

УДК 621.315.175

В.Я. ГОРИН (канд.техн.наук, доц.), **Н.Н. ДАВИДСОН, Е.А. МАРАСИНА**

Донецкий национальный технический университет

gorin@elf.dgtu.donetsk.ua

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ПЛЯСКЕ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

A new procedure of a critical wind speed engineering assessment is provided in the article. It is one of the main parameters of the high – tension transmission electricity lines conductor galloping process. The procedure was developed on the basis of the reasoning used in the flutter effect analysis in aviation. There is also a numeral calculation example of the critical wind speed change value in the case of conductor galloping when the balancing freight is placed in the middle of the transmission electricity lines span.

Постановка задачи. В [1] рассматривались вынужденные колебания проводов на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи, которые были возможны постольку, поскольку существовали внешние воздействия периодического характера (порывы ветра и др.). Однако колебания провода, покрытого гололедом, возникшие благодаря случайному импульсу, могут развиваться и при отсутствии периодических воздействий извне. Такие колебания называются самовозбуждающимися или автоколебаниями. Энергия для их поддержания черпается из источника, который сам по себе не имеет колебательного характера. Наглядным примером автоколебаний является поведение полотнища флага на ветру, который направлен в одну и ту же сторону. Колебания провода с большой амплитудой и малой частотой, происходящее за счет энергии набегающего потока, называется пляской проводов ВЛ. В процессе эксплуатации ВЛ – это крайне нежелательное явление, поскольку приводит к нарушению электроснабжения потребителей. Возможность возникновения пляски должна быть предотвращена в процессе проектирования конструктивными мероприятиями. Формы пляски отличаются большим разнообразием, но каждая форма пляски возникает при вполне определенной скорости ветра, которая называется критической. Как показывает опыт, общие принципы механики, фундаментальные положения теории устойчивости и балансировки самолетов, а также методики их исследования могут быть применимы и к проводам ВЛ. Но конкретные выводы из этих исследований для провода бывают иными, чаще в комплексном, а иногда и в качественном отношении. Провод нередко оказывается более «требовательным», чем самолет. Это относится в первую очередь к поведению провода в возмущенной атмосфере потому, что он находится в условиях малых чисел Рейнольдса. Можно заметить отличие в конкретных числах и выводах, но оно почти ничего не меняет в отношении общих принципов теории. В этой связи представляется актуальной задача определения критической скорости ветра при пляске проводов ВЛ на базе рассуждений, используемых при анализе явления флаттера в авиации.

Анализ последних исследований. В публикациях, посвященных колебаниям проводов высоковольтных ВЛ [2,3], в основном рассматриваются автоколебания проводов. Однако расчет параметров пляски проводов ВЛ предлагается выполнять по относительно сложным методикам с использованием громоздких математических выражений, что затрудняет их применение при проектировании ВЛ.

Задача исследований. Предложить методику инженерной оценки с использованием упрощенных расчетных соотношений для определения критической скорости ветра, при которой возникает пляска проводов ВЛ высокого напряжения.

Изложение основного материала. Ниже рассматривается физическая картина возникновения изгибно-крутильных колебаний провода, покрытого гололедом, которые являются наиболее типичной формой пляски проводов, а также определение критической скорости ветра при пляске с одной полуволной в пролете, когда наблюдается наибольшая амплитуда колебаний (рис. 1).

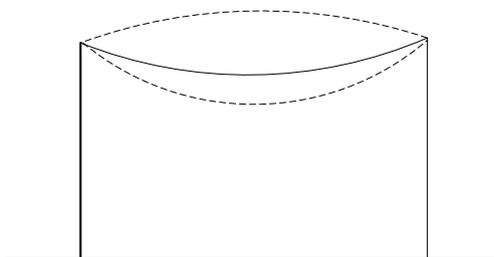


Рисунок 1 – Положение провода в пролете при пляске с одной полуволной в пролете

Это обстоятельство неминуемо приводило бы к разрушению любой конструкции, если бы при этом не возникали силы, препятствующие развитию колебаний. Такими силами являются демпфирующие

Пусть по какой-либо причине, например из-за ветра, возникли крутильные колебания провода, которые характеризуются периодическими изменениями углов кручения $\Delta\alpha_\phi$. При отсутствии ветра эти колебания из-за наличия сил внутреннего трения обязательно затухают, но в потоке воздуха они могут перейти в опасные автоколебания. Действительно, вследствие деформации кручения возникают дополнительные аэродинамические силы q_ϕ , которые периодически меняют свой знак вместе с изменением знака угла кручения $\Delta\alpha_\phi$ (рис. 2).

Таким образом, случайная деформация кручения порождает силы, вызывающие изгибные колебания с нарастающей амплитудой.

аэродинамические силы q_ϕ , обусловленные скоростью изгибных колебаний. При движении несущей поверхности вниз (рис. 2) углы атаки возрастают, а при движении вверх – уменьшаются. За счет этого и появляются дополнительные аэродинамические силы q_f , которые всегда направлены противоположно изгибу.

Следовательно, имеются одновременно силы, как способствующие развитию колебаний q_ϕ , так и препятствующие им q_f . Окончательное суждение о характере колебаний, очевидно, будет зависеть от соотношения работ этих сил за один период колебаний.

Погонные значения демпфирующих сил могут быть определены по следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} q_\phi &= \Delta C_{y\phi} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot \Delta S \\ q_f &= \Delta C_{yf} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot \Delta S \end{aligned} \right\},$$

где $\Delta S = b \cdot \cos \chi$ – площадь несущей поверхности единичной длины; b – хорда (по направлению ветра); χ – угол между линией фокуса и проекцией перпендикуляра к плоскости xu на плоскость хорд.

$$\Delta C_{y\phi} = \Delta \alpha_y \cdot C_y^\alpha = \phi \cdot \cos \chi \cdot C_y^\alpha, \tag{1}$$

где ϕ – угол кручения относительно оси провода (рис.3); ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра;

C_y^α – коэффициент пропорциональности, показывающий изменение коэффициента подъемной силы на единицу угла атаки;

$$\Delta C_{yf} = C_y^\alpha \cdot \Delta \alpha_f \approx C_y^\alpha \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial f}{\partial t}.$$

С учетом (1) и результатов анализа в [1], получим:

$$q_\phi = \phi \cdot \cos \chi \cdot \Delta C_y^\alpha \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot \Delta S, \tag{2}$$

$$q_f = \frac{\partial f}{\partial t} \cdot \Delta C_y^\alpha \cdot \frac{\rho V}{2} \cdot \Delta S. \tag{3}$$

Таким образом, возбуждающие силы пропорциональны квадрату скорости ветра, а демпфирующие – скорости в первой степени.

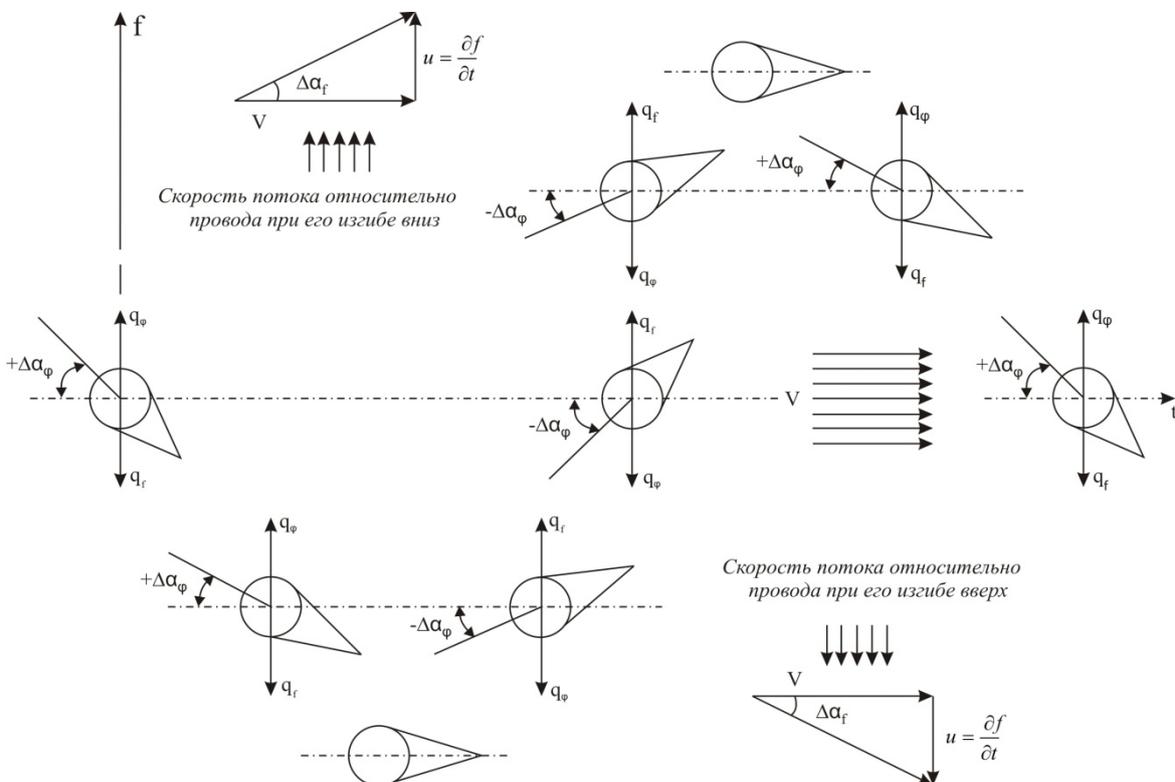


Рисунок 2 – Изгибно-крутильные колебания провода в воздушном потоке

Графики работы этих сил за один цикл колебаний в функции скорости ветра показаны на рис. 4. Из этого рисунка видно, что при некоторой вполне определенной, так называемой критической скорости ветра $V_{кр}$, работы возбуждающих и демпфирующих сил станут равными. В этом случае приток энергии в систему равен ее расходу и колебания будут происходить с постоянной амплитудой. При всякой другой скорости колебания будут либо затухающими, либо возрастающими.

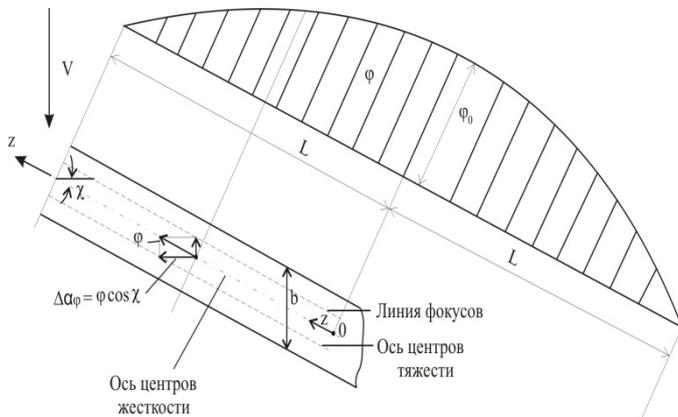


Рисунок 3 – Эюра углов кручения

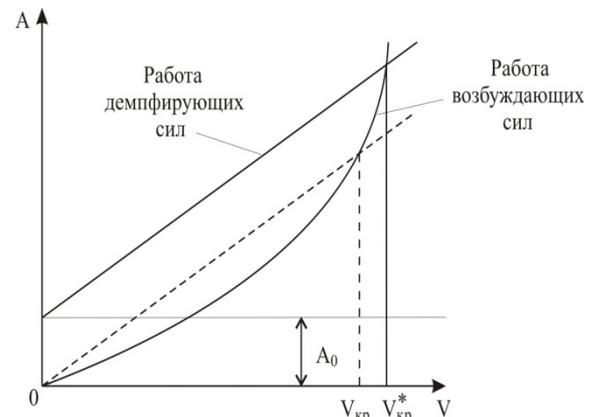


Рисунок 4 – Зависимость работы возбуждающих и демпфирующих сил от скорости ветра

Если $V < V_{кр}$, то работа демпфирующих сил больше работы возбуждающих и колебания затухают. Если наоборот, то сколь бы слабым не был начальный импульс, колебания будут происходить с возрастающей амплитудой. Следовательно, критическая скорость разграничивает диапазоны скорости ветра на две зоны: область значений, в которой система устойчива (колебания затухают), и область неустойчивого состояния системы, в которой возникшие колебания с течением времени возрастают.

Пунктирная прямая на рис. 4 проведена в предположении, что сопротивление среды отсутствует и существует линейная зависимость между напряжениями в проводе и его деформациями. В этом случае критическая скорость $V_{кр}$ будет меньше, чем $V_{кр}^*$.

Отметим две особенности этого процесса:

1. Все рассуждения велись в предположении, что максимумы изгиба и кручения не совпадают друг с другом во времени, т.е. между ними имеется сдвиг фаз, равный 90° . В реальных условиях сдвиг фаз, зависящий от скорости ветра, мало отличается от указанного

2. Предполагалось, что несущей поверхности провода сообщается начальный импульс в виде кручения.

Однако физика процесса остается прежней, если начальный импульс принять в виде изгиба.

Определение критической скорости представляет собой сложную задачу. В связи с этим получили распространение прикладные методы расчета $V_{кр}$. Суть некоторых из них заключается в том, что вначале задаются функциями, характеризующими изменения прогибов и углов кручения вдоль системы. Обычно в качестве этих функций принимают формы собственных изгибно-крутильных колебаний несущей поверхности в пустоте. Затем, учитывая все силы, действующие на колеблющуюся поверхность, получают уравнение движения в виде системы дифференциальных уравнений. Решение этого уравнения для системы гармонических колебаний дает расчетные зависимости для вычисления $V_{кр}$. Однако, несмотря на прикладной характер, имеющиеся в литературе методы являются трудоемкими и достаточно сложными.

Ниже рассматривается приближенный способ определения критической скорости, позволяющий получить весьма несложные расчетные формулы в замкнутом виде. В основе этого способа лежат следующие допущения:

1. Несущая поверхность провода схематически представляется в виде балки на двух опорах.
2. Все характерные оси являются прямыми линиями (рис.3).
3. Пренебрегается сопротивлением окружающей среды в предположении, что напряжение в проводе линейно зависит от его деформации, т.е. заведомо учитывается меньшая величина $V_{кр}$ (рис.4).

Как известно, для определения частоты свободных колебаний или критической силы в динамических задачах или задачах устойчивости иногда пользуются методом сравнения деформаций. Сущность этого метода заключается в следующем. Первоначально задаются деформациями по длине провода с учетом граничных условий. Затем определяются упругие деформации, которые приравниваются к заданным.

Воспользуемся указанным методом для нахождения критической скорости пляски проводов.

С этой целью рассмотрим момент действия начального импульса, который вызывает закручивание несущей поверхности провода. Функцию, характеризующую закон распространения кручения φ по длине провода, зададим при этом в следующем виде:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{2L}, \tag{4}$$

где φ_0 – наибольший угол кручения; L – половина длины провода в пролете ВЛ; z – длина отрезка на оси 0-Z с началом ее в середине провода (рис. 3).

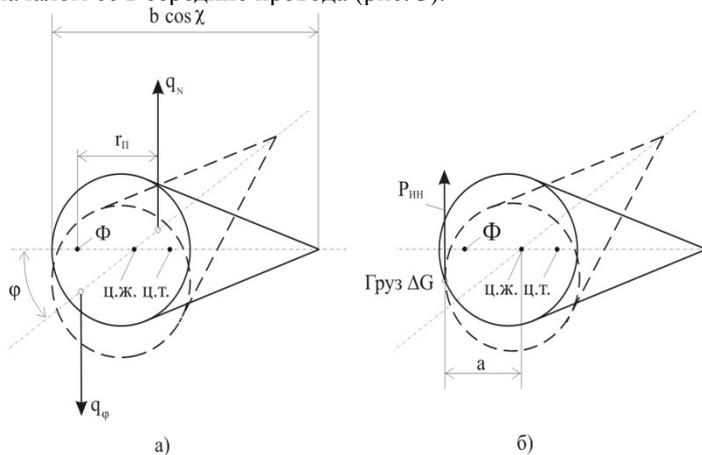


Рисунок 5 – Определение критической скорости изгибно-крутильных колебаний провода, покрытого гололедом с учетом веса балансирующих грузов: а – без груза; б – с учетом веса груза.

За счет деформации кручения изменяются углы атаки, и возникают аэродинамические силы q_φ . Эти силы вместе с соответствующими им инерционными силами q_N образуют пары $q_\varphi r_{\Pi}$, где r_{Π} – расстояние между фокусом и центром тяжести провода (рис. 5). Аэродинамический фокус – это такая точка, относительно которой момент полной аэродинамической силы не зависит от угла атаки при условии постоянства скорости ветра. Заметим, что положение фокуса не зависит от угла атаки.

Равенство $q_\varphi = q_N$ является приближенным. В результате в произвольном сечении несущей поверхности провода будет иметь место крутящий момент

$$M_K = 2 \int_0^z q_\varphi \cdot r_{\Pi} \cdot dz. \tag{5}$$

Из рис. 5 следует, что величина r_{Π} определенным образом влияет на углы кручения φ . С увеличением расстояния r_{Π} углы кручения возрастают, что приводит к уменьшению критической скорости пляски.

При наличии балансирующих грузов весом ΔG , расположенных на несущей поверхности провода ($z=l_{zp}$), следует еще учитывать и сосредоточенные моменты $P_{инн} \cdot a$ (рис. 5). Рассматривая два груза, расположенных симметрично относительно середины провода в пролете ВЛ ($l_{zp1} = l_{zp2} = l_{zp}$), инерционная сила определяется весом груза ΔG и перегрузкой на провод от веса гололеда n_{zp} :

$$P_{инн} = \Delta G \cdot n_{zp},$$

где $n_{zp} = (q_N / q_{\Pi})_{z=l_{zp}} = (q_\varphi / q_{\Pi})_{z=l_{zp}}$; q_{Π} – погонный вес провода, покрытого гололедом.

В результате имеем:

$$P_{инн} = (q_\varphi / q_{\Pi})_{z=l_{zp}} \cdot \Delta G. \tag{6}$$

Таким образом, выражение (6) для сечения $z > l_{zp}$ запишется в виде:

$$M_K = 2 \int_0^z q_\varphi \cdot r_{\Pi} \cdot dz - 2P_{инн} \cdot a. \tag{7}$$

Как известно, упругие деформации кручения φ_z могут быть определены в произвольном сечении по формуле:

$$\varphi_z = \int \frac{L}{z} \frac{M_k}{G \cdot I_k} dz, \tag{8}$$

где G - модуль упругости при сдвиге; I_k – полярный момент инерции сечения провода.

Сравним упругие и заданные деформации кручения в сечении $z = 0$, где они максимальны:

$$\varphi_0 = \varphi_z = 0. \tag{9}$$

Перепишем условие (9) с учетом (8) и (7):

$$\varphi_0 = 2 \int_0^L \frac{dz}{G \cdot I_k} \int_0^z q_{\varphi} \cdot r_{\Pi} \cdot dz - 2 \int_0^L \frac{P_{\text{ин}}}{G \cdot I_k} \cdot a \cdot \frac{dz}{G \cdot I_k}. \quad (10)$$

После подстановки (2), (4) и (6) в выражение (8) условие (9) примет вид:

$$\varphi_0 = \frac{\varphi_0}{2} \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot \rho \cdot \cos \chi \cdot 2 \left[\int_0^L \frac{dz}{G \cdot I_k} \int_0^z C_y^{\alpha} \cdot \Delta S \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{2L} r_{\Pi} \cdot dz - \int_0^L C_y^{\alpha} \cdot \Delta S \cdot \cos \frac{\pi \cdot l_{\text{зп}}}{2L} \cdot \frac{\Delta G}{q_{\Pi z=l_{\text{зп}}}} \cdot a \cdot \frac{dz}{G \cdot I_k} \right]$$

Из этого уравнения следует:

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{1}{K_{\Pi} \cdot \rho \cdot \cos \chi}}, \quad (11)$$

где

$$K_{\Pi} = \int_0^L \frac{dz}{G \cdot I_k} \int_0^z C_y^{\alpha} \cdot b^2 \cdot \cos^2 \chi \cdot \cos \frac{\pi \cdot z}{2L} r_{\Pi} \cdot dz - \int_0^L C_y^{\alpha} \cdot b^2 \cdot \cos^2 \chi \cdot \cos \frac{\pi \cdot l_{\text{зп}}}{2L} \cdot \bar{a} \cdot \frac{\Delta G}{q_{\Pi z=l_{\text{зп}}}} \cdot \frac{dz}{G \cdot I_k}$$

$$\bar{r}_{\Pi} = \frac{r_{\Pi}}{b \cdot \cos \chi}; \quad \bar{a} = \frac{a}{b \cdot \cos \chi}.$$

Для провода с постоянными характеристиками по длине q_{Π} , b , r_{Π} , $G \cdot I_k$, C_y^{α} при расположении груза в середине пролета ($\Delta G' = 2\Delta G$) формула (11) значительно упрощается:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi}{S} \sqrt{\frac{G \cdot I_k}{C_y^{\alpha} \cdot \rho \cdot \cos \chi \cdot \bar{r}_{\Pi} \left(1 - \frac{\bar{a}}{r_{\Pi}} \cdot \frac{\Delta G'}{G_{\Pi}} \cdot \frac{\pi^2}{4} \right)}}, \quad (12)$$

где $G_{\Pi} = 2L \cdot q_{\Pi}$ – вес провода с гололедом; S – площадь несущей поверхности всего провода.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Движение провода может начаться при различных аэродинамических коэффициентах C_y . Вследствие этого скорость ветра, при которой подъемная сила становится равной весу провода, не определяется однозначно. В этом легко убедиться, получив из равенства $Y = G$ следующее выражение для скорости ветра (при отсутствии срыва потока ветра):

$$V_{Y=G} = \sqrt{\frac{2G}{\rho \cdot C_y}} = \text{const} \sqrt{\frac{1}{C_y}} = \text{const} \sqrt{\frac{1}{C_{y,0} + C_y^{\alpha}}},$$

где $C_{y,0}$ – величина C_y при $\alpha = 0$.

Пример расчета

Вычислить изменение критической скорости пляски проводов ВЛ в случае размещения балансирующего груза в середине пролета ВЛ при условии: $\frac{\bar{a}}{r_{\Pi}} = 2$; $\frac{\Delta G'}{G_{\Pi}} = \frac{1}{21}$.

Решение.

$$V_{\text{кр}\Delta G} = V_{\text{кр}\Delta G=0} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\bar{a}}{r_{\Pi}} \cdot \frac{\Delta G'}{G_{\Pi}} \cdot \frac{\pi^2}{4}}} = V_{\text{кр}\Delta G=0} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - 2 \cdot \frac{1}{21} \cdot \frac{3,14^2}{4}}} = 1,15 V_{\text{кр}\Delta G=0}$$

Вывод: критическая скорость ветра возросла на 15%.

Список литературы

1. Горин В.Я., Давидсон Н.Н., Давидсон С.Н. Методика расчета перегрузок на узлы крепления проводов ВЛ при динамическом действии порывов ветра.// Наук.праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика», вип. 7 (128).- Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2007.-210-213с.
2. Яковлев Л.В. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и способы борьбы с нею. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2002. – 96 с. [Библиотечка электротехника приложение к журналу «Энергетик», вып. 11(47)]
3. Ржевский С.С. Пляска проводов ВЛ 6-750 кВ. Расчеты схлестываний и динамических напряжений.- Электрические станции №6, 2005.- С. 55-62.
4. Конструкция летательных аппаратов. Под ред. С.Н. Кана – М.: Оборонгиз, 1963. - 726с.

Надійшла до редколегії 18.05.2009

Рецензент: О.П.Ковальов

В.Я. ГОРИН, Н.Н. ДАВИДСОН, Е.А. МАРАСИНА
Донецкий национальный технический университет

Методика определения критической скорости ветра при пляске проводов воздушных ЛЭП. В статье предлагается новая методика инженерной оценки критической скорости ветра, одного из важных параметров процесса пляски проводов высоковольтных ЛЭП, на базе рассуждений, используемых при анализе явления флаттера в авиации. Приводится пример численного расчета величины изменения критической скорости ветра при пляске проводов для случая размещения балансирующего груза в середине пролета ЛЭП.

Высоковольтные ЛЭП, пляска проводов, критическая скорость ветра, инженерная оценка, флаттер

В.Я.ГОРІН, М.М. ДАВІДСОН, О.О. МАРАСІНА
Донецький національний технічний університет

Методика визначення критичної швидкості вітру при галопуванні проводів повітряних ЛЕП. У статті пропонується нова методика інженерного оцінювання критичної швидкості вітру, одного з важливих параметрів процесу галопування проводів високовольтних ЛЕП, на підставі міркувань, що використовуються при аналізі явища флаттера у авіації. Приводиться приклад чисельного розрахунку величини змінювання критичної швидкості вітру під час галопування проводів для випадку розміщення балансувального вантажу в середині прогону ЛЕП.

Високовольтні ЛЕП, галопування проводів, критична швидкість вітру, інженерна оцінка, флаттер