

УДК 621.315

ГАШЕНИЕ ПЛЯСКИ РАСЩЕПЛЕННЫХ ПРОВОДОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ

Климкович П.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Пляска проводов характеризуется большими амплитудами и динамическими нагрузками на элементы воздушных ЛЭП. При пляске может происходить схлестывание проводов и повреждение гирлянд и опор, так как она имеет продолжительный характер. Длительно действующие дополнительные нагрузки приводят к усталостным разрушениям проволок в проводе вблизи поддерживающих зажимов. Пляска расщепленных проводов вызывает износ проводов и разрушение распорок. Наиболее актуальными задачами изучения пляски проводов являются определение максимальных амплитуд колебаний, динамических усилий в элементах линий, а также разработка эффективных средств ее подавления. Исследование эффективности механических гасителей пляски проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ, США и Канаде. Например, разработанный в Бельгии новый демпфер пляски расщепленных проводов (TDD) [1] сочетает принципы расстройки маятниковой системой и демпфирования крутильных колебаний.

В докладе излагается численный метод расчета пляски расщепленных проводов с учетом комбинированных гасителей колебаний. Асимметричный гололедный осадок играет основную роль в изменении подъемных сил и моментов, действующих на колеблющиеся провода. Для исследования характеристик пляски использованы уравнения динамики проводов [2] в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y_c}{\partial t^2} + \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial y_c}{\partial t} - h \sin \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - h \cos \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 &= \frac{1}{\rho} \left(T \frac{\partial^2 y_c}{\partial s^2} + P_y \right); \\ \frac{\partial^2 z_c}{\partial t^2} + \frac{\delta}{\rho} \frac{\partial z_c}{\partial t} + h \cos \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - h \sin \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 &= \frac{1}{\rho} \left(T \frac{\partial^2 z_c}{\partial s^2} + P_z \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (I_c + \rho h^2) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 z_c}{\partial t^2} - \sin \theta_G \frac{\partial^2 y_c}{\partial t^2} \right] + f_c \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \\ = GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} + M_a + M_p, \end{aligned}$$

где y_c, z_c — проекции радиуса-вектора положения оси жесткости провода; T, θ, ρ — модуль тяжения, угол кручения и масса одного метра провода соответственно; δ — коэффициент демпфирования колебаний; $h[h_y, h_z]$ — эксцентриситет провода; $\theta_G = \theta_0 + \theta$ (θ_0 — начальный угол оледенения провода); P_y, P_z — проекции суммарной силы на единицу длины провода; I_c — момент инерции кручения провода, покрытого гололедом; f_c — коэффициент трения кручения провода; GJ — его крутильная жесткость; M_a — аэродинамический момент на единицу длины провода; M_p — момент, создаваемый эксцентричной силой тяжести единицы длины провода.

При пляске проводов изменения аэродинамических сил и моментов, действующих на провода с односторонним гололедом, обусловлены изменением угла атаки, который определяется по выражению:

$$\theta_a = \theta_0 + \theta + \arctg \frac{V_r}{V}, \quad (2)$$

где V — скорость ветра; $\bar{V}_r = \bar{V} - \frac{d\bar{R}_c}{dt} [V_y, V_z]$ — вектор результирующей скорости провода.

Аэродинамические силы и момент определяются в функции [2]:

$$\begin{aligned} F_y &= 0,5 \rho_a V_r D (V_y C_D + V_z C_L) \\ F_z &= 0,5 \rho_a V_r D (V_z C_D + V_y C_L), \\ M_a &= 0,5 \rho_a C_M V_r^2 D^2 \end{aligned} \quad (2)$$

где C_D, C_L, C_M — аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и аэродинамического момента [3]; D — диаметр провода; ρ_a — плотность воздуха.

Полученная система уравнений (1) используется для расчета динамики /-го провода на участке между гасителями расщепленной фазы (РФ). Элементы проводов, зафиксированные в их зажимах, двигаются совместно с гасителями. Возможны два подхода к математическому описанию динамики гасителей. В первом случае на основе принципа связей рассматривается их динамика под действием приложенных от проводов сил и моментов. Второй подход к описанию динамики элементов проводов с гасителями заключается в использовании принципов моделирования РФ на основе эквивалентного провода с использованием уравнений (1), в которых GJ и I представляют собой крутильную жесткость и момент инерции эквивалентного провода.

Формулы для их расчета приведены в [2, 4]. На основе принципов связей и суперпозиции составляются уравнения движения центра масс гасителя и вращения вокруг него, а также вращения маятника вокруг оси упруговязкого шарнира под воздействием приложенных от проводов сил и моментов:

$$M \frac{d^2 z_c}{dt^2} - M_p l_p \left[\sin \theta_p \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 - \cos \theta_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} \right] - \\ - M_p l_b \left[\sin \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 - \cos \theta_b \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} \right] = \sum_{j=1}^n \Delta T_{\theta_j};$$

$$I'_s \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} + M_p l_p l_b \left[\cos(\theta_p - \theta_b) \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} - \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right] + \\ + M_p l_b \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos \theta_b - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin \theta_b \right) = \\ = f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} + c(\theta_p - \theta_b) + \sum_{j=1}^n (M_{\theta_j} + M_{\Delta T_j}) - P_p l_b \sin \theta_b;$$

$$I'_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + M_p l_p l_b \left[\cos(\theta_p - \theta_b) \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} + \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right] + \\ + M_p l_p \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos \theta_p - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin \theta_p \right) = \\ = -f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} - c(\theta_p - \theta_b) - P_p l_p \sin \theta_p,$$

где $M = M_s + M_p$; $I'_s = I_s + M_p l_b^2$; $I'_p = I_p + M_p l_p^2$.

Вычислительный эксперимент проводился с помощью компьютерной программы (КП), которая используется для расчета амплитуд и максимальных тяжений при пляске расщепленных проводов. Расчеты проводились с учетом дистанционных распорок и гасителей колебаний для проводов с асимметричным гололедным осадком. Результаты расчета по разработанной КП сравнивались с данными [5] (рис. 1).

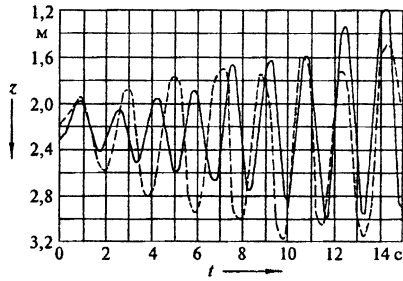


Рис. 1. $l=144$ м; $T_0=30$ кН; провод $2 \times \text{ACSR-240}$; $h=15$ мм

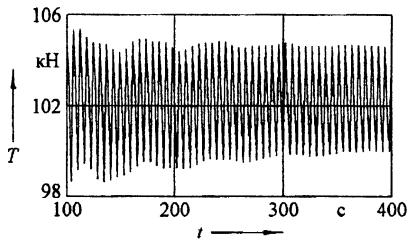


Рис. 2.

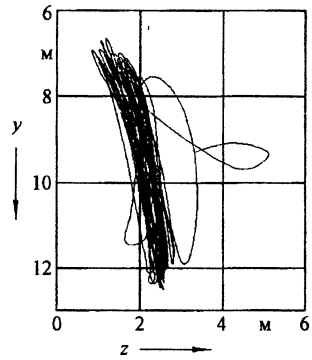


Рис. 3.

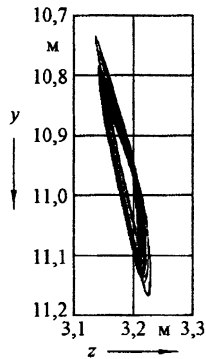


Рис. 4.

В качестве примера также проведен расчет пляски расщепленного провода 3·АС–240/56 ЛЭП 500 кВ $l = 480$ м, $T_0 = 97,5$ кН, $V = 10$ м/с и $\theta_0 = -140^\circ$ (гололед располагался с наветренной стороны проводов). Рассматривалось поведение фазы при наличии 3-х гасителей типа TDD [1], установленных в пролете на равных расстояниях друг от друга. Результаты расчетов, проведенных при различных параметрах гасителей, приведены на рис. 2–7. Как видно (см. рис. 3, 5 и 7), при определенном соотношении параметров гасителя можно ограничить максимальное тяжение, амплитуду колебаний и углы закручивания проводов до очень небольших значений.

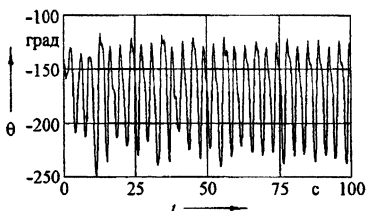


Рис. 6.

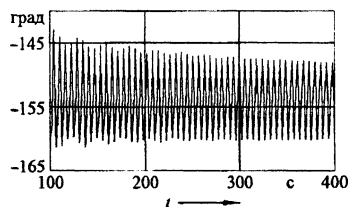


Рис. 7.

Таким образом, разработанный численный метод расчета динамических характеристик пляски расщепленных проводов воздушных ЛЭП с учетом комбинированных гасителей колебаний, подтвержденный сравнением с зарубежными данными, может быть использован при разработке оптимальных схем установок гасителей с различными параметрами, технических требований на линейную арматуру, обеспечивающих ее надежную работу в условиях эксплуатации.

Литература

1. Lilien J. L., Heuntgen R. A new damper to solve galloping on bundled lines. Theoretical background, laboratory and field results. – IEEE Summer meeting, July, 20–24, 1997. Berlin, Germany.
2. Сергей И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 21–32.
3. Lilien J. L., Ercicum M., Wolfs M. Overhead Line Galloping, field Experience during one event in Belgium on Last February 13th, 1997. IWAIS '98. International Conference, Reykjavik, Iceland, June 1998, proceedings. – P. 293–299.
4. Wang I., Lilien J. L. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span – 3-DOF-Model, some Application and design recommendations // IEEE Transaction on Power Delivery. – Vol. 13, № 3. – 1998. – P. 909–916.

5. Yamaoka A. Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a bundle conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – В99. – № 9. – P. 569–576.

УДК 621.315

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАДИАЛЬНОЙ СЕТИ

Томкевич А. П., Янушкевич О. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь (apt@odu.energo.net.by)*

Одним из приоритетных направлений в исследовании задач нелинейных электрических цепей является расчет установившегося режима, требующий решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений. К сожалению, в настоящее время в большинстве случаев используются лишь итерационные методы нахождения неизвестных параметров установившегося режима. Обычно такие методы предполагают большой объем вычислительных работ и не всегда являются сходящимися. В связи с этим стала актуальной проблема разрешимости задачи нахождения параметров установившегося режима, что напрямую связано с получением аналитического решения. Ранее [1, 2] предпринимались попытки найти аналитическое решение задачи путем сведения системы нелинейных алгебраических уравнений к параметрическому уравнению. Однако адекватность решения такого уравнения реальному режиму сети определяется выбором значений неизвестных параметров, что в большинстве случаев требует ряда вычислительных экспериментов. Позже [3] для системы уравнений установившегося режима одной линии электропередачи (ЛЭП) получено не только аналитическое решение, но и критерий его существования, что невозможно было сделать методами [1, 2]. Настоящая работа продолжает исследования [3] для случая радиальной сети, состоящей из двух последовательных ЛЭП.

В качестве физической модели линий для расчета режима используем П-образную схему замещения ЛЭП. Это позволяет распространить полученные результаты на линии различного исполнения (кабельные или воздушные) и всевозможных номинальных напряжений.