

УДК 621.315

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЛЯСКИ ОДИНОЧНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП, ОСНАЩЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ

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

Белорусский национальный технический университет

Инж. ЦВЕТКОВ Ю. Л.

ЗАО «Электросетьстройпроект» (Москва)

Среди экспертов СИГРЭ сложилось твердое убеждение, что до сих пор отсутствует надежный метод предотвращения и ограничения пляски проводов. Это подтверждают многочисленные аварии на воздушных ЛЭП различных классов напряжения [1–3]. Существуют разные способы предотвращения и ограничения колебаний проводов при пляске. В настоящее время большое внимание уделяется механическим гасителям пляски, оснащенным устройствами демпфирования [4]. Наиболее простыми из предлагаемых механических устройств гашения пляски являются эксцентричные грузы, схемы размещения которых в пролетах были предложены в ОРГРЭС Л. В. Яковлевым [5]. Опыт их эксплуатации в энергосистемах подтвердил эффективность таких гасителей и в то же время выявил ряд конструктивных недоработок, по причине которых они не нашли широкого применения в СССР. В [2, 3] впервые предложена концепция комбинированного применения как вертикальных, так и горизонтальных маятников, которая имеет существенные преимущества по сравнению с методом эксцентричных грузов. Комбинированное применение вертикальных и горизонтальных маятниковых гасителей пляски повышает надежность их работы при любых эксплуатационных воздействиях на элементы ВЛ, эффективность гашения пляски наиболее опасных форм колебаний с одной и двумя полуволнами в пролете [3].

Рассмотренные выше способы гашения пляски практикуются и за рубежом. Координированные программы исследований эффективности механических гасителей пляски проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ (CORECH), США (EPRI) и Канаде (Ontario Hydro). Метод эксцентричных грузов был успешно использован специалистами японской фирмы Fujikura Ltd. [4], прошел проверку в полевых условиях и был реализован в энергосистемах Японии.

Для расщепленных проводов используются распорки с вращающимися зажимами, рядом с которыми установлены эксцентричные грузы, как и на одиночных проводах. Комбинация различных способов подавления пляски проводов используется за рубежом [6, 7]. В разработанной профессором Лильеном конструкции нового демпфера пляски расщепленных проводов сочетаются принципы расстройки маятниковой системой и демпфирования крутильных колебаний с помощью резиновых вкладышей. Новый гаситель прошел успешные испытания в полевых условиях и рекомендуется для применения на воздушных ЛЭП. Для теоретического обоснования гасителя профессор Лильен использовал новую теорию эквивалентной крутильной жесткости расщепленной фазы [8].

Сравнительный анализ методов защиты проводов ВЛ от воздействий пляски показывает, что наиболее точно этот вопрос решается при обосновании метода с использованием строгих математических моделей и вычислительного эксперимента. Примером могут служить работы Лильена [8] и Ямаока [9]. В статье излагается численный метод расчета пляски проводов, оснащенных эксцентричными грузами. При построении модели расчета и оценки ее достоверности используются сведения, заимствованные из [4, 10]. На основе принципов математического моделирования динамики токоведущих конструкций, предложенных в [11], авторами статьи получены уравнения динамики механического гасителя с маятником и упруго-вязким демпфером для одиночного провода:

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

$$I_s \frac{d^2 \theta_d}{dt^2} + M_d l_d \left(\frac{d^2 z_c}{dt^2} \cos(\theta_d + \theta_{d0}) - \frac{d^2 y_c}{dt^2} \sin(\theta_d + \theta_{d0}) \right) =$$

$$= -f \frac{d\theta_d}{dt} - c\theta_d + M_\theta - W_d l_d \sin \theta_d,$$

где

$$M = M_d + \rho;$$

$$I_s = I_d + M_d l_d^2;$$

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

При наличии гасителей провод разделяется на участки. По концам i -го участка провода, ограниченного i -м и $(i+1)$ -м гасителями, краевые условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{R}_i(l_i, t) &= \bar{\mu}_1(\bar{R}_i, \theta_i, t); \\ \bar{R}_{i+1}(l_{i+1}, t) &= \bar{\mu}_2(\bar{R}_{i+1}, \theta_i, t); \\ \theta_i(l_i, t) &= \mu_3(\bar{R}_i, \theta_i, t); \\ \theta_{i+1}(l_{i+1}, t) &= \mu_4(\bar{R}_{i+1}, \theta_{i+1}, t); \quad i = 1, 2, \dots, p, \end{aligned} \tag{2}$$

где l_i, l_{i+1} – дуговые координаты i -го и $(i+1)$ -го гасителей колебаний в пролете воздушной ЛЭП соответственно; $\bar{R}_i(l_i, t), \bar{R}_{i+1}(l_{i+1}, t), \theta_i(l_i, t), \theta_{i+1}(l_{i+1}, t)$ – векторы положения и углы закручивания концов i -го участка провода; p – число установленных в пролете гасителей колебаний.

Положение концов i -го участка провода и зажимов i -го и $(i+1)$ -го гасителей колебаний совпадают. Поэтому их координаты и углы поворота будут равны:

$$\begin{aligned} \bar{R}_i &= \bar{R}_{id}; & \bar{R}_{i+1} &= \bar{R}_{i+1,d}; \\ \theta_i &= \theta_{id}; & \theta_{i+1} &= \theta_{i+1,d}, \end{aligned} \tag{3}$$

где $\bar{R}_{id}, \bar{R}_{i+1,d}, \theta_{id}, \theta_{i+1,d}$ – радиусы-векторы мгновенного положения зажимов гасителей и углы их поворота соответственно.

Указанные значения \bar{R}_d и θ_d находятся из решения системы уравнений (1). Для крайних участков проводов в пролете положения их концов опре-

деляются мгновенными положениями поддерживающих гирлянд – с одной стороны и гасителей – с другой.

Таким образом, ставится нестационарная краевая задача пляски одиночных проводов с установленными механическими гасителями колебаний. Численное решение краевой задачи производится разностным методом по явной схеме. Начальные условия определяются положением фазы в момент, предшествующий колебаниям. При этом в уравнении начального закручивания провода необходимо учитывать моменты, обусловленные наличием в определенных узлах сетки численного решения задачи механических гасителей колебаний:

$$\frac{d^2\theta_0}{dS_0^2} = -\frac{1}{c^2} \left(M_{a0} + \frac{W_{d1}l_{d1} \sin \theta_{d1}}{h} + \dots + \frac{W_{di}l_{di} \sin \theta_{di}}{h} + \dots + \frac{W_{din}l_{dn} \sin \theta_{dn}}{h} \right), \quad (4)$$

где h – шаг численного решения дифференциального уравнения начального положения проводов по их длине, м; θ_{di} – заданные в исходных данных углы расположения гасителей по отношению к вертикальной оси y .

Таблица 1

Сравнение результатов расчета колебаний провода АС–95/16 при наличии механических гасителей: $l = 100$ м, $V = 20$ м/с, импульс ветра 25 м/с, время импульса 0,6 с, АДХ [10]

№ п/п	Демпфер				Характер колебательного процесса	Примечание
	Вес, кг	Момент инерции, кг·м ²	Количество	Схема установки		
1	20	0,00924	2	1/4; 3/4	Затухание	
2	12	0,00885	2	1/4; 3/4	Пляска	$Z_{\max}^{***} = 0,65^*/0,6^{**}$ м
3	3	0,00687	2	1/4; 3/4	Пляска	$Z_{\max} = 1,06/1,0$ м
4	3	0,00687	2	1/4; 15/24	Пляска	$Z_{\max} = 0,64/0,6$ м
5	3	0,00687	2	5/12; 15/24	Затухание	
6	3	0,00687	2	1/3; 2/3	Затухание	

* – расчет по КП.

** – расчет японских авторов [10].

*** – Z_{\max} – двойная амплитуда вертикальных колебаний провода.

Вычислительный эксперимент проводится с помощью разработанной компьютерной программы (КП) SINGDEMP, в которой реализован численный метод расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП. Он позволяет найти амплитуды, максимальные и минимальные тяжения, а также определить развитие автоколебаний или их затухание для различных схем установки механических гасителей и их параметров. Определение аэродинамических коэффициентов производится из каталогов опытных аэродинамических характеристик (АДХ) $C_M = f(\theta_a)$, $C_D = f(\theta_a)$ и $C_L = f(\theta_a)$.

Для оценки достоверности компьютерных расчетов результаты вычислительного эксперимента по SINGDEMP сравниваются с данными [10]. Наблюдается большое сходство характеристик процесса колебаний проводов при наличии механических гасителей колебаний с параметрами, приведенными в [10] (табл. 1). После этого КП SINGDEMP была применена для оценки эффективности гашения пляски с помощью механических гасителей и выбора схем их установки в пролетах воздушных ЛЭП с одиночными проводами. С использованием рекомендаций зарубежных авторов для выбора схем установки гасителей проведены многочисленные расчеты пляски одиночных проводов в пролетах ЛЭП 100, 200 и 300 м, оборудованных эксцентричными грузами.

Значительный практический интерес представляют величины углов установки механических гасителей по отношению к вертикальной плоскости, проходящей через провод. В литературе указаны их различные значения: например, Л. В. Яковлев [5] считает, что их значения могут не превышать 30...40°. Для проверки выполнен численный анализ влияния угла установки механических гасителей θ_{d0} на параметры пляски проводов для пролетов различной длины (рис. 1–3).

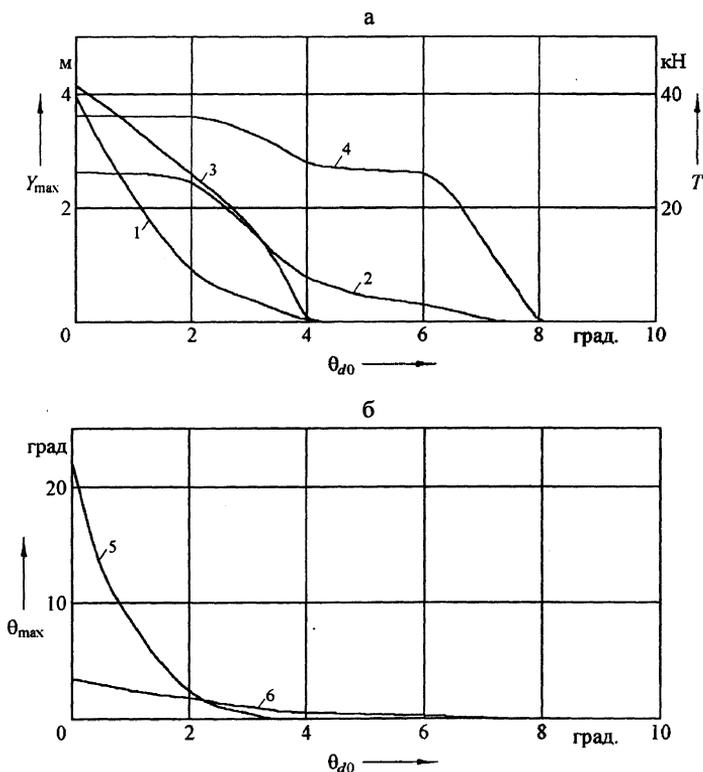


Рис. 1. Влияние θ_{d0} на динамические характеристики пляски: АС-240/56; $l=300$ м; $V=20$ м/с; $T_0=25$ кН; два гасителя по $W_d=12$ даН и плечом $l_d=0,05$ м; места их установки: 1/4 и 3/4; а – максимальные двойные амплитуды пляски Y_{max} , максимальные T_{max} и минимальные T_{min} тяжения; б – максимальные углы закручивания: 1 – Y_{max} ($V=20$ м/с); 2 – Y_{max} ($V=10$ м/с); 3 – T_{max} ($V=20$ м/с); 4 – T_{max} ($V=10$ м/с); 5 – θ_{max} ($V=20$ м/с); 6 – θ_{max} ($V=10$ м/с)

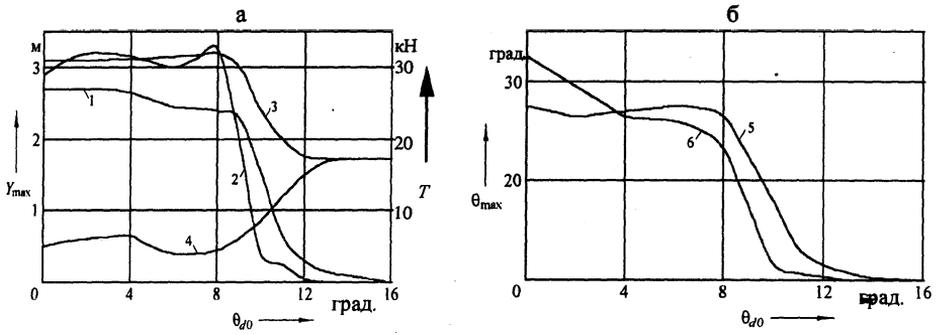


Рис. 2. Влияние θ_{d0} на динамические характеристики пляски: АС-240/56; $l = 200$ м; $V = 20$ м/с; $f_0 = 4,3$ м; $T_0 = 17,2$ кН; два гасителя по $W_d = 12$ даН; $l_d = 0,05$ м; 1 - Y_{max} (1/3, 2/3 пролета); 2 - Y_{max} (1/4, 3/4 пролета); 3 - T_{max} (1/3, 2/3 пролета); 4 - T_{min} (1/4, 3/4 пролета); 5 - θ_{max} (1/3, 2/3 пролета); 6 - θ_{max} (1/4, 3/4 пролета)

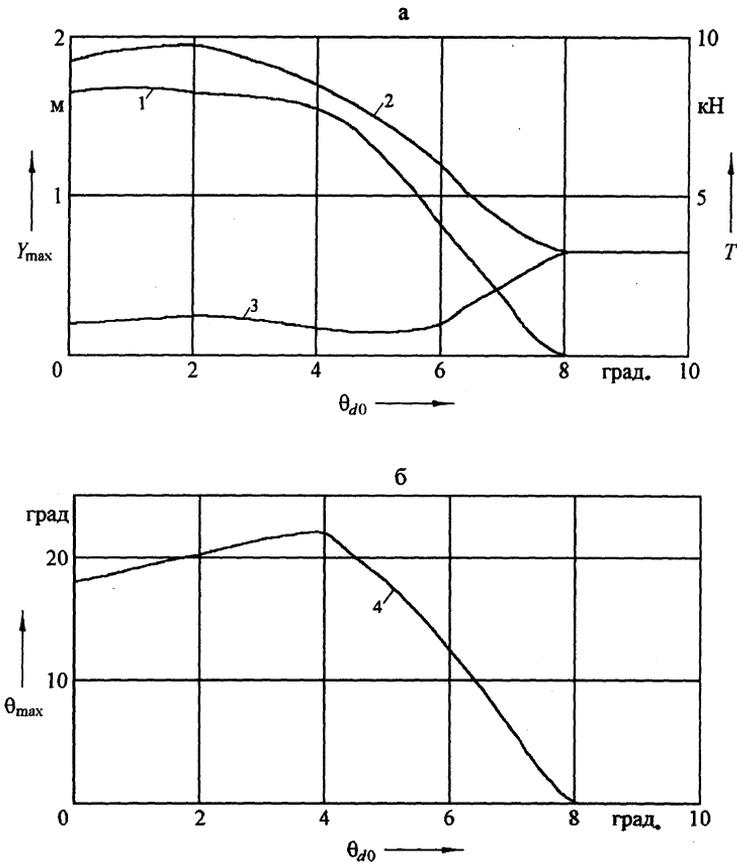


Рис. 3. Влияние θ_{d0} на динамические характеристики пляски: АС-95/16; $l = 100$ м; $V = 20$ м/с; $T_0 = 235$ даН; два гасителя по $W_d = 3$ даН; $l_d = 0,05$ м; 1 - Y_{max} ($V = 20$ м/с); 2 - T_{max} ($V = 20$ м/с); 3 - T_{min} ($V = 20$ м/с); 4 - θ_{max} ($V = 20$ м/с)

Как видно, уже при углах установки в 15° достигается полное затухание колебаний в рассмотренных здесь случаях для АДХ из [10]. При использовании АДХ из [7] полное затухание колебаний наступает лишь при углах установки гасителей $\theta_d \geq 45^\circ$ (рис. 4).

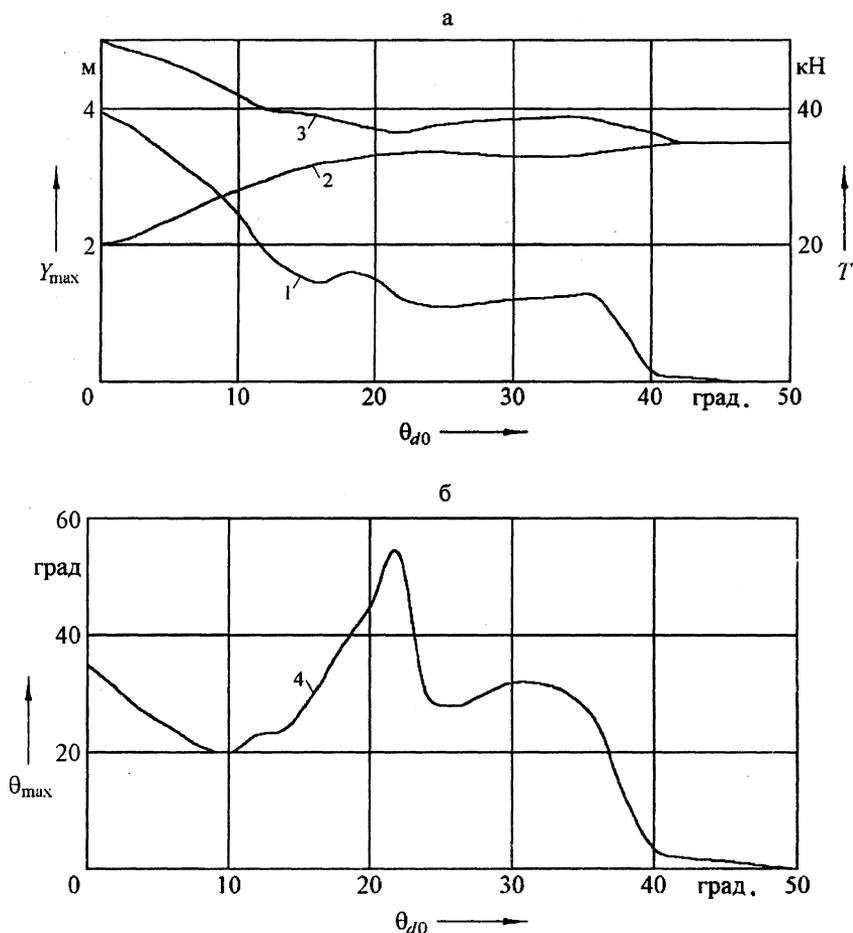


Рис. 4. Влияние θ_{d0} на динамические характеристики пляски: АС-300/39; $l=300$ м; $V=10$ м/с; $T_0=35$ кН; два гасителя по $W_d=12$ даН и плечом $l_d=0,05$ м; места их установки: 1/4 и 3/4; АДХ из [7]; а – максимальные двойные амплитуды пляски Y_{\max} , максимальные T_{\max} и минимальные T_{\min} тяжения; б – максимальные углы закручивания: 1 – Y_{\max} ; 2 – T_{\min} ; 3 – T_{\max} ; 4 – θ_{\max}

ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета пляски одиночных проводов, оснащенных механическими гасителями колебаний, отличающийся учетом начального закручивания проводов при установке горизонтальных гасителей. Многочисленные компьютерные расчеты хорошо согласуются с результатами японских исследователей.

2. Проведен вычислительный эксперимент по изучению применения эксцентричных гасителей для гашения пляски проводов в пролетах от 100

до 300 м. Получены предельные углы установки механических гасителей, при которых обеспечивается полное гашение пляски проводов. Используя численное моделирование, можно не только дать общие рекомендации по использованию механических гасителей, но и разработать конкретные схемы их установки для воздушных ЛЭП с различными физико-механическими параметрами и геометрическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкая Е. М., Савваитов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 48–51.

2. Пустыльников Л. Д., Шкапцов В. А. Метод гашения пляски проводов // Энергетика. Изв. АН России. – 1992. – № 6. – С. 74–81.

3. Пустыльников Л. Д., Шкапцов В. А. Аэродинамические неустойчивые колебания проводов воздушных ЛЭП с гололедными отложениями // Энергетика и транспорт. Изв. АН СССР. – 1991. – № 2. – С. 103–109.

4. Development of Galloping control device – eccentric weight method. – Fujikura Ltd., Tokyo, Japan.

5. Яковлев Л. В. Исследование пляски проводов воздушных линий / Тема ПС-52: обмен опытом по обеспечению надежности работы ЛЭП 110 кВ и выше, имея в виду в первую очередь мероприятия по предотвращению пляски проводов. Материал Советской части постоянной комиссии по электроэнергетике СЭВ. – М.: 1976.

6. 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.

7. Lilien J. L., Ericum 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.

8. 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.

9. Yamoka A. Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a bundle conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – B99. – № 9. – P. 569–576.

10. The Simulation Method of Galloping of Overhead Transmission Line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. – Joint Meeting of UNIPEDA, CORECH – Galloping, 1983, Kyoto, Japan.

11. 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.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 27.04.2002