

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕГРУЗОК НА УЗЛЫ КРЕПЛЕНИЯ ПРОВОДОВ ВЛ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ПОРЫВОВ ВЕТРА

Горин В.Я., Давидсон Н.Н., Давидсон С.Н.

Донецкий национальный технический университет

gorin@elf.dgtu.donetsk.ua

**Постановка задачи.** Чрезвычайная сложность явлений, имеющих место при обтекании воздухом различных тел, весьма затрудняет теоретический подход к решению встречающихся в аэродинамике задач. При теоретических выводах приходится делать ряд упрощений и допущений и постоянно сверять получаемые результаты с данными непосредственного опыта. Однако, несмотря на все эти упрощения, чисто математические трудности часто оказываются настолько большими, что общего решения вопроса о течении воздушных потоков вокруг проводов ВЛ найти не удастся, и приходится ограничиваться лишь частными случаями, имеющими практическое значение. Все же даже при решении этих частных задач приходится пользоваться сложным математическим аппаратом, применять методы теории функций, векторного анализа и т.п. Математический подход к явлению оказывается возможным лишь тогда, когда создается несколько упрощенная картина самого явления без учета побочных и второстепенных факторов. В этой связи практическая задача учета динамического характера порывов ветра при проектировании высоковольтных ВЛ представляется весьма актуальной.

**Анализ последних исследований.** В публикациях, посвященных колебаниям проводов высоковольтных ВЛ [1,2], в основном рассматриваются автоколебания проводов, хотя наибольшие нагрузки на провода возможны и при вынужденных колебаниях. Однако именно нагрузки при вынужденных колебаниях могут быть приняты в качестве исходных данных для проектирования ВЛ.

**Задача исследований.** Предложить общее решение задачи определения перегрузок на узлы крепления проводов ВЛ при вынужденных колебаниях провода, имеющих периодический характер.

**Изложение основного материала.** Как известно [2], порывы ветра вызывают дополнительные внешние нагрузки на конструктивные элементы воздушных линий электропередачи (ВЛ). При вычислении этих нагрузок в большинстве случаев принимают, что ВЛ являются абсолютно жестким телом. Однако такое допущение не всегда оправдано. Дело в том, что внешние, быстро прикладываемые загрузки (в том числе и порывы ветра), могут при определенных условиях возбудить колебания конструкции. При этом прогибы и напряжения в материале конструктивных элементов могут тем больше отличаться от статических, чем меньше время нарастания воздушного порыва по сравнению с периодом собственных колебаний конструкции.

В случае циклических порывов динамический эффект будет тем больше, чем ближе соответствуют друг другу частота собственных колебаний конструкции и частота порывов ветра. Для реальных конструкций возможно совпадение этих частот. Тогда амплитуды колебаний довольно быстро достигают установившихся резонансных значений. Это обстоятельство делает воздушные порывы весьма опасными ввиду возможности усталостного разрушения конструкции.

Ниже упрощенно рассматриваются вынужденные колебания проводов ВЛ, покрытых гололедом, при попадании их в зону циклических порывов ветра. При этом будем исходить из следующих предположений:

- возникают установившиеся резонансные колебания;
- вертикальная составляющая скорости порывов ветра меняется по синусоидальному закону (рис. 1):

$$U = U_0 \sin \Omega t, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – круговая частота циклических порывов.

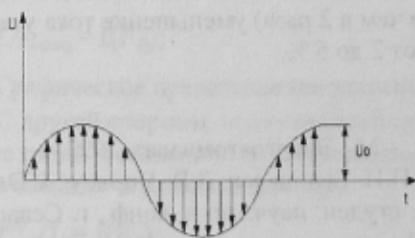


Рисунок 1 – Характер изменения вертикальной скорости ветрового порыва во времени

Периодически действующие потоки воздуха вызывают изменения углов атаки. В случае восходящих потоков углы атаки увеличиваются (рис. 2), вследствие чего возникают дополнительные аэродинамические силы  $q_U$ , изгибающие провод вверх.

При действии нисходящих потоков картина будет обратной, т.е. появятся аэродинамические силы  $q_U$ , направленные вниз.

Таким образом, периодически меняющиеся порывы вызывают аэродинамические силы  $q_U$ , возбуждающие колебания провода. Характер этих колебаний показан на рис. 3, на котором через  $f_{стат}$  и  $f$  обозначены соответственно статическая стрела провеса и прогиб провода.

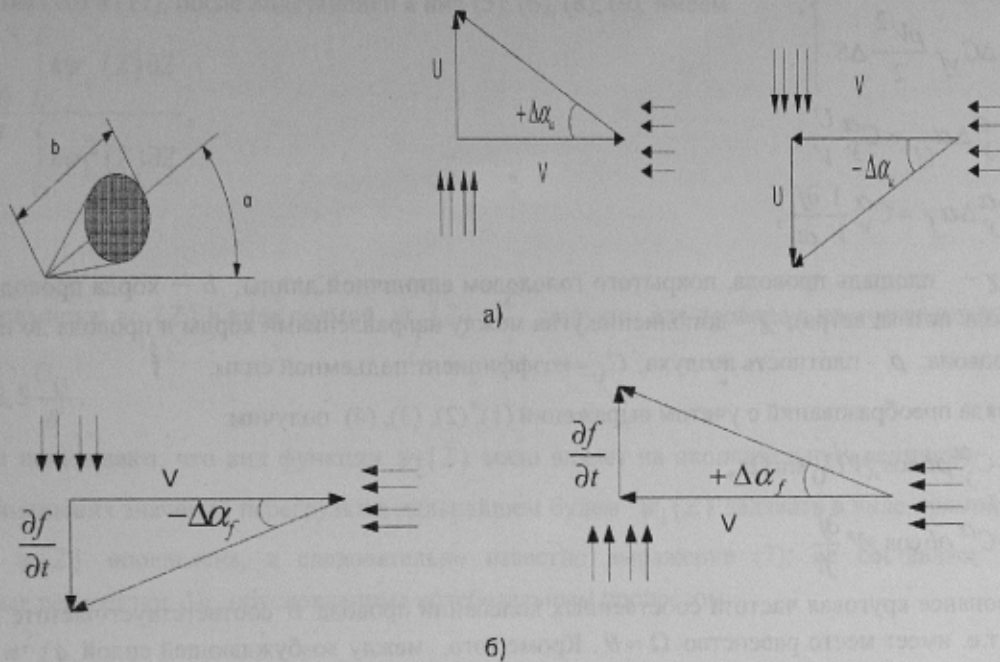


Рисунок 2 – Изменение углов атаки провода:  
а) за счет скорости порывов воздуха  $U$ ;

б) за счет скорости изгибных колебаний  $\frac{\partial f}{\partial t}$ .

В свою очередь, эти изгибные колебания порождают воздушные потоки, имеющие скорость, равную в данный момент времени скорости изгибных колебаний  $\frac{\partial f}{\partial t}$ , но направленную противоположно. К примеру, при движении несущей поверхности вниз, появляется относительная скорость воздуха  $\frac{\partial f}{\partial t}$ , направленная вверх. Суммируя скорость  $\frac{\partial f}{\partial t}$  со скоростью набегающего потока  $V$ , получим изменение углов атаки (см. рис. 2б), которые при движении несущей поверхности вниз увеличиваются, а при движении вверх – уменьшаются. Вследствие этого появляются дополнительные аэродинамические силы  $q_f$ , которые демпфируют (гасят) изгибные колебания несущей поверхности, так как они всегда направлены против ее движения.

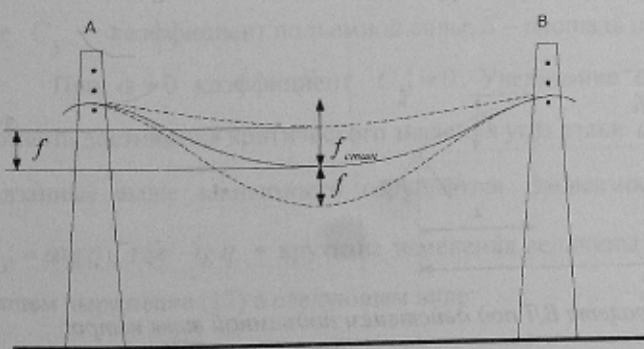


Рисунок 3 – Характер колебаний провода в пролете ВЛ

Таким образом, налицо как силы, возбуждающие колебания провода, так и силы, препятствующие им. Очевидно, характер колебаний будет зависеть от соотношения работ этих сил за один цикл.

В случае установившихся резонансных колебаний, которые и рассматриваются в настоящей статье, будет иметь место равенство работ возбуждающих и демпфирующих сил. Используя это условие, определим значения максимальных амплитуд, а также дополнительные перегрузки, вызванные наличием колебательного процесса.

Под перегрузкой в определенном направлении понимается число, показывающее, во сколько раз сумма внешних сил (исключая силу тяжести), действующих на провод в этом направлении, больше или меньше его веса.

Пользуясь коэффициентом перегрузки можно определить нагрузку на отдельные части провода в каждом отдельном случае. Для определения достаточно умножить соответствующий вес на перегрузку в направлении подъемной силы [3].

Выразим погонные возбуждающие и демпфирующие силы через параметры потока:

$$\left\{ \begin{aligned} q_U &= \Delta C_{yU} \frac{\rho V^2}{2} \Delta S \\ q_f &= \Delta C_{yf} \frac{\rho V^2}{2} \Delta S \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta C_{yU} = C_y^\alpha \Delta \alpha_U \approx C_y^\alpha \frac{U}{V}$ ; (3)

$$\Delta C_{yf} = C_y^\alpha \Delta \alpha_f = C_y^\alpha \frac{1}{V} \frac{\partial f}{\partial t}; \quad (4)$$

$\Delta S = b \cos \chi$  – площадь провода, покрытого гололедом единичной длины;  $b$  – хорда провода, покрытого гололедом (вдоль потока ветра);  $\chi$  – дополнение угла между направлениями хорды и провода до прямого угла;  $f$  – прогиб провода;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_y$  – коэффициент подъемной силы.

После ряда преобразований с учетом выражений (1), (2), (3), (4) получим:

$$q_U = \frac{1}{2} C_y^\alpha \rho b \cos \chi V U_0 \sin \Omega t, \quad (5)$$

$$q_f = \frac{1}{2} C_y^\alpha \rho b \cos \chi V \frac{\partial f}{\partial t}. \quad (6)$$

При резонансе круговая частота собственных колебаний провода  $\theta$  соответствует частоте циклических импульсов  $\Omega$ , т.е. имеет место равенство  $\Omega = \theta$ . Кроме того, между возбуждающей силой  $q_U \equiv \sin \Omega t$  и вы-

нужденными колебаниями сдвиг фаз обычно составляет величину, близкую к  $\frac{\pi}{2}$ . Последнее означает, что при максимальном значении возбуждающей силы прогиб провода  $f$  должен быть равен нулю. Поэтому прогиб можно представить в следующем виде:

$$f = \psi(Z) \cos \theta t, \quad (7)$$

Тогда

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\psi(Z) \theta \sin \theta t, \quad (8)$$

где  $\psi(Z)$  – функция, характеризующая распределение прогибов по длине пролета.

Функция  $\psi(Z)$  соответствует определенной форме изгибных колебаний. Выразим эту функцию через величину максимального прогиба  $f_0$  (рис. 4):

$$\psi(Z) = f_0 \psi_1(Z), \quad (9)$$

где  $\psi_1(Z)$  в отличие от  $\psi(Z)$  является некоторой безразмерной функцией.

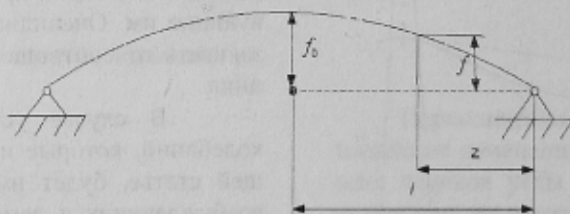


Рисунок 4 – Кривая изменения прогиба провода в пролете ВЛ под действием подъемной силы ветра

Прогиб  $f_0$  определим из условия равенства работ возбуждающих и демпфирующих сил за цикл. С учетом того, что работа, произведенная за бесконечно малый промежуток времени, равна силе, умноженной на скорость точки ее приложения  $\dot{f}_t = \frac{\partial f}{\partial t}$  или на время  $\partial t$ , можно записать:

$$A_{\text{возб}} = \int_0^l \int_0^T q U f(t) dt, \quad (10)$$

$$A_{\text{демпф}} = \int_0^l \int_0^T q_f f(t) dt, \quad (11)$$

Приравняв (10) и (11), после подстановки в них (5), (6), (8), (9), имеем:

$$f_0 = \frac{U_0}{\theta} \frac{\int_0^l k \psi_1(Z) dZ}{\int_0^l k \psi_1^2(Z) dZ}, \quad (12)$$

где  $k = C_y^\alpha b$ .

Аппроксимируя  $\psi_1(Z)$  в виде прямой  $\psi_1(Z) = \frac{Z}{l}$ , получим для провода с постоянными значениями  $k$ :

$$f_0 = -1,5 \frac{U_0}{\theta}. \quad (13)$$

Расчеты показывают, что вид функции  $\psi_1(Z)$  мало влияет на окончательную величину  $f_0$ . С целью получения наименьших значений перегрузки в дальнейшем будем  $\psi_1(Z)$  задавать в виде прямой. После того, как функция  $\psi(Z)$  определена, а следовательно известно выражение (7), не составляет труда найти дополнительные перегрузки  $\Delta n$ , обусловленные колебательным процессом:

$$\Delta n = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}. \quad (14)$$

Для провода, покрытого гололедом, с постоянной хордой по длине имеем:

$$f = -1,5 \frac{U_0}{\theta} \left( \frac{Z}{l} \right) \cos \theta t. \quad (15)$$

Поэтому

$$\Delta n = \frac{1,5}{g} U_0 \theta \left( \frac{Z}{l} \right) \cos \theta t. \quad (16)$$

При выводе расчетных формул предполагалось, что колебания точек подвеса провода на опоре отсутствуют. Однако это допущение в какой-то мере сказывается на качественной стороне явления, лишь незначительно влияя на численные результаты расчетов.

В заключение следует обратить внимание на необходимость учета такого фактора, как угол атаки ветра и связанного с ним понятия подъемной силы. Подъемная сила – это составляющая полной аэродинамической силы, перпендикулярная вектору скорости ветра. Она может быть определена по следующему выражению:

$$Y = C_y \rho S \frac{V^2}{2}, \quad (17)$$

где  $C_y$  – коэффициент подъемной силы;  $S$  – площадь поверхности провода, покрытого гололедом.

При  $\alpha = 0$  коэффициент  $C_y = 0$ . Увеличение  $\alpha$  вызывает рост подъемной силы. Это происходит до момента достижения критического значения угла атаки  $\alpha_{кр}$ , после чего происходит срыв воздушного потока, и указанные выше зависимости нарушаются. Зависимость  $C_y(\alpha)$  может быть принята линейной, тогда  $C_y = \alpha \text{tg} \eta$ , где  $\text{tg} \eta$  – крутизна изменения величины  $C_y$  при изменении угла  $\alpha$ . Обозначив  $\text{tg} \eta = C_y^\alpha$ , запишем выражение (17) в следующем виде:

$$Y = C_y^\alpha \frac{\rho V^2}{2} \alpha S. \quad (18)$$

Величина подъемной силы изменяется с изменением угла атаки  $\alpha$ . При  $\alpha = 0$  подъемная сила равна нулю. Величина  $\alpha_{\min}$ , при которой возможно движение провода, с учетом равенства подъемной силы ветра  $Y$  и веса провода  $G_n$  может быть получена из выражения (18):

$$\alpha_{\min} = \frac{2G_n}{C_y \rho V^2 S} \quad (19)$$

При максимально возможном угле атаки скорость ветра составит величину:

$$V_{\min} \geq \sqrt{\frac{2G_n}{\rho S C_y \alpha_{\max}}} \quad (20)$$

Итак, выражение (16) будет справедливо при скорости ветра  $V \geq \sqrt{\frac{2G_n}{\rho S C_y \alpha}}$  и  $C_y = C_y \alpha$ .

### Пример расчета

Найти максимальную добавочную перегрузку в середине пролета ВЛ ( $Z = l$ ) с проводом, покрытым гололедом, при циклических порывах ветра, если  $U_0 = 4,5 \text{ м/с}$  и число колебаний провода в секунду составляет  $\vartheta = 1$ ; при этом определить, насколько возросли вертикальные реакции в точках подвеса провода на опоре.

*Решение.* При условии, что горизонтальная скорость ветра  $V_{\min} \geq \sqrt{\frac{2G_n}{\rho S C_y \alpha_{\max}}}$  и  $C_y = C_y \alpha$  при

$\cos \theta t = 1$  и с учетом  $\theta = 2\pi\vartheta$  имеем:

$$\Delta n = \frac{1,5}{g} U_0 2\pi\vartheta = \frac{1,5}{9,8} \cdot 4,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 4,33$$

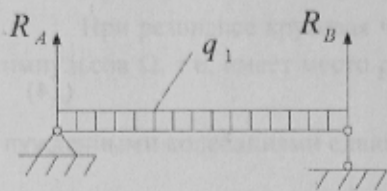


Рисунок 5 – Эюра для провода с равномерной нагрузкой

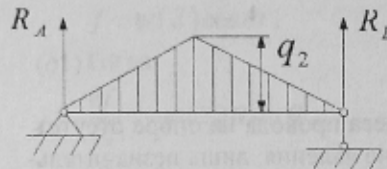


Рисунок 6 – Эюра для провода с треугольной симметричной нагрузкой

При равномерной нагрузке (рис. 5) имеем:

$$R_{A1} = R_{B1} = \frac{q_1 l}{2}$$

При колебаниях с треугольной симметричной нагрузкой (рис.6):

$$R_{B1} = R_{B2} = \frac{q_2 l}{2}$$

С учетом того, что

$$q_2 = q_1 n_y = q_1 (\Delta n + 1) = 5,33 q_1$$

имеем:

$$R_{A2} = R_{B2} = \frac{5,33 q_1 l}{4} = 1,33 q_1 l$$

Тогда вертикальная реакция возросла в  $\frac{R_{A2}}{R_{A1}} = \frac{1,33 q_1 l}{0,5 q_1 l} = 2,66$  раза.

**Вывод.** Приведенная методика может быть использована при выборе коэффициентов запаса по пределам прочности и выносливости материала узла крепления провода к опоре высоковольтной ЛЭП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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)]
2. Ржевский С.С. Пляска проводов ВЛ 6-750 кВ. Расчеты схлестываний и динамических напряжений. – Электрические станции №6, 2005. – С. 55-62.
3. Конструкция летательных аппаратов. Под ред. С.Н. Кана – М.: Оборонгиз, 1963. – 726с.