

УДК 621.315

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛЯСКИ РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ ПРИ НАЛИЧИИ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ

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

Белорусский национальный технический университет

Канд. техн. наук ВИНОГРАДОВ А. А.

ЗАО «Электросетьстройпроект» (Москва)

Проф. ЛИЛЬЕН Ж.-Л.

Льежский технический университет (Бельгия)

Воздушные ЛЭП являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем. Серьезная проблема их эксплуатации во многих странах – многочисленные колебания проводов, количество которых, к сожалению, только увеличивается с развитием электроэнергетических систем. Наиболее распространенным видом колебаний, приводящих к серьезным нарушениям механической части ВЛ, является пляска проводов. Физическая сущность пляски заключается в аэродинамической неустойчивости сечения провода, покрытого асимметричным гололедом.

В результате пляски происходят замыкания между проводами, а также проводами и тросами, обрывы проводов, ускоренный износ линейной арматуры и пр. [1]. Значительный ущерб от пляски проводов инициировал работы по ограничению амплитуд пляски с помощью различных методов. Координированные программы исследований проводятся в Бельгии, Дании, Великобритании, Нидерландах, ФРГ (CORECH), США (EPRI) и Канаде (Ontario Hydro). Однако, несмотря на выполненный комплекс исследований и положительный опыт применения различных типов гасителей, по сведениям СИГРЭ [1], отсутствует универсальный метод для предотвращения пляски проводов. Поэтому в этой области требуются как теоретические, так и практические работы по оценке эффективности устройств подавления пляски для воздушных ЛЭП с различными параметрами.

В настоящее время наиболее перспективны – комбинированные гасители колебаний TDD (Torsional Damper and Detuner) (рис. 1), разработанные в Льежском техническом университете [2]. Для оценки эффективности

TDD под эгидой ИНТАС (Европейский Союз) выполняются комплексные исследования: полевые наблюдения, полномасштабные эксперименты, вычислительный эксперимент и другие способы. В статье излагаются результаты проведенных в рамках ИНТАС полевых наблюдений в КазНИИЭ и вычислительного эксперимента в БНТУ по оценке эффективности гасителей пляски проводов TDD.

Пляска относится к низкочастотным видам колебаний (0,15–1,0 Гц) и характеризуется значительными амплитудами. Наиболее опасными для воздушных ЛЭП являются однополуволновые пляски проводов. Реже встречаются двух-, трех- и четырехполуволновые пляски. Во всех указанных случаях в качестве расчетной модели провода может быть принята абсолютно гибкая упругая нить, сопротивляющаяся кручению и растяжению. Для проводов ЛЭП, имеющих относительную стрелу провеса менее 5 %, изменением тяжения вдоль пролета можно пренебречь [3]. С помощью модели гибкой нити в БНТУ разработаны два численных метода расчета пляски расщепленной фазы (РФ). Один из них базируется на полной расчетной модели фазы в виде пучка гибких нитей, зафиксированных на заданном расстоянии в нескольких точках пролета жесткими стержнями – распорками. Такая модель наиболее точно учитывает геометрические и физико-механические характеристики РФ в целом, что подтверждается хорошим совпадением результатов компьютерного расчета с расчетами других авторов [4]. Однако при длительном счете по этому алгоритму возникают паразитные колебания, способные исказить результаты расчетов при малом шаге интегрирования по времени, который обусловлен условием устойчивости решения уравнений движения распорок.

Стабильные результаты дает метод моделирования РФ эквивалентным проводом, осью которого является линия центров масс (ЛЦМ) поперечных сечений фазы [4]. Физико-механические параметры эквивалентного провода определяются параметрами составляющих фазу проводов. Используя принцип моделирования пляски РФ эквивалентным проводом, просуммируем уравнения динамики составляющих фазу проводов. При этом считаем, что действующие на них аэродинамические силы F , аэродинамические моменты M_a , а также углы закручивания θ равны между собой. В этом случае сила инерции

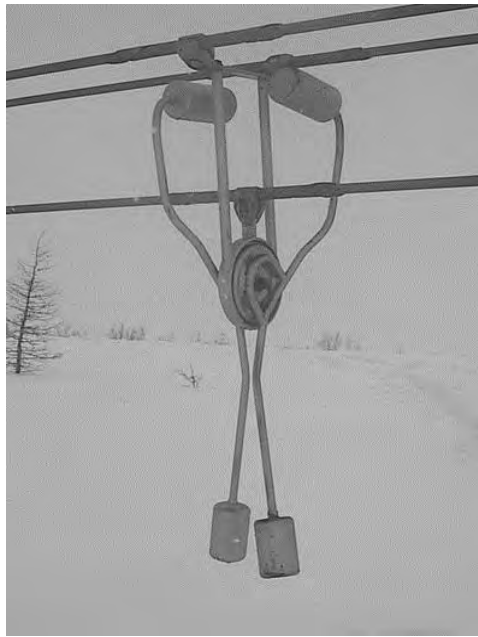


Рис. 1. Образец комбинированного гасителя колебаний

$$\bar{J} = \sum_{j=1}^n \rho \frac{\partial^2 \bar{R}_j}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial^2 \sum_{j=1}^n \bar{R}_j}{\partial t^2} = n\rho_1 \frac{\partial^2 \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{R}_j}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{R}_j$ – радиус-вектор ЛЦМ фазы; n – кратность расщепления фазы; $\rho = n\rho_1$; ρ_1 – масса единицы длины одного провода.

С учетом (1) уравнения пляски эквивалентного провода запишем в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \rho h \left[\sin \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \cos \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta \frac{\partial y}{\partial t} = T \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + P + F_y; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \sin \theta_G \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 \right] + \delta \frac{\partial z}{\partial t} = T \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + F_z;$$

$$I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + n f_c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho h \left[\cos \theta_G \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - \sin \theta_G \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \right] = GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s_0^2} + M_a - M_p,$$

где

$$\theta_G = \theta_0 + \theta; \quad T = nT_1; \quad P = nP_1; \quad \bar{F} = n\bar{F}_1;$$

$$\delta = n\delta_1; \quad M_a = nM_{a1}; \quad M_p = nM_{p1};$$

θ_0 – начальный угол оледенения; T_1 , P_1 – тяжение и вес единицы длины провода; $I = nI_c + \rho r_p^2$ – момент инерции 1 м РФ; r_p – радиус РФ, м.

Для определения эквивалентной крутильной жесткости фазы принимается формула, полученная в [1]:

$$GJ_{\max} = n\tau + r_p^2 T_0 + \frac{16r_p^2 E A f_0^2}{3L^2}, \quad (3)$$

где L – длина пролета, м; τ – крутильная жесткость одного провода фазы, Н·м²/рад; E – модуль упругости материала провода, Н/м²; A – размер поперечного сечения фазы, м²; f_0 – максимальная стрела провеса провода, м.

Для горизонтальной двойки при жесткой фиксации проводов в поддерживающих зажимах по концам пролета (3) можно записать

$$GJ_{\max} = n\tau J + r_p^2 T_0. \quad (4)$$

Это соответствует конструкции фазы опытного пролета КазНИИЭ. Для проверки погрешности формулы (4) определим эквивалентную жесткость фазы через натуральную частоту крутильных однополуволновых колебаний, которая составляет $f_\theta = 0,37$ Гц [5]. Определим указанный параметр расчетным путем по формуле [1]

$$GJ_{\max} = I \left(L f_\theta \right)^2 = 0,132 \cdot \left(\cdot 292 \cdot 0,37 \right)^2 = 6163 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}. \quad (5)$$

Расчет GJ_{\max} по (4) дает величину

$$GJ_{\max} = 2 \cdot 160 + 0,2^2 \cdot 57000 = 2880 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{рад}.$$

Для устранения недопустимого расхождения в расчетном и опытном значениях GJ_{\max} используем более точную формулу (3)

$$GJ_{\max} = 2 \cdot 160 + 0,2^2 \cdot 57000 + \frac{16 \cdot 0,2^2 \cdot 78730 \cdot 445 \cdot 6,1^2}{3 \cdot 292^2} = 5862 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{рад}.$$

Разница в опытной и расчетной величинах GJ_{\max} составляет немногим более 5 %, что позволяет рекомендовать формулу (4) для практических расчетов.

Для численного решения уравнения (2) преобразуются к нормальному виду относительно старших производных по времени. После обычных преобразований при $\rho h^2 \rightarrow 0$ уравнения пляски эквивалентного провода будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} = \bar{A} T_{\theta} + \bar{D}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = T_{\theta},$$

где $A_y = h \sin \theta$; $A_z = -h \cos \theta$;

$$D_y = -A_z \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 + D'_y + P; \quad D_z = A_y \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)^2 + D'_z; \quad (7)$$

$$\bar{D}' = \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s_0^2} + \bar{F}; \quad \lambda^2 = \frac{T}{\rho};$$

$$T_{\theta} = \frac{1}{I} \left[I_{\theta} + \rho \left(A_z D'_z - A_y D'_y \right) \right]$$

$$D_{\theta} = GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial s_0^2} + M_a - M_p - f \frac{\partial \theta}{\partial t}.$$

Явная схема численного решения уравнений (6) имеет следующий вид [3]:

$$\hat{R}_i = 2R_i - \check{R}_i + \left[A_i T_{\theta_i} + D_i \right] \tau^2; \quad \hat{\theta}_i = 2\theta_i - \check{\theta}_i + \tau^2 T_{\theta_i}.$$

Математическое описание динамики гасителя TDD для РФ составляется на основании общей теоремы динамики [6]. При этом допускается, что гаситель совершает поперечные колебания в плоскости, перпендикулярной пролету. На основе принципов связей и суперпозиции составим уравнения движения центра масс гасителя и вращения вокруг него, а также вращения маятника вокруг оси упруговязкого шарнира под воздействием приложен-

ных от проводов сил и моментов. В общем случае, когда ЛЦМ фазы и центр масс рамы гасителя не совпадают, в уравнениях динамики гасителя используем параметр l_s , представляющий собой расстояние между ЛЦМ и центром масс гасителя. При этом уравнение равновесия приложенных к элементу эквивалентного провода с гасителем сил и моментов имеет следующий вид:

$$\bar{J}_c + \bar{J}_s + \bar{J}_p = \sum_{j=1}^n \Delta T_j + \bar{P}_s + \bar{P}_p + \bar{C} + F \bar{d}_s; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & I_s \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} + r_{by} J_{pz} - r_{bz} J_{py} + r_{sy} J_{sz} - r_{sz} J_{sy} = \\ & = f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} + c(\theta_p - \theta_b) + \sum_{j=1}^n (M_{\theta_j} + M_{\Delta T_j}) - \\ & - P_p l_b \sin \theta_b - P_s l_s \sin \theta_b + M_a d_s, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & I_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + r_{py} J_{pz} - r_{pz} J_{py} = \\ & = -f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} - c(\theta_p - \theta_b) - P_p l_p \sin \theta_p, \end{aligned}$$

где \bar{J}_c – сила инерции эквивалентного провода, приложенная к оси фазы; \bar{J}_s – то же, силовой конструкции (рамы) гасителя; $\bar{r}_s [r_{y}, r_{sz}]$ – радиус-вектор положения центра масс гасителя относительно оси фазы.

Сила инерции равна

$$\bar{J}_s = M_s \frac{d^2 \bar{R}_s}{dt^2} = M_s \frac{d^2 \bar{R}_c}{dt^2} + M_s \frac{d^2 \bar{r}_s}{dt^2}, \quad (10)$$

где

$$\frac{d^2 y_s}{dt^2} = l_s \left[-\sin \theta_b \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} - \cos \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right]; \quad (11)$$

$$\frac{d^2 z_s}{dt^2} = l_s \left[\cos \theta_b \frac{d^2 \theta_b}{dt^2} - \sin \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 \right].$$

Используя методы алгебры матриц, после подстановки выражений для

\bar{J} в (9) определим $\frac{d^2 \theta_b}{dt^2}$ и $\frac{d^2 \theta_p}{dt^2}$:

$$\frac{d^2 \theta_b}{dt^2} = \frac{\Delta_b}{\Delta} = \frac{D_b I_p'' - D_p M_b \cos(\theta_p - \theta_b)}{I_s'' I_p'' - M_b^2 \cos^2(\theta_p - \theta_b)} = L_b; \quad (12)$$

$$\frac{d^2\theta_p}{dt^2} = \frac{\Delta_p}{\Delta} = \frac{D_p I_s'' - D_b M_b \cos(\theta_p - \theta_b)}{I_s'' I_p'' - M_b^2 \cos^2(\theta_p - \theta_b)} L_p,$$

где

$$\begin{aligned} D_b &= M_b \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 + \\ &+ \frac{M_p l_b}{M} \left\{ \sin \theta_b \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{yj} + P_s + P_p + \mathbf{e} + F_y \right] ds - \cos \theta_b \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{zj} + F_z ds \right] \right\} + \\ &+ f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} + c(\theta_p - \theta_b) + \sum_{j=1}^n (\mathbf{u}_{\theta_j} + M_{\Delta T_j}) P_p l_b \sin \theta_b + M_a ds; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} D_p &= M_p \sin(\theta_p - \theta_b) \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 + \\ &+ \frac{M_p l_p}{M} \left\{ \sin \theta_p \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{yj} + P_s + P_p + \mathbf{e} + F_y \right] ds - \cos \theta_p \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{zj} + F_z ds \right] \right\} - \\ &- f \frac{d(\theta_p - \theta_b)}{dt} - c(\theta_p - \theta_b) P_p l_b \sin \theta_b; \end{aligned}$$

$$M = M_s + M_p + \rho ds; \quad I_s'' = I_s' + M_s l_s^2.$$

$$I_s'' = I_s' - \frac{M_p l_b^2}{M}; \quad I_p'' = I_p' - \frac{M_p l_p^2}{M};$$

$$M_b = M_p l_p l_b \left(1 - \frac{M_p}{M} \right).$$

С учетом выражений (10)–(12) преобразуем уравнение движения (8) к нормальному виду:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{M_p}{M} \left[\cos \theta_p \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 l_p + \cos \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 l_b \right] + \\ &+ \frac{M_p}{M} \left[\sin \theta_p l_p L_p + \sin \theta_b l_b L_b \right] \frac{1}{M} \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{yj} + P_s + P_p + \mathbf{e} + F_y \right] ds; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{M_p}{M} \left[\sin \theta_p \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 l_p + \sin \theta_b \left(\frac{d\theta_b}{dt} \right)^2 l_b \right] - \\ &- \frac{M_p}{M} \left[\cos \theta_p l_p L_p + \cos \theta_b l_b L_b \right] \frac{1}{M} \left[\sum_{j=1}^n \Delta T_{zj} + F_z ds \right] \end{aligned}$$

Уравнения (12) и (14) образуют систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с нелинейными правыми частями динамики комбинированного гасителя колебаний, записанную в нормальном виде, удобном для численной алгоритмизации.

Математическое моделирование свободных колебаний гасителя позволяет с помощью вычислительного эксперимента исследовать влияние параметров гасителя на собственную частоту его колебаний. Сопоставление расчетных и экспериментальных осциллограмм затухания колебаний гасителя используется для апробации принципов математического моделирования гасителя и проверки численного алгоритма решения уравнений его

динамики. Для этого принимается, что ЛЦМ фазы неподвижна $\left(\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = 0 \right)$,

а инерционное маятниковое устройство с помощью рамной конструкции шарнирно закреплено на оси фазы. С учетом принятых допущений решение нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка свободных колебаний гасителя TDD сводится к решению задачи Коши с начальными условиями:

$$\theta_{b0} = \theta_{b\text{зад}}; \quad \theta_{p0} = 0; \quad \frac{d\theta_b}{dt} = 0; \quad \frac{d\theta_p}{dt} = 0.$$

Величина $\theta_{b\text{зад}}$ задается в исходных данных. Параметры c и f усредняются по гистерезисным кривым демпферного узла гасителя. Для удобства сопоставления расчетных и экспериментальных осциллограмм величина θ_{b0} должна приниматься согласованно. Сопоставление результатов расчета и опыта, выполненное в ЭССП, показало хорошее совпадение результатов. Погрешность в определении частот собственных колебаний гасителя не превысила 10 %.

Начиная с 1998 г., в КазНИИЭ совместно с ЭССП и ЛТУ проводятся полномасштабные экспериментальные исследования пляски РФ 2×АС-400/51 в пролете 292 м (рис. 2) и оценка эффективности TDD, результаты которых сопоставляются с компьютерными расчетами и литературными данными.

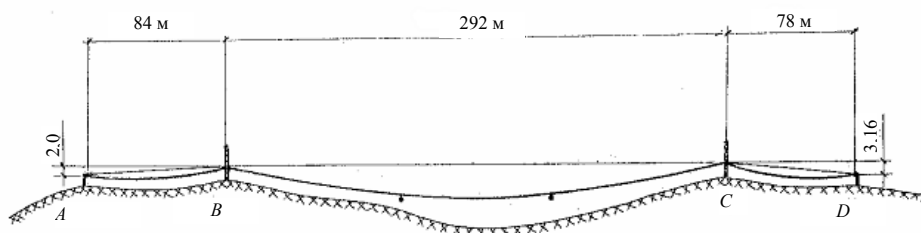


Рис. 2. Опытный пролет КазНИИЭ

При численном моделировании указанной задачи использовались аэродинамические характеристики для проводов сечением 240 мм², заимство-

ванные в [7], так как КазНИИЭ не были представлены сведения об аэродинамических характеристиках используемых насадок. Выполнены расчеты пляски при трех начальных углах оледенения: $\theta_0 = 183^\circ$; 20° и -85° , результаты которых сопоставлены с опытными данными КазНИИЭ (рис. 3, табл. 1).

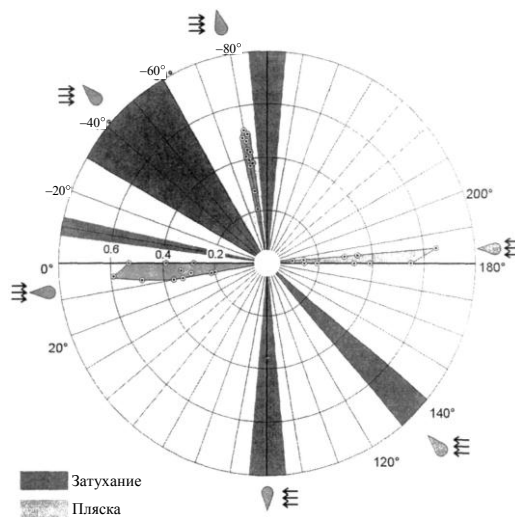


Рис. 3. Опытные данные пляски проводов, полученные в КазНИИЭ

Таблица 1

Сопоставление расчетных и опытных данных пляски проводов, полученных в КазНИИЭ ($2 \times \text{АС-400/51}$; $l = 292$ м)

Опыт		Расчет		Характеристика процесса
θ_0 , град	Y_{m-m} , м	θ_0 , град	Y_{m-m} , м	
Без гасителей				
-85	2,8	-95	2,3	Пляска
10	3,36	20	3,0	Пляска
180	3,2	183	2,5	Пляска
С комбинированными гасителями				
-85	0,36	-95	0,0	Затухание
10	0,3	20	0,35	Ограничение
180	Нет данных	183	0,4	Ограничение

Собственная частота используемого в расчетах гасителя TDD, найденная с помощью компьютерной программы, равна $f_{\text{TDD}} = 0,4$ Гц (рис. 4).

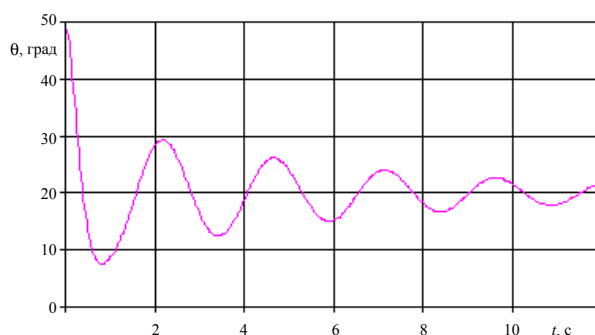


Рис. 4. Осциллограмма собственных крутильных колебаний гасителя $\theta_b = f(t)$

Несмотря на то, что результаты расчета и опыта согласуются, все же расхождение между ними достигает 30 % и более (табл. 1). Расчетные и опытные частоты пляски проводов также не совпадают. Более точный расчет получен при применении величины $GJ_{\max} = 6163 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$, найденной по опытной частоте крутильных колебаний. С использованием скорректированной величины GJ выполнено сравнение расчетных и опытных результатов, полученных КазНИИЭ, при начальном угле оледенения, равном 10° (рис. 5, 6, табл. 2). Применены опытные данные пляски, приведенные в табл. 9, эпизод 1 (без гасителей) и эпизод 2 (с гасителями колебаний, установленными в 1/3 и 2/3 частях пролета), вес гасителей составлял 30 кг [5].

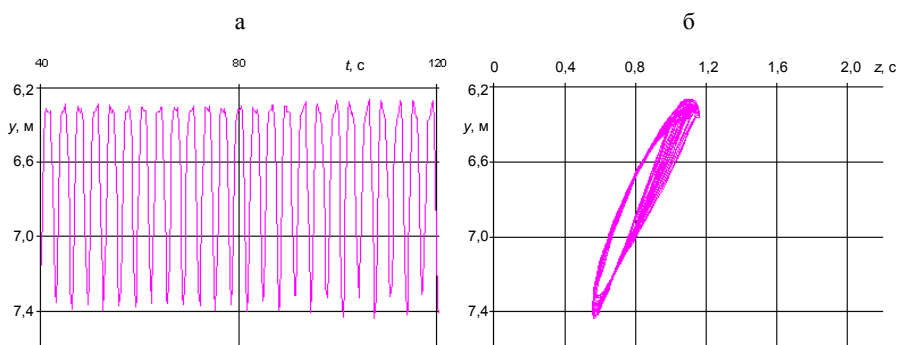


Рис. 5. Динамика параметров пляски фазы в средней точке пролета при $\theta_0 = 10^\circ$ и $v = 10 \text{ м/с}$: а – вертикальные колебания фазы; б – траектория движения средней точки фазы

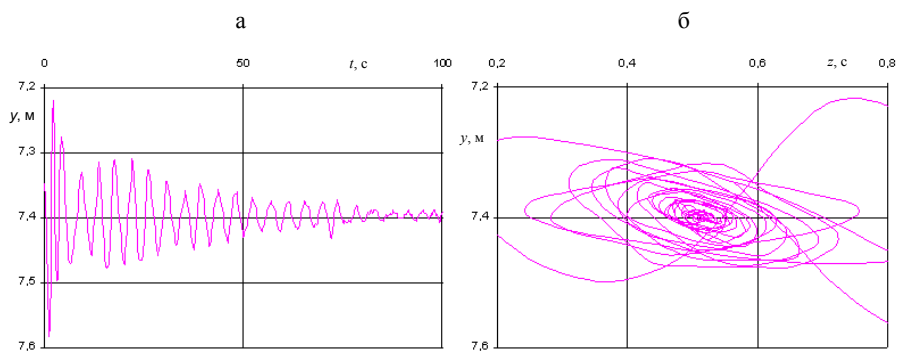


Рис. 6. Динамика параметров пляски фазы в средней точке пролета при установке двух гасителей в 1/3 и 2/3 частях пролета: а – вертикальные колебания фазы; б – траектория движения средней точки фазы

Дальнейшим развитием численного метода расчета пляски проводов явилась разработка алгоритма возбуждения двухполуволновой пляски проводов, которая была зафиксирована 04.03.2006 на опытном полигоне КазНИИЭ. Традиционное возбуждение пляски проводов импульсом ветра, скорость которого принимается на 50 % больше расчетной при пляске, оказалось неуспешным. Оно генерирует в основном однополуволновые и только в редких случаях многополуволновые пляски. Использован алгоритм запуска, при котором на провод действует вертикальная распределенная сила в течение 0,5–1,0 с, величина которой изменяется по синусоидальному закону

$$f_y = -f_m \sin\left(2\pi \frac{S_i}{L}\right), \quad (15)$$

где S_i – текущая координата по длине провода.

Таблица 2

Сопоставление расчетных и опытных параметров однополуволновой пляски фазы пролета КазНИИЭ при $\theta_0 = 10^\circ$ и $GJ = 6163 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$

№ п/п	ν , м/с	Расчет				Опыт		Расхождение	
		A_{m-m} , м	θ_{m-m} , град	f_ν , Гц	f_θ , Гц	A_{m-m} , м	θ_{m-m} , град	ΔA_{m-m} , %	$\Delta \theta_{m-m}$, %
Без гасителя									
1	10	1,2	28	0,325	0,325	1,2	30	0	6,7
2	11	1,5	36	0,305	0,305	1,9	30	21,0	20,0
С гасителями									
3	10	≈0,08	8	0,25	0,25	0,09	10	11,1	20

В $1/4L$ и $3/4L$ точках провода выражение под знаком \sin принимает значения, равные 90° и 270° . В опыте без гасителей наблюдается двухполуволновая пляска по Ден-Гартогу с двойными амплитудами, равными 3 м (табл. 3, рис. 7). Закручивание фазы с частотой $f_\theta = 0,35$ Гц возбуждает однополуволновую пляску с $f_\nu = 0,35$ Гц, амплитуда которой равна 0,17 м. Результаты вычислительного эксперимента совпадают с опытными данными КазНИИЭ, полученными в марте 2006 г. (табл. 3). Установка гасителей в $1/4$ и $3/4$ частях пролета приводит к увеличению амплитуд двух- и однополуволновой пляски (табл. 3). Изменение параметров гасителей не оказывает существенного влияния на параметры пляски фазы. Изменение точек установки гасителей (в $1/3$ и $2/3$ частях пролета) привело к уменьшению амплитуд двухполуволновой пляски и углов закручивания фазы (табл. 3). Во всех случаях двойной диапазон изменения тяжения при пляске составлял 2500–3000 даН.

Таблица 3

Параметры двухполуволновой пляски проводов опытного пролета КазНИИЭ при $T = 3150$ даН; $l = 292$ м; провод 2×АС-400/51; $GJ = 6163 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$; $I = 0,132 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

№ п/п	A_{m-m} , м		θ_{m-m} , град		f_ν , Гц		f_θ , Гц	
	$1/4L$	$1/2L$	$1/4L$	$1/2L$	$1/4L$	$1/2L$	$1/4L$	$1/2L$

Без гасителей								
1	3,0/2,6 ^{***}	0,17/0,15 ^{***}	10/9 ^{***}	10/9 ^{***}	0,5/-	0,35/-	0,35/-	0,35/-
С гасителями								
2*	3,56	0,65	27	27	0,48	0,36	0,48	0,48
3*	3,6	0,6	25	25	0,48	0,36	0,48	0,48
4*	3,57	0,55	30	30	0,47	0,38	0,48	0,48
5*	3,57	0,48	30	30	0,48	0,38	0,47	0,47
6 ^{**}	3,51	0,6	20	20	0,47	0,38	0,47	0,48

Примечания: TDD1 – $P_r = 23$ даН ($P_1 = 7$ даН; $P_2 = 5$ даН; $r_1 = 0,4$ м; $r_2 = 0,6$ м; $l_b = 0,5$ м; $l_p = 0,01$ м); TDD2 – $P_r = 23$ даН ($P_1 = 7$ даН; $P_2 = 5$ даН; $r_1 = 0,4$ м; $r_2 = 0,6$ м; $l_b = 0,5$ м; $l_p = 0,1$ м); TDD3 – $P_r = 33$ даН ($P_1 = 13$ даН; $P_2 = 9$ даН; $r_1 = 0,4$ м; $r_2 = 0,6$ м; $l_b = 0,5$ м; $l_p = 0,1$ м); TDD4 – $P_r = 27$ даН ($P_1 = 9$ даН; $P_2 = 7$ даН; $r_1 = 0,4$ м; $r_2 = 0,6$ м; $l_b = 0,5$ м; $l_p = 0,03$ м).
* – TDD1–TDD4 установлены в $1/4L$ и $3/4L$; ** – TDD4 установлены в $1/3L$ и $2/3L$; *** – опыт.

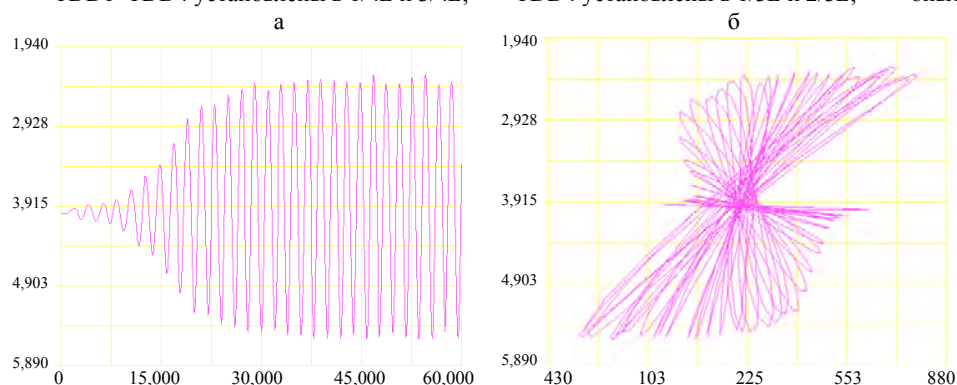


Рис. 7. Динамика параметров пляски фазы в $1/4$ точке пролета:
а – вертикальные колебания фазы; б – траектория движения

ВЫВОДЫ

1. Составлены математические модели, сформулированы краевые задачи и разработан численный метод расчета пляски расщепленных проводов на основе их представления эквивалентным проводом с учетом комбинированных гасителей пляски TDD. Получены уравнения динамики комбинированных гасителей колебаний TDD, учитывающие взаимное влияние инерции их вращения и поступательного перемещения.

2. Строгая математическая постановка задачи расчета пляски проводов с учетом комбинированных гасителей пляски TDD позволяет приблизить вычислительный эксперимент к условиям реальной пляски и опытов на воздушных ЛЭП, что подтверждается согласованием компьютерных расчетов БНТУ с опытом КазНИИЭ.

3. Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил эффективность гасителей пляски TDD в ограничении амплитуд однополуволновой пляски. Результаты численной оценки и наблюдений в КазНИИЭ согласуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, I. Overhead electrical transmission line galloping. A full multi-Span – 3–DOF – Model, some Application and design recommendations / I. Wang, J. L. Lilien // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13, № 3. – P. 909–916.
2. Lilien, J. L. A new damper to solve galloping on bundled lines. Theoretical background, laboratory and field results / J. L. Lilien, R. Heuntgen // IEEE Summer meeting. – July, 20–24. – Berlin, Germany, 1997.

3. С е р г е й, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

4. С е р г е й, И. И. Два подхода к расчету пляски расщепленных фаз воздушных ЛЭП / И. И. Сергей, П. И. Климович // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 1. – С. 15–23.

5. F i n a l Report on Tests of TDD Antigalloping Device / Scientific-industrial Company Electrosetjstroyproject (ESSP). – Almaty; Moscow, 1998.

6. С е р г е й, И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП / И. И. Сергей // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 11–24.

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

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 1.09.2006

УДК 621.311.019.3(075.8)

НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ПРИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКАЗАХ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. МАШКО А. В.

Белорусский национальный технический университет

Релейно-контактные системы, к которым принадлежат устройства релейной защиты и автоматики, состоят из элементов в трех состояниях: исправном, неисправном по причине отказов типа «обрыв» и неисправном по причине отказов типа «замыкание». Для повышения надежности систем при одной и той же надежности элементов может предусматриваться структурное резервирование. Принимаемое при расчетах надежности таких систем допущение о статистической независимости отказов элементов не всегда соблюдается. По зарубежным данным, до 20 % отказов от их общего числа могут оказываться отказами двух и более элементов по общей причине [1].

Неучет множественных, т. е. статистически зависимых, отказов элементов ведет к ошибочному завышению расчетных надежностных показателей систем, содержащих эти элементы.

Известны [2] методика расчета надежности систем, состоящих из элементов в трех состояниях при учете только статистически независимых отказов, и методика расчета надежности систем с двумя состояниями с учетом как независимых, так и множественных отказов. В настоящей работе рассматривается надежность релейно-контактных систем на основе совместного использования этих методик.

Учет независимых и множественных отказов элементов с тремя состояниями. Интенсивность отказов физического контактного элемента λ рассматривается как сумма двух взаимоисключающих компонент: интен-