УДК 621.315

ДВА ПОДХОДА К РАСЧЕТУ ПЛЯСКИ РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

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

Белорусский национальный технический университет

В процессе эксплуатации воздушных ЛЭП и ОРУ возникают динамические режимы, вызываемые ветром, гололедом и электродинамическими усилиями при коротких замыканиях. Они сопровождаются недопустимым сближением и даже схлестыванием проводов и тросов, нарушением механической прочности опор, а также усталостными повреждениями проводов и распорок. По указанной причине требуются устройства подавления и ограничения колебаний проводов.

Проблема динамики проводов становится актуальной в связи с совершенствованием конструкций электроустановок за счет сокращения габаритов ОРУ и воздушных ЛЭП. Поэтому при проектировании и эксплуатации современных электроустановок с гибкими проводами вопросы динамики проводов становятся в ряд приоритетных задач. Обширную программу исследований колебаний проводов осуществляют влиятельные международные энергетические организации: СИГРЭ, МЭК, энергокомпании США, Канады, Европейского Союза, Японии и России.

Пляска – серьезная проблема для механической части воздушных ЛЭП. По данным СИГРЭ, до сих пор отсутствует надежный метод предотвращения и гашения пляски проводов. По этой причине повсеместно увеличивают расстояния между проводами, проводами и тросами для предотвращения их опасного сближения и схлестывания при пляске. В настоящее время под эгидой ИНТАС (Европейский Союз) осуществляется международный исследовательский проект по ограничению пляски проводов воздушных ЛЭП с помощью комбинированных гасителей колебаний.

Пляска представляет собой самовозбуждающийся колебательный процесс с аэродинамической обратной связью, обусловленной изменением действующей на провод с гололедом подъемной силы при изменении угла атаки. Пляска относится к низкочастотным видам колебаний (0,15…1,0 Гц) и характеризуется значительными амплитудами [1]. Наиболее опасными для воздушных ЛЭП являются однополуволновые пляски проводов, при которых амплитуды их колебаний и тяжения максимальны [1]. Значительно реже встречаются двух-, трех- и четырехполуволновые пляски [2]. Но и в этом случае жесткостью провода на изгиб можно пренебречь, так как длина полуволны составляет, как минимум, несколько десятков метров. Поэтому в качестве расчетной модели провода может быть принята абсолютно гибкая, упругая, сопротивляющаяся кручению нить. Допускается, что деформации кручения проводов – упругие. Для проводов ЛЭП, имеющих относительную стрелу провеса менее 5 %, изменением тяжения вдоль пролета можно пренебречь [3].

Принципиальным фактором, обусловливающим возбуждение и поддержание пляски проводов, является асимметричный гололедный осадок на них. Он играет основную роль в изменении подъемных сил и моментов, действующих на колеблющиеся провода. Основные уравнения движения и кручения проводов с асимметричным гололедным осадком могут быть получены с использованием принципа Даламбера [4]:

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

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

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

где y_c, z_c – проекции радиус-вектора положения оси жесткости провода; θ – угол кручения провода; δ – коэффициент демпфирования колебаний; ρ – масса единицы длины провода после растяжения; $h[h_y, h_z]$ – эксцентриситет провода; $\theta_G=\theta_0+\theta$ (θ_0 – начальный угол оледенения провода); $\overline{P}$ – интенсивность внешней нагрузки на единицу длины провода; M_a – аэродинамический момент (АДМ) на единицу длины провода; T – модуль тяжения провода; I_c – момент инерции кручения провода, покрытого гололедом; f_c – коэффициент трения кручения провода; GJ – крутильная жесткость провода.

Система дифференциальных уравнений (1) описывает динамику гибкого провода с неравномерным крыловидным осадком при воздействии внешних распределенных сил и моментов. Для расчета колебаний по указанным уравнениям необходимы зависимости $\overline{P}=f(s_0,t)$ и $M_a=f(s_0,t)$. При пляске проводов изменения аэродинамических сил (АДС) и АДМ, действующих на провода с односторонним гололедом, обусловлены изменением угла атаки, который определяется по [5]. АДС и АДМ определяются в функции скорости v_r [4]. При построении математической модели используются АДХ C_L, C_D, $C_M=f(\theta_a)$, полученные опытным путем в Бельгии, России и Японии для различных сечений проводов и характерных форм гололедного осадка [6–9] (рис. 1).

В современных мощных энергосистемах получили широкое применение токоведущие конструкции с расщепленными фазами (РФ). Фаза представляет собой систему квазипараллельных гибких проводов, зафиксированных на заданном расстоянии в нескольких точках пролета дистанционными распорками.

На первом этапе исследований в качестве расчетной модели расщепленной фазы принимался пучок гибких упругих нитей, которые в заданных точках пролета соединялись между собой жесткими стержнями. Такая модель наиболее полно учитывает геометрические и физико-механические характеристики РФ в целом пролете.

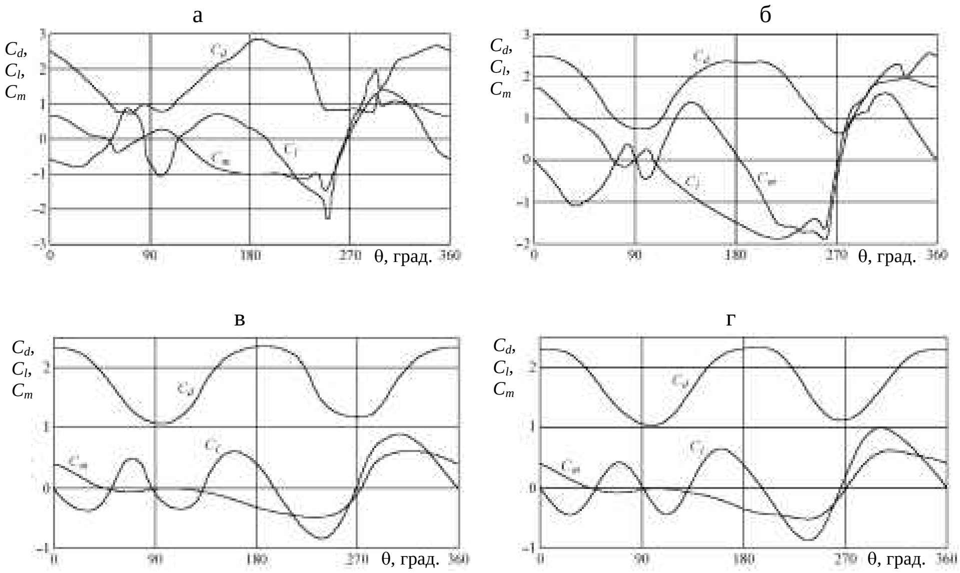

Рис. 1. Аэродинамические характеристики: а – провод ACSR-240;
б – ACSR-810; в – ACSR-95 (Nigol); г – ASM-620

Система дифференциальных уравнений (ДУ) (1) пригодна для расчета динамики j-го провода на участке между распорками. Элементы проводов, зафиксированные в зажимах распорки, двигаются совместно с ее твердым телом. Из-за фиксации проводов в зажимах распорок на провода в этих точках воздействуют также сосредоточенные силы, величины которых могут быть определены лишь с учетом упругих и инерционных характеристик распорок.

Математическое описание динамики РФ на основе такой модели включает уравнения поперечных и крутильных колебаний проводов и распорок, которые решаются совместно. В соответствии с принципом связей механики действие проводов на распорки заменяется реакциями связей. После этого распорка считается свободным телом, к которому приложены реакции связей проводов, являющиеся по отношению к ней внешними силами. Таким образом, в состав математической модели динамики РФ входят уравнения движения и кручения проводов (1), а также уравнения динамики распорок. В математическом отношении уравнения динамики проводов относятся к классу гиперболических ДУ второго порядка в частных производных. Динамика же распорок как жестких стержней описывается нелинейными обыкновенными ДУ второго порядка. Для совместного решения указанных уравнений ставится смешанная краевая задача Коши с краевыми условиями на распорках. Для участка j-го провода между i-й и $(i+1)$-й распорками, динамика которого описывается уравнениями движения проводов (1), краевые условия записываются в следующем виде:

$$\overline{R}_{ji}(l_i,\ t) = \overline{F_1}(t,\ \overline{R}_{ji},\ \theta_i)[y_{ij}(l_i,\ t) =$$

$$= F_{1y}(t,\ x_{ji},\ y_{ji},\ z_{ji},\ \theta_i);\ \ z_{ij}(l_i,\ t) = F_{1z}(t,\ x_{ji},\ y_{ji},\ z_{ji},\ \theta_i)];$$

$$\overline{R}_{ji+1}\left(l_{i+1},\ t\right) = \overline{F}_2\left(t,\ \overline{R}_{ji+1},\ \theta_{i+1}\right);$$

$$[y_{ij+1}(l_{i+1}, t) = F_{2y}(t, x_{ji+1}, y_{ji+1}, z_{ji+1}, \theta_{i+1})\ ; \qquad (2)$$

$$z_{ij+1}(l_{i+1},\ t) = F_{2z}(t,\ x_{ji+1},\ y_{ji+1},\ z_{ji+1},\ \theta_{i+1})];$$

$$\theta_i\left(l_i,\ t\right) = F_3\left(t,\ \overline{R}_{ji},\ \theta_i\right);$$

$$\theta_{i+1}\left(l_{i+1},\ t\right) = F_4\left(t,\ \overline{R}_{ji+1},\ \theta_{i+1}\right),\quad i = 1,\ 2,\ ...,\ p\ ,$$

где l_i и l_{i+1} – дуговые координаты *i*-й и $(i+1)$-й распорок соответственно в пролете; $\overline{R}_{ji}(l_i, t)$, $\overline{R}_{ji+1}(l_{i+1}, t)$, $\theta_i(l_i, t)$, $\theta_{i+1}(l_{i+1}, t)$ – векторы положения и углы закручивания концов *j*-го провода в *i*-м пролете; p – число установленных в фазе распорок.

Динамика концов *j*-го провода в *i*-м подпролете определяется движением зажимов *i*-й и $(i+1)$-й распорок под действием приложенных от проводов сил, так как одновременно эти точки принадлежат проводу:

$$\overline{R}_{ji}\left(l_i, t\right) = \overline{R}_{jis}\ ; \quad \theta_i\left(l_i, t\right) = \theta_{si}\ ;$$

$$\overline{R}_{ji+1}\left(l_{i+1}, t\right) = \overline{R}_{j,i+1,s}\ ; \quad \theta_{i+1}\left(l_{i+1}, t\right) = \theta_{si+1}\ , \qquad (3)$$

где $\overline{R}_{jis}$, $\overline{R}_{j,i+1,s}$, θ_{si}, θ_{si+1} – радиус-векторы мгновенного положения зажимов и углы поворота распорок.

Указанные краевые векторы и углы являются решением уравнений динамики распорки. Для проводов крайних подпролетов краевые условия определяются динамикой концевых устройств пролета. Для их расчета может быть использована расчетная модель концевого устройства в виде эквивалентного упругого консольного стержня. Поставленная таким образом смешанная задача Коши с краевыми условиями на распорках решается разностным методом по явной схеме.

При совместном решении уравнений динамики проводов и распорок необходимо согласовать шаги их интегрирования по времени. Для обеспечения устойчивости вычислительного процесса решения уравнений провода по явной схеме шаги интегрирования по s_0 и t должны быть выбраны таким образом, чтобы они удовлетворяли условию Куранта [3] в виде

$$\sqrt{\frac{EA}{\rho}}\,\frac{\tau}{h} < 1\,, \qquad (4)$$

где A – поперечное сечение провода; E – модуль упругости провода; h – шаг интегрирования по длине провода; τ – то же по времени.

Для выбора шага интегрирования обыкновенных ДУ второго порядка динамики распорки τ_s определяется собственная частота ее колебаний. В расчетной модели распорки небольшие массы ее элементов взаимодействуют с упругими реакциями проводов, заменяемых пружинами, жесткость c_s которых на растяжение очень высока и достигает $10^6...10^7$ Н/м. Поэтому приближенно собственная частота колебаний расчетной модели распорки [10]

$$f_s = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c_s}{M_s}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{10^6...10^7}{2...15}} \approx 40...350, \text{ Гц}, \tag{5}$$

где M_s – масса распорки.

Соответственно период колебаний будет равен $0{,}025...0{,}0028$ с. Так как τ_s составляет только часть периода, его величина может оказаться меньше, чем требуется по условию Куранта для проводов. При выбранном шаге τ_s численное решение уравнений динамики распорок производится методом Эйлера [11].

Вычислительный эксперимент проводится с помощью компьютерной программы (КП), в которой реализован численный метод расчета пляски проводов воздушных ЛЭП, основанный на расчетной модели расщепленной фазы в виде пучка проводов. Она пригодна для расчета амплитуд и максимальных тяжений колебаний расщепленных проводов с любой заданной кратностью расщепления. Расчеты проводятся с учетом ограничивающих пролет гирлянд изоляторов, дистанционных распорок разных типов и гасителей колебаний для проводов с асимметричным гололедным осадком. Для определения АДК создан каталог опытных АДХ.

Результаты расчета по разработанной КП сравнивались с данными [8]. В [8] численным методом изучалась пляска экспериментальной линии, выполненной проводами 2xACSR-240 длиной 144 м. Опытные АДХ этого провода получены для каплевидной формы гололедного осадка толщиной 15 мм. Запуск автоколебательного процесса производился пусковым импульсом ветра продолжительностью 1 с, скорость которого в 1,5 раза превышала расчетную скорость ветра. Развитие пляски проводов исследовалось на двух ветвях АДХ, имевших отрицательный наклон. Запуск колебательного процесса в зоне указанных характеристик выполнялся заданием начального угла оледенения, равным соответственно 0 и 95°. Расхождение между результатами расчета по КП и [8] составляет 10…15 %. В качестве примера на рис. 2 приведено сравнение вертикальных колебаний проводов фазы, полученных по КП и приведенных в [8] для $\theta_0 = 95°$.

Второй подход к математическому моделированию пляски расщепленной фазы основан на ее расчетной модели в виде эквивалентного провода, осью которого является линия центров масс поперечных сечений фазы [12]. Физико-механические параметры эквивалентного провода определяются параметрами составляющих фазу проводов:

$$T_e = \sum_{i=1}^{n} T_i\,;\ \rho_e = \sum_{i=1}^{n} \rho_i\,;\ A_e = \sum_{i=1}^{n} A_i\,;$$
$$\alpha_{ye} = \frac{1}{EA_e} = \frac{\alpha_y}{n};\ \alpha_{te} = \alpha_t\,, \tag{6}$$

где n – кратность расщепления фазы; α_y и α_t – коэффициенты упругого и температурного удлинений провода.

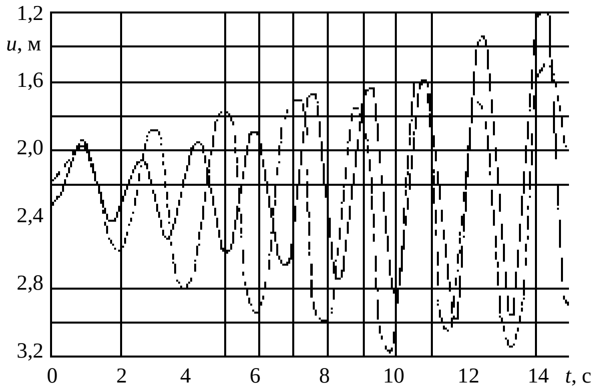

Рис. 2. Сопоставление вертикальных перемещений проводов фазы, полученных по КП и приведенных в [8]: —— – расчет по КП; – – – – данные [8]

Эквивалентный провод имеет одинаковую кривизну с проводами фаз. Длина эквивалентного провода принимается равной длине проводов РФ. Для получения уравнений динамики эквивалентного провода просуммируем уравнения динамики составляющих фазу проводов. При этом считаем, что действующие на них АДС, АДМ, а также углы закручивания равны между собой. Причем $\theta_e = \theta$. В этом случае сила инерции

$$\overline{J}_e = \sum_{j=1}^{n} \rho \frac{\partial^2 \overline{R}_{Gj}}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial^2 \sum_{j=1}^{n} \overline{R}_{Gj}}{\partial t^2} = n\rho \frac{\partial^2 \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \overline{R}_{Gj}}{\partial t^2} = \rho_e \frac{\partial^2 \overline{R}_{Ge}}{\partial t^2}, \qquad (7)$$

где $\overline{R}_{Ge} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \overline{R}_{Gj}$ – радиус-вектор линии центров масс фазы ($\overline{R}_G$ – радиус-вектор положения линии центров масс поперечных сечений провода с неравномерным гололедом); $\rho_e = n\rho$.

С учетом (7) уравнения пляски эквивалентного провода запишем в следующем виде:

$$\rho_e \frac{\partial^2 y_e}{\partial t^2} - \rho_e h \left[\sin\theta_{Ge} \frac{\partial^2 \theta_e}{\partial t^2} + \cos\theta_{Ge} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta_e \frac{\partial y_e}{\partial t} =$$

$$= T_e \frac{\partial^2 y_e}{\partial s_0^2} + P_e + F_{ey};$$

$$\rho_e \frac{\partial^2 z_e}{\partial t^2} + \rho_e h \left[\cos\theta_{Ge} \frac{\partial^2 \theta_e}{\partial t^2} - \sin\theta_{Ge} \left(\frac{\partial \theta_e}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta_e \frac{\partial z_e}{\partial t} = \qquad (8)$$

$$= T_e \frac{\partial^2 z_e}{\partial s_0^2} + F_{ez};$$

$$I_e \frac{\partial^2 \theta_e}{\partial t^2} + nf_c \frac{\partial \theta_e}{\partial t} + \rho_e h \left[\cos\theta_{Ge} \frac{\partial^2 z_e}{\partial t^2} - \sin\theta_{Ge} \left(\frac{\partial y_e}{\partial t} \right)^2 \right] =$$

$$= GJ_e + M_{ae} - M_{\rho e},$$

где $\theta_{Ge} = \theta_0 + \theta_e$; $T_e = nT$; $P_e = nP$; $\overline{F}_e = n\overline{F}$; $\delta_e = n\delta$; $M_{ae} = nM_a$; $M_{\rho e} = nM_\rho$; $I_e = nI_c + \rho_e r_{\text{р}}^2$ – момент инерции 1 м расщепленной фазы; $r_{\text{р}}$ – радиус расщепленной фазы.

Для определения крутильной жесткости фазы в целом используются формулы, полученные профессором Лильеном и др. [2]. Например, для горизонтальной двойки $(n = 2)$ при жесткой фиксации проводов в поддерживающих зажимах по концам пролета

$$GJ_e = nGJ + r_p^2 T_e. \tag{9}$$

Для оценки достоверности расчетов с использованием модели эквивалентного провода по разработанной КП проводится их сравнение с данными зарубежных исследователей [8]. Расхождение между результатами расчета по КП и [8] составляет 10…15 %. В качестве примера на рис. 3 приведено сравнение вертикальных колебаний проводов фазы, полученных по КП и приведенных в [8], для $\theta_0 = 95°$.

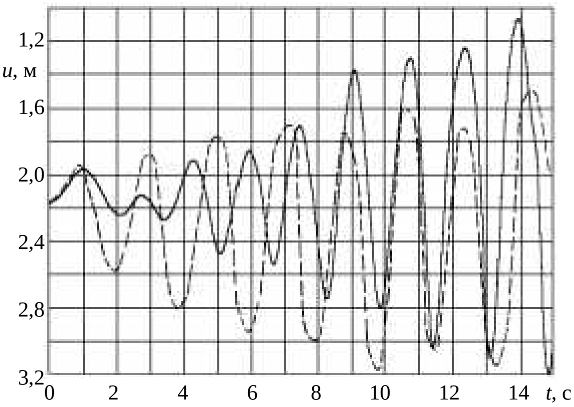

Рис. 3. Сопоставление вертикальных перемещений проводов фазы, полученных по КП и приведенных в [8]: —— – расчет по КП; – – – – данные [8]

В 1998 г. в КазНИИЭ (Казахстан) совместно с ЗАО «Электросетьстройпроект» (Россия) и Льежским техническим университетом (ЛТУ) (Бельгия) проведены экспериментальные полномасштабные исследования пляски расщепленной фазы 2хАС-400/51 в пролете 292 м. Результаты испытаний и измерений приводятся в [13]. На опытном полигоне КазНИИЭ пляска была получена в естественных условиях при установке искусственных обтекателей, при начальных углах оледенения, равных 93°, 185° и 280°. Компьютерным расчетом получена пляска при близких углах (табл. 1). В качестве примера на рис. 4 приводятся результаты расчета с использованием модели эквивалентного провода, крутильная жесткость которого была определена по (9). При численном моделировании задачи использовались АДХ для проводов сечением 240 мм^2 [8].

Таблица 1

Сопоставление расчетных и опытных данных пляски проводов опытного пролета КазНИИЭ

Опыт		Расчет		Характеристика процесса
θ_0, град.	Y_{m-m}, м	θ_0, град	$Y^{б}_{m-m}$, м	
190	2,8	175	2,3	Пляска
280	3,36	290	3,0	Пляска
95	3,5	93	2,5	Пляска

$^{*}Y_{m-m}$ – двойная амплитуда вертикальных колебаний фазы.

а б

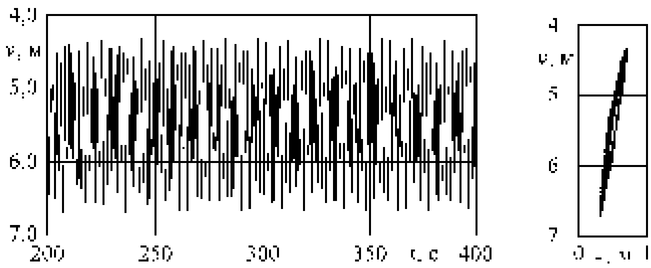

Рис. 4. Пример компьютерного расчета при θ_0 = 93°: а – осциллограмма вертикальных колебаний; б – траектория движения проводов

Выполнена сравнительная характеристика расчетов пляски с результатами расчетов ЛТУ для экспериментального пролета 308 м с проводами 2хASM-620 [9]. При этом использована АДХ для провода ASCR-810 [14]. Расчеты проведены при следующих исходных данных: $T_0 = 36$ кН/провод, стрела провеса провода – 6 м, $v = 10$ м/с, $GJ_e = 4455$ Нм^2/рад, $I_e = 0{,}182$ кг·м^2. Сравнение результатов расчета приводится в табл. 2, пример компьютерного расчета – на рис. 5.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета ЛТУ и БНТУ

θ_0, град	Расчет ЛТУ			Расчет БНТУ			Расхождение, %		
	Y_{m-m}, м	T^{*}_{m-m}, кН	θ^{**}_{m-m}, град	Y_{m-m}, м	T_{m-m}, кН	θ_{m-m}, град	Y_{m-m}	T_{m-m}	θ_{m-m}
–50	6,0	115	60	6,0	130	100	0,0	13,0	66,6
–45	6,0	115	60	8,0	150	100	33,8	30,4	66,6
–40	6,0	115	60	6,6	140	85	10,0	21,7	41,7

* – двойная амплитуда изменения тяжения провода; ** – двойная амплитуда изменения угла поворота фазы.

а б

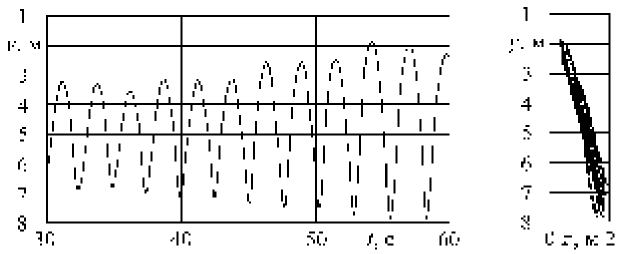

Рис. 5. Пример компьютерного расчета при θ_0 = –50°: а – осциллограмма вертикальных колебаний; б – траектория движения проводов

ВЫВОД

Разработан универсальный численный метод расчета динамических характеристик пляски расщепленных проводов воздушных ЛЭП, основанный на двух расчетных моделях. Результаты расчетов динамических характеристик пляски, выполненных с использованием разных моделей фазы, согласуются с опытными и расчетными данными. Разработанный метод может быть использован в проектной практике при выборе расстояний между проводами и проводами и тросами расщепленных фаз воздушных ЛЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкая Е. Н., 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 Transactions on Power Delivery. – Vol. 13, № 3. – 1998. – P. 909–916.

3. Сергей И. И., Стрелюк М. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

4. Стрелюк М. И., Сергей И. И. Расчет пляски расщепленных проводов с большим числом составляющих // Повышение эффективности сетей 110–1150 кВ: Сб. ст. / Науч.-исслед. ин-т по передаче электр. энергии постоян. током высокого напряжения (НИИПТ). – Ленинград: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – С. 113–126.

5. Полевой А. И. Условия возникновения пляски проводов под действием ветра и гололеда // Энергетика и транспорт. Изв. АН СССР. – 1987. – № 6. – С. 49–58.

6. Яковлев Л. В. Физическая сущность пляски проводов // Электрические станции. – 1971. – № 10. – С. 45–49.

7. Kazuo Goto, Toihiro Koike. A Numerical Calculation Method for Galloping and Its Prevention // Trans. IEE Japan. – 1977. – B97, № 7. – P. 405–412.

8. Masary Yamaoka. A Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a Bundle Conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – B99, № 9. – P. 569–576.

9. 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.

10. Копченова Н. В., Марон И. А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1972. – 368 с.

11. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.

12. Ванько В. И. Колебания проводов расщепленной фазы ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1991. – № 2.– С. 11–16.

13. Final Report on Tests of TDD Anti-Galloping Device. – Scientific-industrial Company Electrosetjstroyproject (ESSP). – Almaty–Moscow, 1998.

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

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 24.12.2004