

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЯСКИ ОДИНОЧНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП И СРЕДСТВ ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И., инж. КЛИМОВИЧ П. И.

Белорусская государственная политехническая академия

Типичными условиями пляски являются сочетания односторонних гололедных отложений на проводах толщиной от 3 до 20 мм [1] и скоростей ветра 6–20 м/с, направленных под углом 45–90° к оси линии. 98 % пляски проводов приходится на одно-, двух- или трехполуволновые колебания преимущественно в вертикальной плоскости [2]. По данным СИГРЭ, до сих пор отсутствует надежный метод предотвращения и ограничения пляски проводов, воздействием которой обусловлено около 40 % всех аварий на ЛЭП. Современная практика нуждается в исследованиях динамических характеристик пляски проводов и способов повышения их аэродинамической устойчивости с помощью вычислительного эксперимента.

Наиболее актуальными практическими задачами пляски являются определение максимальных амплитуд и динамических усилий в элементах линий, а также разработка эффективных и экономических средств подавления пляски и предупреждения вызываемых ею повреждений. Наибольшее число случаев пляски приходится на высоковольтные линии (ВЛ) 35 и 110 кВ в пролетах от 100 до 200 м [3]. В большинстве случаев одно- и двухполуволновые колебания с двойной амплитудой не превышают 4 м. На ВЛ 220 кВ наблюдалась пляска с двойными амплитудами 3–6 м [3]. Для ограничения и подавления пляски проводов предложены эксцентричные грузы [3], комбинированное применение как вертикальных, так и горизонтальных маятников, при котором повышается надежность их работы при любых эксплуатационных воздействиях на элементы ВЛ, эффективность гашения пляски наиболее опасных форм колебаний с одной и двумя полуволнами в пролете.

Указанные способы гашения пляски практикуются за рубежом. Координированные программы исследований проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ (CORECH), США (EPRI), Канаде (Ontario Hydro)

и Японии (Fujikura Ltd.). На основе математических моделей сформулированы расчетные критерии действия компенсаторов колебаний проводов при их пляске и разработана система для подавления пляски с помощью эксцентричных грузов. Сравнительный анализ методов защиты проводов ВЛ от воздействий пляски показывает, что наиболее точно этот вопрос решается при обосновании метода использованием строгих математических моделей и вычислительного эксперимента. Примером могут служить работы [2, 4].

Возбуждение пляски проводов обусловлено асимметричным гололедным осадком на них. Он играет основную роль в изменении подъемных сил и моментов, действующих на колеблющиеся провода. В статье использованы уравнения пляски проводов в вертикальной, горизонтальной плоскостях и уравнения их крутильных колебаний, полученные в предположении об отсутствии волны тяжения вдоль провода в пролете:

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

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

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

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

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

где θ_0 – начальный угол оледенения провода;

$\bar{V}_r = \bar{V} - \frac{d\bar{R}_c}{dt} [V_{ry}, V_{rz}]$ – вектор результирующей скорости провода.

АДС и АДМ определяются в функции скорости V_r :

$$\begin{aligned} F_y &= 0,5\rho_a V_r D (V_{ry} C_D + V_{rz} C_L); \\ F_z &= 0,5\rho_a V_r D (V_{rz} C_D + V_{ry} C_L); \\ M_a &= 0,5\rho_a C_M V_r^2 D^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где C_D , C_L , C_M – аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и АДМ.

При построении математической модели используются аэродинамические характеристики (АДХ): $C_M = f(\theta_a)$; $C_D = f(\theta_a)$; $C_L = f(\theta_a)$, полученные опытным путем в Бельгии и Японии для различных сечений проводов и характерных форм гололедного осадка.

На основе общих принципов математического моделирования динамики токоведущих конструкций получены уравнения динамики механического гасителя с маятником и упруговязким демпфером:

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 y_c}{dt^2} - \rho h \left[\cos(\theta_d + \theta_0) \left(\frac{d\theta_d}{dt} \right)^2 + \sin(\theta_d + \theta_0) \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} \right] - \\ - M_d l_d \left[\cos(\theta_d + \theta_{d0}) \left(\frac{d\theta_d}{dt} \right)^2 + \sin(\theta_d + \theta_{d0}) \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} \right] = \\ = \sum_{j=1}^2 \Delta T_{yj} + P_s + W_d + ds F_y; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 z_c}{dt^2} - \rho h \left[\sin(\theta_d + \theta_0) \left(\frac{d\theta_d}{dt} \right)^2 - \right. \\ \left. - \cos(\theta_d + \theta_0) \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} \right] - \\ - M_d l_d \left[\sin(\theta_d + \theta_{d0}) \left(\frac{d\theta_d}{dt} \right)^2 - \cos(\theta_d + \theta_{d0}) \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} \right] = \\ = \sum_{j=1}^2 \Delta T_{zj} + ds F_z; \\ I_s \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} + M_d l_d \times \\ \times \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos(\theta_d + \theta_{d0}) - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin(\theta_d + \theta_{d0}) \right) = \\ = -f \frac{d\theta_d}{dt} - c\theta_d + M_\theta - W_d l_d \sin \theta_d, \end{aligned}$$

где

$$M = M_d + \rho; \quad I_s = I_d + M_d l_d^2;$$

$$M_\theta = M_1 + M_2 = GJ \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial s} \right)_1 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial s} \right)_2 \right].$$

В общем случае математическая модель пляски одиночных проводов включает уравнения динамики проводов, поддерживающих гирлянд изоляторов (ГИ) в промежуточном и натяжных – в анкерном пролетах. При совместном решении уравнений их динамики краевые условия определяются из уравнений движения установленных по концам пролета ГИ. При наличии гасителей они разбивают провода на участки. Положение концов i -го участка провода и зажимов i -го и $(i+1)$ -го гасителей колебаний совпадают. Поэтому координаты и углы поворота концов участков проводов определяются из решения системы уравнений (4). В уравнении начального закручивания провода обязательно учитываются моменты, обусловленные наличием в определенных узлах сетки численного решения задачи механических гасителей колебаний.

Вычислительный эксперимент с помощью разработанных компьютерных программ (КП)

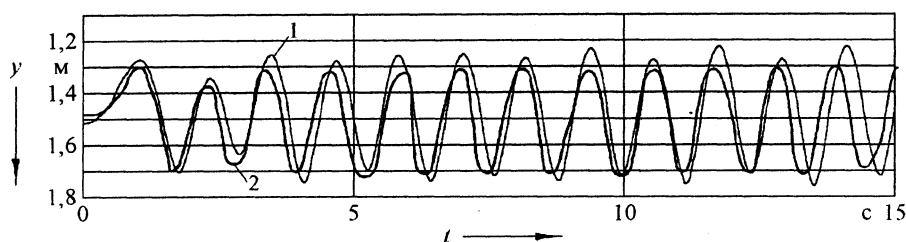


Рис. 1. Колебания проводов в вертикальной плоскости:
1 – расчет по КП; 2 – [4]

позволяет найти амплитуды, максимальные тяжения, а также определить развитие автоколебаний или их затухание для различных схем установки механических гасителей и их параметров. Сравнение результатов расчета по КП и [4], приведенное на рис. 1, подтверждает достоверность разработанных математической модели и алгоритма расчета пляски одиночных проводов. Хорошее совпадение характеристик процесса колебаний проводов наблюдается при наличии механических гасителей колебаний. Указанное обстоятельство позволяет использовать КП для оценки эффективности гашения пляски с помощью механических гасителей и выбора схем их установки в пролетах воздушных ЛЭП с одиночными проводами.

ВЫВОД

Разработан универсальный численный метод расчета динамических характеристик пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП напряжением 35–220 кВ при комбинировании различных

принципов конструирования механических гасителей, отличающийся учетом начального закручивания проводов. Используя численное моделирование, можно разработать конкретные схемы установки механических гасителей для воздушных ЛЭП с различными физико-механическими параметрами и геометрическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкая Е. М., Саввантов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10–750 кВ // Электрические станции. – 1987. – № 2. – С. 36–40.
2. Wang I., Lillen 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.
3. Ловецкая Е. М., Саввантов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 48–51.
4. The Simulation. Method of Galloping of Overhead Transmission Line // Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. – Joint Meeting of UNPEDE, CORECH-Galloping, 1983, Kyoto, Japan.

УДК 621.311

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Канд. техн. наук ФУРСАНОВ М. И., инж. ЗОЛОТОЙ А. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Одной из основных задач службы режимов электросетевых предприятий является расчет установившихся режимов замкнутых электрических сетей. В Республике Беларусь данные расчеты выполняются с использованием зарубежных программ высокого уровня, таких как, например, пакет RASTR, разработанный в УПИ

(г. Екатеринбург) и много лет эксплуатируемый в энергосистемах стран СНГ. В настоящее время ситуация существенно не изменилась. По-прежнему на обновление и сопровождение импортных программных продуктов, поддержание их работоспособности неоправданно тратятся государственные валютные средства, в то