крутильного колебания на частотные характеристики. Частота поперечного колебания практически не изменяется с увеличением амплитуды [10], а частота кручения чувствительна к изменению угла закручивания (рис. 1, а). Следовательно, с увеличением амплитуды кручения отношение (16) несколько уменьшается. Для определения отношения частот с учетом влияния амплитуды крутильных колебаний ограничимся двухчленным приближением формулы (14) (для реальных линий электропередачи коэффициентом D можно пренебречь):

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_k &= \omega_k \sqrt{1 + \frac{3}{4\omega_k^2} \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} D s_3 \right) \varphi_0^2} \approx \\ &\approx \omega_k \sqrt{1 + \frac{3\Omega^2 s_2}{4\omega_k^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

В формуле (17) при упрощении значение φ_0 принято равным 1. Используя формулу (17), находим (с учетом $S_1 = S_2 = 0,5$)

$$\frac{\omega_{\Lambda}}{\tilde{\omega}_k} = \sqrt{\frac{8\omega_{\Lambda}^2}{4\omega_{\Lambda}^2 + 3\Omega^2}}. \quad (18)$$

Крутильная жесткость расщепленной фазы

Крутильная жесткость РП может быть определена исходя из зависимости между жесткостью и крутильной частотой эквивалентного вала.

Согласно [8] крутильная частота вала определяется по формуле

$$p = \frac{p}{\ell} \sqrt{\frac{K}{J}}, \quad (19)$$

где p — крутильная частота вала; K — крутильная жесткость вала; J — момент инерции вала.

Заменим РП эквивалентным валом:

$$p = \tilde{\omega}_k; \quad K = K_{\text{рф}}; \quad J = J_{\text{рф}} = \frac{nP_0}{g} R^2.$$

Решив (19) относительно искомой величины $K_{\text{рф}}$, находим

$$\begin{aligned} K_{\text{рф}} &= \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{\pi^2 g} \omega_k^2 \left(1 + \frac{3\Omega^2 s_2}{4\omega_k^2} \right) = \\ &= \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{2\pi^2 g} \left(\omega_{\Lambda}^2 + \frac{3}{4} \Omega^2 \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Для РП из двух горизонтально расположенных проводов ($n = 2$) выражение (20) несколько упрощается:

$$K_{\text{рф}} = \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{\pi^2 g} \omega_k^2 = \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{2\pi^2 g} \omega_{\Lambda}^2. \quad (21)$$

Результаты расчетов

Ниже приведены результаты теоретических расчетов, а также сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Экспериментальные данные по частотным характеристикам, а также по крутильной жесткости РП получены на опытном полигоне КазНИИ энергетики имени академика Ш.Ч. Чокина. Все расчетные и экспериментальные данные относятся к проводу марки АСО-330/39 сечением 330 мм².

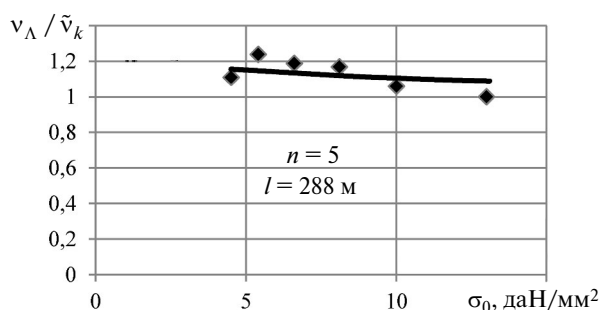
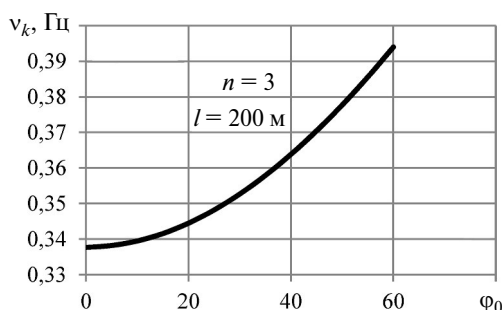


Рис. 2. Зависимость частоты крутильного колебания РП от амплитуды кручения (а); отношение частоты поперечного и крутильного колебания РП (б)

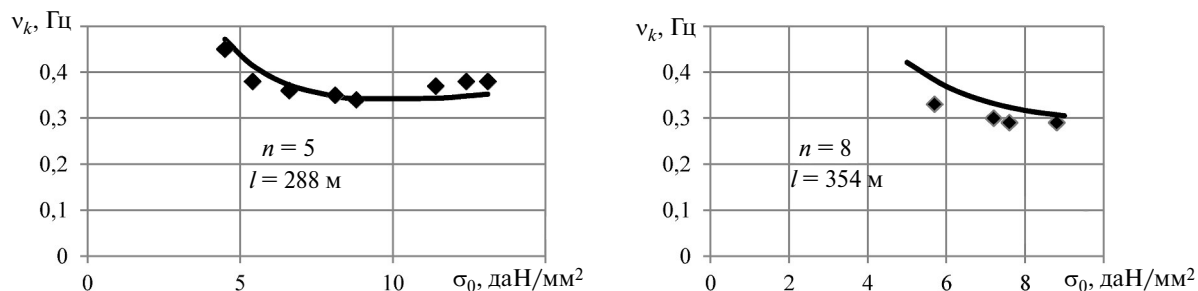


Рис. 3. Зависимости частоты крутильных колебаний РП от механического напряжения провода: а — РП из пяти проводов, $l = 288$ м; б — РП из восьми проводов, $l = 354$ м

На рис. 2,а приведены зависимости частоты крутильного колебания от амплитуды кручения. Расчет выполнен при растягивающем напряжении провода σ_0 , равным 8 даН/мм^2 . Число расщепления — $n = 3$. Длина пролета — $l = 200$ м. Как следует из рис. 2,а, при амплитуде кручения φ_0 , равной 60° (характеризует максимальный угол поворота РП при пляске), частота крутильного колебания может увеличиваться до 17 %. С увеличением натяжения провода и длины пролета это отличие несколько сглаживается.

На рис. 2,б приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных об отношении частот поперечных и крутильных колебаний РП при различных σ_0 . Длина опытного пролета — $l = 288$ м, число расщепления $n = 5$. Как видно из рисунка, при малых напряжениях между

расчетными и экспериментальными данными имеется небольшое расхождение. В целом можно отметить, что расчетные и экспериментальные данные согласуются между собой удовлетворительно.

На рис. 3 приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных частоты крутильных колебаний. Сопоставления выполнены при различных значениях напряжения провода, числа расщепления и длины пролета. Видно, что экспериментальные и расчетные данные в целом согласуются удовлетворительно. Наблюдается некоторое расхождение экспериментальных и расчетных данных при небольших напряжениях (максимальное отличие достигает 15 %). С увеличением σ_0 это отличие уменьшается до 5 %.

В табл. 2 приведены результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных по

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных крутильной жесткости РП

$\sigma_0, \text{ даН/мм}^2$	$K_{\text{рф}}, \text{ даН}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$		
	Эксперимент	Теоретич. по ф-ле (20)	Теоретич. по ф-ле (22)
РП с $n = 5; l = 288$ м			
4,5	2659	4087 (53 %)	1323 (100 %)
5,4	2426	3145 (29 %)	1008 (240 %)
8,5	2493	2123 (17 %)	655 (380 %)
13,2	3177	2186 (45 %)	651 (488 %)
РП с $n = 8; l = 354$ м			
5,7	10365	15144 (46 %)	3049 (340 %)
6,6	9371	12482 (33 %)	2490 (376 %)
7,1	9467	11491 (21 %)	2280 (415 %)
8,4	9862	9890 (0,2 %)	1934 (510 %)

крутильной жесткости РП. Теоретические расчеты выполнены по различным формулам. В скобке приведены отличия между экспериментальными и теоретическими данными в процентах.

Согласно [7] для определения эквивалентной крутильной жесткости РП принимается формула

$$K_{\text{рф}} = n\tau + T_0 R^2 \left(1 + \frac{EFP_0^2 l^2}{12T_0^3} \right), \quad (22)$$

где τ — крутильная жесткость одиночного провода (при расчетах можно пренебречь, поскольку $\tau \ll K_{\text{рф}}$).

Как показывает сравнительный анализ, расчетные формулы, полученные в [7], дают для крутильной жесткости существенно заниженные значения.

Выводы

1. Частота крутильного колебания расщепленного провода всегда меньше частоты поперечного колебания. При минимальном расщеплении (число проводов в фазе $n = 2$) частоты

крутильных и поперечных колебаний совпадают. При увеличении числа расщепления ($n > 2$), принимаемом в России для линий классом выше 330 кВ, частота крутильных колебаний всегда ниже, чем поперечных.

2. С увеличением натяжения и с уменьшением длины пролета разности между частотой поперечного и крутильного колебания уменьшается.

3. Частота крутильного колебания зависит от амплитуды кручения. Возрастание частоты с ростом амплитуды кручения происходит по нелинейному закону.

4. Увеличение длины пролета, массы провода, числа n расщепления (радиуса) и частоты колебания приводит к увеличению крутильной жесткости расщепленного провода.

5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтверждает надежность полученных формул. Они могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с ограничением пляски проводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007.
2. Кучинский Г.С., Кизеветгер В.Е. Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения. Теоретические и практические основы. Т. 1 / Ред. А.Ф. Дьяков. М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.
4. Пустыльников Л.Д., Шкапцов В.А. Аэродинамически неустойчивые колебания проводов воздушных линий электропередачи с гололедными отложениями // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1991. № 2. С. 103–106
5. Крылов С.В., Шкапцов В.А. Улучшенная система подвески проводов для больших воздушных переходов с промежуточными опорами // Электрические станции. 1999. №3. С. 36–42.
6. Бекметьев Р.М., Жакаев А.Ш., Ширинских Н.В. Пляска проводов воздушных линий электропередачи. Алма-Ата: Наука КазССР, 1979.
7. Wang I., Lilien J. L. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span 3–DOF–Model, some Application and design recommendations // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13. №3. P. 909–916.
8. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М.: Высшая школа, 1973.
9. Бекметьев Р.М., Джаманбаев М.А. Методика расчета динамических нагрузок при пляске проводов // Сборник докладов советских специалистов на международном совещании по проблемам пляски проводов ЛЭП. Сочи. 1985. С. 56–68.
10. Бекбаев А.Б., Джаманбаев М.А., Акпанбетов Д.Б., Токенов Н.П. Исследование влияние амплитуды колебаний проводов линий электропередач на собственную частоту // Вестник Казахской Национальной академии естественных наук. 2012. №1. С. 64–66.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЧАРОВ Юрий Николаевич — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: bocharovy@mail.ru

ТИТКОВ Василий Васильевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: titkovprof@yandex.ru

АБИТАЕВА Рахимаш Шанракбаевна — ассистент Казахского национального технического университета (КазНТУ). 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: eatk_kz@rambler.ru

БЕКБАЕВ Аманкельды Бекбаевич — доктор технических наук профессор Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

ДЖАМАНБАЕВ Мураткали Абенович — кандидат технических наук (PhD) доцент Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: r_abitaeva@mail.ru

REFERENCES

1. **Aleksandrov G.N.** Peredacha elektricheskoy energii. SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2007. (rus.)
2. **Kuchinskiy G.S., Kizevetter V.Ye. Pintal Yu.S.** Izo-lyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya. M.: Energoatomizdat, 1987. (rus.)
3. Elektricheskiye seti sverkh- i ultravysokogo napryazheniya. Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy. T. 1 / Red. A.F. Dyakov. M.: NTF «Energoprogress» Korporatsii «YeEEK», 2012.
4. **Pustynnikov L.D., Shkaptsov V.A.** Aerodinamicheski neustoychivyye kolebaniya provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi s gololednymi otlozheniyami. *Izvestia AN SSSR Energetika i transport*. 1991. № 2. S. 103–106. (rus.)
5. **Krylov S.V., Shkaptsov V.A.** Uluchshennaya sistema podveski provodov dlya bolshikh vozduzhnykh perekhodov s promezhutochnymi oporamami. *Elektricheskiye stantsii*. 1999. №3. S. 36–42. (rus.)
6. **Bekmetyev R.M., Zhakayev A.Sh., Shirinskikh N.V.** Plyaska provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi. Alma-Ata: Nauka KazSSR, 1979.
7. **Wang I., Lilien J. L.** Overhead electrical transmission line galloping. Afullmulti-Span 3–DOF–Model, some Application and design recommendations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998. Vol. 13. №3. P. 909–916.
8. **Svetlitskiy V.A., Stasenko I.V.** Sbornik zadach po teorii kolebanii. M.: Vysshaya shkola, 1973.
9. **Bekmetyev R.M., Dzhamanbayev M.A.** Metodika rascheta dinamicheskikh nagruzok pri plyaske provodov. *Sbornik dokladov sovetskikh spetsialistov na mezhdunarodnom soveshchanii po problemam plyaski provodov LEP*. Sochi. 1985. S. 56–68. (rus.)
10. **Bekbayev A.B., Dzhamanbayev M.A., Akpanbetov D.B., Tokenov N.P.** Issledovaniye vliyaniye amplitudy kolebanii provodov liniy elektroperedach na sobstvennyuyu chastotu. *Vestnik Kazakhstanskoy Natsionalnoy akademii yestestvennykh nauk*. 2012. №1. S. 64–66. (rus.)

AUTHORS

BOCHAROV Yurii N. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: bocharovy@mail.ru

ТИТКОВ Vasilii V. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: titkovprof@yandex.ru

АБИТАЕВА Rakhimash S. — Kazakh National Technical University (KazNTU). Satpaev str. 22 Almaty, Kazakh Republic. E-mail: eatk_kz@rambler.ru

БЕКБАЕВ Amankeldy B. — Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev. Satpaev str. 22 Almaty, Kazakh Republic. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

ЖАМАНБАЕВ Muratkali A. — Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev. Satpaev str. 22 Almaty, Kazakh Republic. E-mail: r_abitaeva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 22.11.2016.