

УДК 621.315

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЯСКИ ОДИНОЧНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

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

Белорусский национальный технический университет

Инж. ЦВЕТКОВ Ю. Л.

ЗАО «Электросетьстройпроект» (Москва)

Типичными условиями пляски являются сочетания односторонних гололедных отложений на проводах толщиной от 3 до 20 мм [1] или от 0,1 до 1,0 диаметра провода [2] и скоростей ветра 6...20 м/с, направленных под углом 45...90° к оси линии. При увеличении толщины гололеда больше диаметра провода пляска прекращается [2]. 98 % пляски проводов приходится на одно-, двух- или трехполуволновые колебания преимущественно в вертикальной плоскости [2]. Около 40 % всех гололедных аварий на ЛЭП обусловлены воздействием пляски проводов. Однако, по данным СИГРЭ, до сих пор отсутствует надежный метод предотвращения и ограничения пляски проводов. Обширную программу исследований пляски проводов воздушных ЛЭП осуществляют влиятельные международные энергетические организации: СИГРЭ, энергокомпании США, Канады, Европейского Союза, Японии и России.

Наиболее актуальными практическими задачами изучения пляски проводов являются определение максимальных амплитуд колебаний, динамических усилий в элементах линий, а также разработка эффективных и экономических средств ее подавления и предупреждения повреждений. Определение максимальных амплитуд пляски имеет большое практическое значение для выбора расположения проводов на опоре и определения их возможного приближения во время пляски к земле и пересекаемым объектам. Наибольшее число случаев пляски приходится на 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].

Возбуждение и поддержание пляски проводов обусловлены асимметричным гололедным осадком на них. Он играет основную роль в изменении подъемных сил и моментов, действующих на колеблющиеся

провода. Для исследования характеристик пляски в статье использованы уравнения динамики проводов при отсутствии волны тяжения вдоль провода в пролете. При таком подходе колебания проводов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также крутильные описываются следующими уравнениями [4]:

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

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

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

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 следующему выражению:

$$\theta_a = \theta_0 + \theta + \arctg \frac{V_{ry}}{V},$$

где θ_0 – начальный угол оледенения провода; V – скорость ветра;

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

Аэродинамические силы и момент определяются в функции скорости V_r [4]:

$$F_y = 0,5 \rho_a V_r D (V_{ry} C_D + V_{rz} C_L);$$

$$F_z = 0,5\rho_a V_r D (V_{rz} C_D + V_{ry} C_L); \quad (3)$$

$$M_a = 0,5\rho_a C_M V_r^2 D^2,$$

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

При построении математической модели используются аэродинамические характеристики (АДХ): $C_M = f(\theta_a)$; $C_D = f(\theta_a)$ и $C_L = f(\theta_a)$, полученные опытным путем для двух сечений проводов [5, 6] (рис. 1).

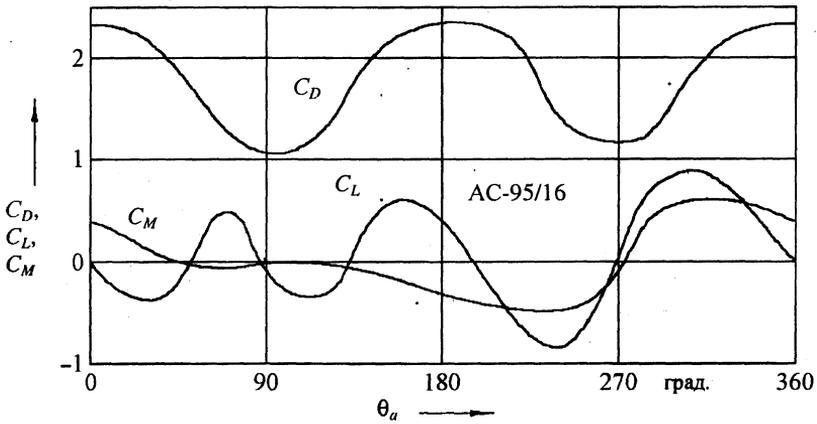


Рис. 1

Математическая модель пляски одиночных проводов включает уравнения динамики проводов, поддерживающих гирлянд изоляторов в промежуточном и натяжных (анкерном) пролетах. При совместном решении уравнений математической модели краевые условия для проводов определяются из уравнения движения установленных по концам пролета гирлянд. Для нахождения начального положения провода используются уравнения статики, полученные из уравнений их динамики исключением производных по времени. Вычислительный эксперимент проводится с помощью разработанной компьютерной программы (КП) GALSINGL, в которой реализован численный метод расчета пляски проводов воздушных ЛЭП на основе уравнений (1). Она позволяет найти амплитуды колебаний проводов при пляске, максимальные и минимальные тяжения, а также определить характер процесса: развитие автоколебаний или их затухание. В целях определения аэродинамических коэффициентов создан каталог опытных АДХ: $C_M = f(\theta_a)$; $C_D = f(\theta_a)$ и $C_L = f(\theta_a)$.

Для оценки достоверности расчетов по разработанной КП проводится их сравнение с данными японских исследователей, опубликованными в [5], для провода AC-95/16 в пролете длиной 100 м. Для возбуждения пляски используется пусковой импульс ветра. Запуск автоколебательного процесса выполняется при начальном угле оледенения, равном 90° , и $V = 10$ м/с. Сопоставление результатов численного расчета и данных [5] приводится на

рис. 2 и 3. Наблюдается подобие вертикальных колебаний и траекторий движения проводов. Разница в амплитудах пляски составляет не более 15 %. Более близкое совпадение результатов возможно при наличии всех данных о физико-механических параметрах провода и условиях расчета.

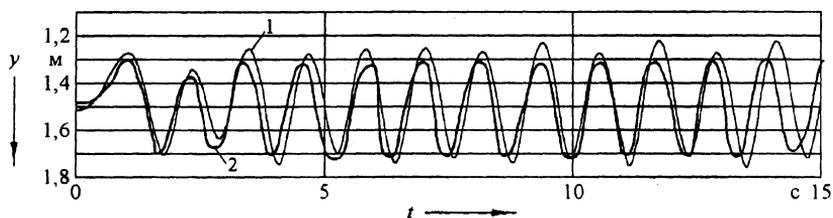


Рис. 2. Колебания проводов в вертикальной плоскости: 1 – расчет по КП; 2 – [5]

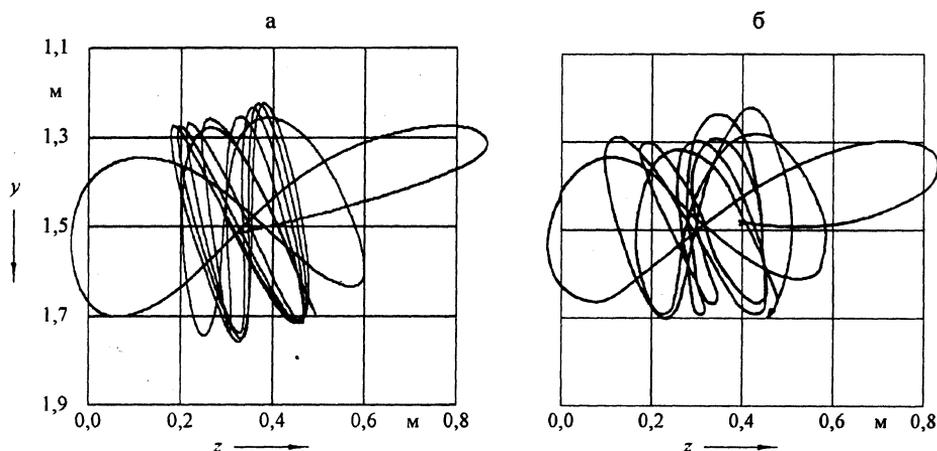


Рис. 3. Траектории движения проводов: а – расчет по КП; б – [5]

Существенное влияние на динамические характеристики пляски проводов оказывает профиль гололеда. Выделяются четыре семейства профилей: эллипс, клин, трапеция и случайные профили [7]. В каждом из них различают серии одной и той же относительной кривизны (относительная кривизна профиля – отношение максимальной кривизны профиля к его высоте). Наибольшее применение в мировой практике получили АДХ первого типа, которые успешно используются в Бельгии, Японии и России. При этом наблюдается хорошее согласование результатов численного расчета с экспериментальными данными.

В расчетах параметров пляски одиночных проводов использованы две АДХ зарубежных авторов: Nigol [5] и Lilien [6]. Первая из них обеспечивает моделирование пляски проводов при расположении гололедного осадка с подветренной стороны (при $\theta_0 \approx 90...115^\circ$), а вторая позволяет найти динамические характеристики пляски при расположении гололеда с наветренной стороны провода. Результаты расчета пляски одиночных проводов ВЛ 35...220 кВ номинальных сечений, применяемых в пролетах 100...300 м, приводятся в табл. 1. Получены двойные амплитуды вертикальных колебаний Y_{\max} , максимальные тяжения T_{\max} и углы закручивания проводов θ_{\max} для указанных пролетов различной длины l при разных θ_0 ,

начальных тяжениях T_0 и скоростях ветра. Двойная амплитуда вертикальных колебаний в соответствии с данными табл. 1 изменяется в диапазоне 0,5...4,0 м, а относительные изменения максимальных тяжений достигают двукратной величины. Максимальные углы закручивания проводов находятся в диапазоне 15...80°. В одном случае (табл. 1) наблюдалась трехполуволновая пляска. По сравнению с однополуволновой пляской Y_{\max} уменьшилась на 50 %, а T_{\max} – в 2 раза. Наибольшие колебания с характеристикой Nigol (рис. 1) имели место в пролете 300 м с проводом АС-300/39 при $T_0 = 3000$ даН, $\theta_0 = 98^\circ$ и $V = 20$ м/с (табл. 1).

Таблица 1

Результаты численного моделирования пляски
одиночных проводов воздушных ЛЭП 35...220 кВ

l, м	Марка провода	T_0 , даН	V, м/с	f_0^* , м	θ_0 , град.	Результаты расчета			
						Y_{\max}/f_0 , о. е.	T_{\max} , даН	T_{\min} , даН	θ_{\max} , град.
С использованием АДХ [5]									
100	АС-70/11	270	20	1,5	93	0,8	470	160	27
120	АС-95/16	350	20	1,97	94	0,76	535	230	35
180	»	500	20	3,12	98	0,49	770	310	50
100	АС-120/19	400	15	1,78	90	0,67	720	150	30
160	»	750	20	2,43	95	0,57	1000	590	38
220	АС-150/24	1400	20	3,02	90	0,45	1880	1165	70
300	»	2500	10	3,15	90	0,41	2675	2350	75
200	АС-240/56	1720	20	3,82	100	0,26	2230	1410	60
300	»	2500	20	6,0	100	0,27	3290	2100	62
300	АС-300/39	3250	10	4,78	90	0,39	3850	2680	36
300	»	3000	20	5,18	98	0,36	3850	2270	65
240	»	2000	20	4,98	98	0,37	2890	1580	60
С использованием АДХ [6]									
100	АС-95/16	400	10	13,7	-140	0,91	735	100	17
150	»	500	20	2,45	»	0,22**	760	320	83
200	»	750	10	2,9	»	0,64	1050	665	52
100	АС-150/24	400	»	2,2	»	0,7	915	100	15
100	»	325	»	2,7	»	0,16***	500	160	9
150	»	600	»	3,28	-137	0,44***	1270	320	54
250	»	1200	»	4,55	-140	0,67	1910	490	50
200	АС-240/56	2000	»	3,32	»	0,98	3530	550	16
250	»	3000	»	3,45	»	1,1	4545	2040	25
300	АС-300/39	3500	»	4,45	»	0,9	4955	2525	40
250	»	3000	»	3,6	»	0,94	4410	1080	25

* – стрела провеса провода;

** – трехполуволновая пляска;

*** – многополуволновая пляска.

Более существенными максимальными амплитудами колебаний и тяжениями проводов характеризуется пляска, полученная с использованием АДХ, заимствованной из [6]. Диапазон двойных амплитуд колебаний составляет 2...4 м, что соответствует наблюдаемым на ЛЭП 110...220 кВ величинам [1] (рис. 4).

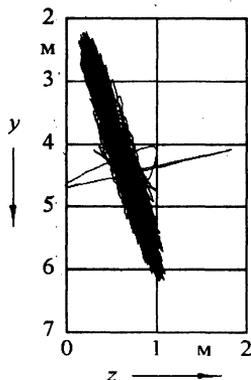


Рис. 4. Траектория движения провода АС-300/39: $l = 300$ м;
 $T_0 = 3500$ даН; $V = 10$ м/с

ВЫВОДЫ

1. Разработан универсальный численный метод расчета динамических характеристик пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП напряжением 35...220 кВ, основанный на уравнениях движения и вращения гибкой нити и опытных АДХ проводов с асимметричным гололедным осадком. Составлен каталог опытных АДХ проводов, который положен в основу компьютерного расчета пляски. Результаты расчетов различных динамических характеристик пляски согласуются с данными японских и бельгийских специалистов.

2. Вычислительным экспериментом по КП получены параметры пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП напряжением 35...220 кВ, близкие к результатам измерений на реальных воздушных ЛЭП. Полученная база данных может быть использована при разработке технических требований на линейную арматуру, обеспечивающих ее надежную работу в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкая Е. М., Савваитов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10–750 кВ // *Электрические станции*. – 1987. – № 2. – С. 36–40.
2. 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.
3. Ловецкая Е. М., Савваитов Д. С., Шкапцов В. А. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов // *Электрические станции*. – 1987. – № 4. – С. 48–51.
4. Сергей И. И. Математическое моделирование динамики гибких проводов расщепленных фаз ОРУ и воздушных ЛЭП // *Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ)*. – 1997. – № 11–12. – С. 11–19.
5. 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.
6. Lilien J. L., Erpicum 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.
7. Ржевский С. С. Профиль гололеда // *Электрические станции*. – 1972. – № 4. – С. 44–46.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 17.12.2001