

УДК 621.315.1:534.1
МРНТИ 44.29.37

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА, ПРИВОДЯЩЕЙ К
ПРЕКРАЩЕНИЮ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЫ ЛИНИИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**ӘУЕ ЖЕЛПІЛЕРІНІҢ ШОҒЫРЛАНҒАН ФАЗАСЫНЫҢ БИЛЕУЛЕРІН ТОҚТАТУҒА
ӘКЕЛЕТІН ЖЕЛДІҢ МАКСИМАЛДЫҚ МӘНІН АНЫҚТАУ**

**DETERMINATION OF THE MAXIMUM WIND SPEED, LEADING TO THE TERMINATION OF
THE SPLITTING OF THE WIRES OF THE SPLIT PHASE OF THE POWER LINE**

*М.А. ДЖАМАНБАЕВ, Р.А. ДЖАМАШЕВА
М.Ә. ЖАМАНБАЕВ, Р.Ә. ЖАМАШЕВА
M.A. JAMANBAEV, R.A. JAMASHEVA*

**(Алматинский технологический университет)
(Алматы технологиялық университеті)
(Almaty Technological University)
E-mail: dzhamanbaev@mail.ru**

При определенных условиях на воздушных линиях электропередачи наблюдаются механические колебания проводов, характеризующиеся сравнительно низкой частотой и значительной

амплитудой. Эти колебания получили названия «пляска» проводов. В статье разработана методика инженерной оценки верхней границы (максимальной) скорости ветра, приводящей к прекращению пляски проводов.

Полученные расчетные формулы для оценки критической скорости используются при определении области устойчивости обледенелого провода расщепленной фазы в ветровом потоке.

Мақалада желдің жылдамдығының жоғарғы шекарасын (максималды) инженерлік бағалау әдістемесі сымдардың билеуін тоқтатуға әкеледі.

Күрделі жылдамдықты анықтауға есептелген формулалар жел ағынындағы бөлінген фазаның мұз қатқан сымының тұрақтылық аймағын анықтау кезінде пайдаланылады. Бағалау техникасы әзірленді және ауытқу процесінің аяқталуына әкеліп соқтыратын сымның желден тербелуін тоқтатуға әкелетін жылдамдығының жоғарғы шекарасын анықтау үшін есептеу формуласы алынды.

The technique of engineering estimation of the upper boundary (maximum) of the wind speed is developed in the article, leading to the termination of the dance of wires. The calculated formulas for determining the critical velocity are used in determining the stability region of the icy wire of the split phase in the wind flow. An evaluation technique has been developed and a calculation formula has been obtained to determine the upper boundary of the critical wind speed, leading to the termination of the oscillatory process.

Ключевые слова: линия электропередачи, расщепленная фаза, пляска проводов, линеаризованное уравнение, критерий устойчивости, критическая скорость ветра

Негізгі сөздер: электр желісі, бөлінген фаза, сым тербелуі, сызықтық теңдеулер, орнықтылық критеріі, желдің сыни жылдамдығы

Key words: power line, split phase, wire dance, linearized equation, stability criterion, critical wind speed.

Введение

При определенных условиях на воздушных линиях электропередачи наблюдаются механические колебания проводов, характеризующиеся сравнительно низкой частотой и значительной амплитудой. Эти колебания получили названия «пляска» проводов. Явление пляски возникает обычно при ветре и отложении на проводах гололеда, представляет собой автоколебательный процесс. Провода могут колебаться длительное время (до нескольких суток). При колебаниях проводов с большой амплитудой опоры ЛЭП испытывают динамические нагрузки, нередки случаи схлестывания проводов фаз. В результате пляски происходят оплавления и пережоги проводов из-за коротких замыканий, повреждения и поломки опор, гирлянд изоляторов и других элементов ЛЭП. Поэтому исследования реакций обледенелого провода-линий электропередачи на ветровые воздействия и разработка мер борьбы с явлениями пляски являются одним из актуальных проблем сегодняшнего дня.

Задача аэроупругой неустойчивости упруго закрепленной пластины или профиля на

пружинной подвеске в ветровом потоке рассматривается в работе [1]. Однако, упруго закрепленная пластина или профиль неадекватно описывают поведение полномасштабных воздушных линий электропередачи. К работам последних лет, посвященным определению критической скорости ветра, возбуждающей пляску одиночных проводов ВЛ, можно отнести [2]. Такого рода исследования, выполненные относительно расщепленной фазы (РФ) встречаются в работах [3].

Объекты и методы исследований

Объектом исследования является расщепленная фаза линий электропередачи (ЛЭП). Данные исследования нацелены на определение максимальной скорости ветрового потока, приводящей к прекращению пляски обледенелого провода расщепленной фазы. Исследования производятся с использованием методов теорий колебаний.

Оценка верхней границы критической скорости, при которой исчезает колебательный процесс осуществляется, исходя из следующего соображения. Как известно, при пляске возбуждающие (аэродинамические) силы и характер

движения провода взаимно обусловлены. Если направление возбуждающей силы совпадает с направлением движения провода, то последнему сообщается на этом пути импульс энергии, способствующий движению. При некоторых обстоятельствах возбуждающие силы могут быть направлены навстречу движению провода и оказывать тормозящее действие. Таким образом, условием существования колебательного процесса является синхронное изменение аэродинамических сил и направления движения.

Условие совпадения направления движения обледенелого провода и проекция аэродинамических сил в направлении движения выражается положительностью фактического угла атаки $\psi(z, t)$ по пролету (рис. 1). Из рисунка 1 следует

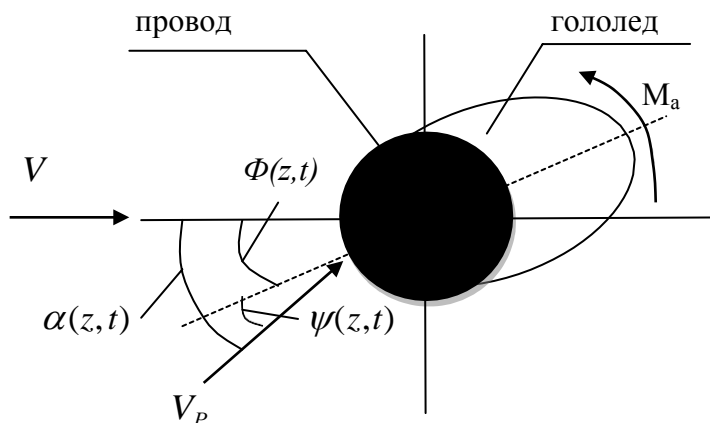


Рисунок 1 - Определение фактического угла атаки ветра

При установившемся режиме пляски, когда РФ из крайнего нижнего достигает нейтрального положения (положение статического равновесия) обобщенная координата и ускорение поперечного движения равны нулю, а скорость - максимальна. Кроме того, в нейтральном положении скорость крутильного движения РФ равна нулю, а амплитуда крутильного колебания достигает своего максимума. Эти условия представляются через обобщенные линейные $a(t)$ и угловые $\varphi(t)$ координаты следующими соотношениями:

$$\psi(z, t) = \alpha(z, t) - \Phi(z, t) > 0 \text{ или } \alpha(z, t) > \Phi(z, t) \quad (1)$$

где $\alpha(z, t)$ – угол между скоростью ветрового потока V и результирующей скоростью ветра V_P (аэродинамический угол атаки), $\Phi(z, t)$ - угловое перемещение РФ (в произвольном сечении РФ и в произвольном времени).

Неравенство (1) можно преобразовать к виду [4]

$$\frac{\dot{a}_M}{V} > \varphi_M \quad (2)$$

где \dot{a}_M – максимальная обобщенная скорость движения РФ, φ_M – амплитуда крутильного колебания, V - скорость воздушного потока

$$a(t) = 0; \ddot{a}(t) = 0; \dot{a}(t) = \dot{a}_M;$$

$$\varphi(t) = \varphi_M; \dot{\varphi}(t) = 0; \ddot{\varphi}(t) \approx 0; \quad (3)$$

Следует отметить, что в условиях (3) пренебрегли ускорением крутильного движения РФ. Такое допущение оправдано, поскольку частота и амплитуда крутильного колебания незначительны.

Учитывая эти условия в математической модели пляски проводов РФ [4], получим систему уравнений

$$\varphi_M^3(t) + d_{1M} \varphi_M^2 + d_{2M} \varphi_M + d_3 = 0 \quad (4)$$

где

$$d_1 = - \frac{k + kVa}{k_2 V^2}; d_2 = - \frac{k V^2 - k a^2}{k_2 V^2}; d_3 = - \frac{k \dot{a}^3 - k V^2 \dot{a}}{k_2 V^3}; \quad (5)$$

$$\text{где } \sim \frac{k \dot{a}}{k^3 V^M}; d_1 = -\frac{\Omega^2 + k V^2 - k \dot{a}^2}{k V^2}; d_2 = -\frac{0}{k V^2}; d_3 = -\frac{k \dot{a}^3 - k V^2 \dot{a}}{k V^3};$$

Решение системы уравнений (4) и (5) относительно амплитуды крутильного движения осуществляется известным методом последовательных приближений. Ограничимся результатами первого приближения:

$$\varphi^M \approx \frac{k_2 \dot{a}_M^3 - k_1 V^2 \dot{a}_M}{V(k V^2 - k \dot{a}_M^2)}; \quad (6)$$

$$\varphi \approx \frac{k \dot{a}^3 - k V^2 \dot{a}}{V(\Omega_0^2 + k_{10} V^2 - k_{13} \dot{a}_M^2)}; \quad (7)$$

Приравняв правые части формулы (6) и (7), получим

$$(k_3 k_{12} - k_2 k_{13}) \dot{a}_M^4 + [(k_2 k_{10} - k_7 k_{12} + k_1 k_{13} - k_3 k_{10}) V^2 + k_2 \Omega_0^2] \dot{a}_M^2 + [k_{10} (k_7 - k_1) V^2 - k_{10} \Omega_0^2] V^2 = 0 \quad (8)$$

Численный анализ коэффициентов уравнения (8) с учетом числовых значений аэродинамических характеристик и параметров линий дает следующие результаты:

$$\begin{aligned} k_3 k_{12} - k_2 k_{13} &= 0; \\ (k_{210} k_{712} - k_{712} k_{113} + k_{113} k_{310} - k_{310} k_{210}) &\approx -10^{-3}; \\ k_{10}(k_7 - k_1) &\approx -10^4; \end{aligned}$$

Если пренебречь этими выражениями из-за малости, то уравнение (8) существенно упрощается

$$k_2 \dot{a}_M^2 - k_1 V^2 = 0 \quad (9)$$

Из системы (2) и (7) исключая обобщенную координату крутильного движения φ_M , получим

$$\dot{a}_M < \sqrt{\frac{\Omega_0^2 + 2k_{10} V^2}{k_{12} + k_{13}}} = \sqrt{\frac{\Omega_0^2 + 2k_{10} V^2}{4k_{12}}} \quad (10)$$

Из системы (9) и (10) исключая обобщенную координату по скорости \dot{a}_M и решив относительно скорости ветра V , получим

$$V < \Omega_0 \sqrt{\frac{k_2}{2(2k_1 k_{12} - k_2 k_{10})}} \quad (11)$$

где величина Ω_0 представляет собой собственную частоту свободного крутильного колебания РФ

$$\Omega_0 = \omega_\Lambda \sqrt{s_1} \quad (12)$$

Подставляя значения коэффициентов k_1, k_2, k_{10}, k_{12} и s_1 из источника [4], находим расчетную формулу для критической скорости в виде

$$V_k = \Omega_0 \sqrt{\frac{\pi R^2 P_{\text{всп}} C_{L1}}{4g \rho d_\Gamma^2 [2C_{M1}(C_{D0} + C_{L0}) - C_{M0} C_{L1}]}} \quad (13)$$

где: g – ускорение силы тяжести, ρ –

плотность воздуха, R – радиус расщепления, d_Γ – характерный размер сечения обледенелого провода (при расчетах в качестве характерного размера сечения можно принять диаметр провода), $C_{M0}, C_{M1}, C_{D0}, C_{L0}, C_{L1}$ – стационарные аэродинамические коэффициенты (аэродинамического момента, лобового давления и подъемной силы).

Следует отметить, что расчетная формула (13) применима при выполнении условия

$$2C_{M1}(C_{D0} + C_{L0}) - C_{M0} C_{L1} > 0 \quad (14)$$

Для конкретных профилей аэродинамические коэффициенты определяются экспериментально (путем продувки данного образца в аэродинамических трубах). Если известны стационарные аэродинамические коэффициенты осадки и параметры линий, то по формуле (13) определяем критическую скорость ветра, приводящую к прекращению однополуволновой пляски проводов расщепленной фазы.

Результаты и их обсуждение

Аналитический расчет выполнен для расщепленной фазы (РФ) с радиусом расщепления: $R = 0,28$ м (для $n = 4$) и $R = 0,23$ м (для $n = 3$);

Марка провода АСО - 330/39 со следующими характеристиками: модуль Юнга $E = 7700$ ДаН/мм²; диаметр провода $d_{II} = 24$ мм; площадь поперечного сечения провода $F = 339,6$ мм²; вес единицы длины провода (без гололеда) $P_{вер} = 1,132$ ДаН/м;

При расчете приняты: плотность воздуха $\rho = 0,11 \frac{\text{ДаН} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$; характерный размер сече-

ния провода с гололедом $d_{Г} \approx d_{II}$; напряжение провода $\sigma = \frac{T}{F} = 8,0 \frac{\text{ДаН}}{\text{мм}^2}$; (T – натяжение

провода); аэродинамические коэффициенты: $C_{M0} = 1$; $C_{M1} = 2,6$; $C_{L0} = 4$; $C_{L1} = 12$; $C_{D0} = 1$;

Как следует из рисунка 2, зависимость критической скорости ветра от длины пролета нелинейная. Прекращения колебательного процесса в коротких пролетах происходят при более высоких скоростях ветра, то есть пляска проводов в коротких пролетах наблюдается при более широком диапазоне изменения скорости ветра. С увеличением длины пролета величина критической скорости, приводящая к прекращению пляски проводов, уменьшается.

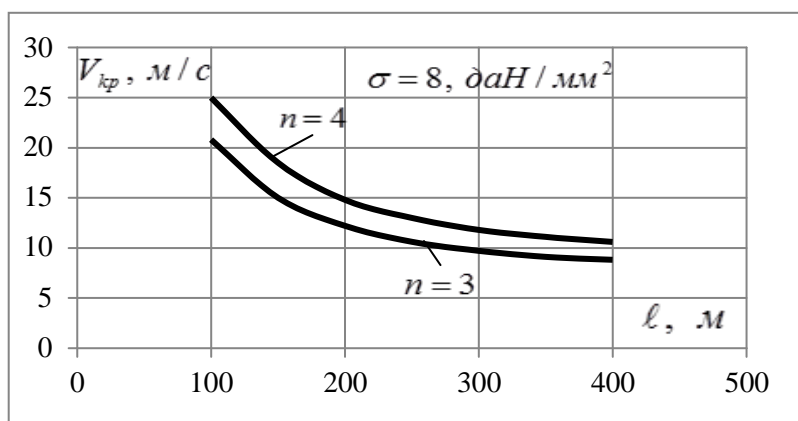


Рисунок 2 - Зависимость критической скорости ветра от длины пролета l и числа проводов в фазе n .

С увеличением числа проводов в фазе значение критической скорости возрастает. Например, для РФ из 3-х проводов критическая скорость составляет $V_k = 9$ м/сек (пролет $l = 400$ м), а для РФ из 4-х проводов при том же пролете критическая скорость возрастает до $V_k = 11$ м/сек.

Кроме того, на величину критической скорости влияют также аэродинамические коэффициенты, вес льда, частота свободного крутильного колебания РФ.

Заключение, выводы

С ростом частоты крутильного колебания РФ критическая скорость ветра увеличивается. Полученные расчетные формулы для определения критической скорости используются при построении области аэродинамической устойчивости обледенелого провода в ветровом потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчевский Л.К. Математическое моделирование обтекания профиля и исследования его устойчивости в потоке по Ляпунову: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. -М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. -С.109.
2. Горин В.Я., Давидсон Н.Н., Марасина Е.А. Методика определения критической скорости ветра при пляске проводов воздушных ЛЭП. // Наукові праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика», вип. 9(158).-Донецьк, 2009.-С.52- 57
3. Bekbaev A.B., Dzhamanbaev M.A., Abitaeva R., Karbozova A., Nabyeva G. Estimate of Maximum Expected Intensity of One-half-wave Lines Dancing.- International Scholarly and Scientific Research & Innovation waset.or. 24-11-2015. DUBAI UAE- № 17(11). - P. 1745-1747.
4. Джаманбаев М.А., Токенов Н. Математическая модель пляски расщепленной фазы воздушных линий электропередачи (анкерный пролет) /Труды II-международной научной конференции «Высокие технологии – залог устойчивого развития», 23-24 мая, 2013 / . – Алматы, КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2003, II том. С.39-43