

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [T_i P_{ij}(x_{ij}) - c_i x_{ij}]_t \rightarrow \max;$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}(x_{ij}) = P_0 + \Delta P;$$

$$x_{ij} > 0; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где m – количество агрегатов на станции.

Таким образом, упрощенная математическая модель позволяет определить экономичный оптимальный режим работы ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замков О. О., Толстопятенко А. В., Черемных Ю. Н. Математические методы в экономике. – М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, 1997.
2. Электрические системы и сети / Под ред. Г. И. Денисенко. – К.: Вища шк., 1986.
3. Математическая экономика на персональном компьютере / Пер. с яп. М. Кубонива, М. Табата, С. Табата, Ю. Хасэбэ; Под ред. М. Кубанова. – М.: Финансы и статистика, 1991.

Представлена кафедрой
экономической информатики

Поступила 25.11.1999

УДК 621.316.35.064.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ОБЛЕДЕНЕНИЮ

Инж. ПЛАТОНОВА И. А., асп. МОШОНКИН В. С.

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

В работе обсуждается построение математической модели расчета аэродинамических характеристик проводов расщепленной фазы (РФ), подверженных обледенению. Проводится сравнительный анализ колебаний РФ различной конфигурации с учетом обледенения и без него. Для проведения вычислительного эксперимента используется математическая модель колебаний РФ, построенная в [1].

Колебания расщепленной фазы могут быть вызваны, например, порывом ветра, внезапным сбросом гололеда и т. д. В процессе ее движения возникают аэродинамические усилия, действующие на элемент длины dx каждого провода РФ:

$$L_k = \frac{1}{2} C_y^k \rho_B d_k \vec{V}_0 \vec{V}_0; \quad D_k = \frac{1}{2} C_x^k \rho_B d_k \vec{V}_0 \vec{V}_0. \quad (1)$$

Здесь L_k , D_k , H – подъемная сила и сила лобового сопротивления, действующие на k -й провод;

C_x^k , C_y^k – стационарные аэродинамические коэффициенты k -го провода;

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³;

d_k – диаметр поперечного сечения k -го провода, м;

\vec{V}_0 – относительная скорость центра масс C поперечного сечения k -го провода, м/с.

Для создания математической модели колебаний РФ необходим тщательный выбор упрощающих предположений. В данной работе используется известное из экспериментов [2, 3] поле сил для подветренного провода в аэродинамическом следе наветренного провода при следующих допущениях: аэродинамические силы действуют только в плоскости поперечного сечения РФ; аэродинамические силы рассматриваются как усредненные величины, т. е. в расчете используются стационарные аэродинамические коэффициенты.

Подъемная сила, действующая на k -й провод, перпендикулярна, а сила лобового сопротивления противоположна направлению вектора \vec{V}_0 . Значения аэродинамических коэффициентов, входящих в (1), вычисляются на основе теоретического подхода с большим трудом даже для простейшего случая гладких цилиндров. Дополнительной сложностью является изменение этих коэффициентов в зависимости от числа Рейнольдса Re . Основываясь на экспериментальных данных [4, 5], в дальнейшем будем считать, что аэродинамические коэффициенты зависят только от угла атаки α . Под углом атаки поперечного сечения провода понимаем угол поворота хорды поперечного сечения провода относительно направления вектора скорости ветрового потока \vec{V} .

В процессе обледенения проводов РФ образуется ряд характерных форм поперечного сечения ледяного покрытия, которые возможно моделировать и получать экспериментальные зависимости аэродинамических коэффициентов: $C_x = C_x(\alpha)$; $C_y = C_y(\alpha)$. На основе экспериментальных данных об аэродинамических коэффициентах одиночного провода [5] возможно построить модель для пучка проводов расщепленной фазы.

Для оценки аэродинамических свойств проводов РФ с учетом их взаимного влияния для подветренного провода имеем [4]:

$$C_x = C_x^0(\alpha) + C_x^D(x, y, d_H^B); \quad (2)$$

$$C_y = C_y^0(\alpha) + C_y^D(x, y, d_H^B); \quad (3)$$

$$x = (\xi_n^* - \xi_n^*)/d_H^B; \quad y = (\eta_n^* - \eta_n^*)/d_H^B.$$

Здесь $C_x^0(\alpha)$, $C_y^0(\alpha)$ – аэродинамические коэффициенты для одиночного профиля с заданной формой поперечного сечения, зависящие от угла атаки α ;

$C_x^d(x, y, d_H^B)$; $C_y^d(x, y, d_H^B)$ – добавочные аэродинамические коэффициенты;

d_H^B – диаметр «встречи» воздушного потока наветренным проводом, м;

$\xi_{п}^*$, $\eta_{п}^*$, $\eta_{н}^*$, $\xi_{н}^*$ – координаты центров масс подветренного и наветренного проводов в системе координат, связанной с центром масс поперечного сечения расщепленной фазы.

Формулы для добавочных коэффициентов [4]:

$$C_x^d(x, y, d_H^B) = 0,016(1,215 - 0,072x + 0,00144x^2) \times (74 - 0,712y^2 - 10,5|y^3| - 2,66y^4) \quad (4)$$

при $0 < x < 25$ и $|y| < 2,9$;

$$C_x^d(x, y, d_H^B) = 0,00505(74 - 0,712y^2 - 10,5|y^3| + 2,66y^4) \quad (5)$$

при $x > 25$ и $|y| < 2,9$;

иначе

$$C_x^d(x, y, d_H^B) = 0; \quad (6)$$

$$C_y^d(x, y, d_H^B) = (-1,78 + 0,127x - 0,00144x^2) \times (0,928\text{sign}(y)y^2 - 0,827y^3 + 0,244\text{sign}(y)y^4 - 0,0239y^5) \quad (7)$$

при $0 < x < 26,6$ и $|y| < 2,8$;

$$C_y^d(x, y, d_H^B) = -0,08(0,928\text{sign}(y)y^2 - 0,827y^3 + 0,244\text{sign}(y)y^4 - 0,0239y^5) \quad (8)$$

при $x > 26,6$ и $|y| < 2,8$;

иначе

$$C_y^d(x, y, d_H^B) = 0. \quad (9)$$

Для аэродинамических расчетов расщепленной фазы за характерный размер провода примем диаметр «встречи» воздушного потока профилем, т. е. длину ортогональной проекции сечения обледенелого провода на ось $C\eta$ (рис. 1):

$$d^{встр} = \eta_{max}^B(\alpha) - \eta_{max}^H(\alpha).$$

В связи с тем, что сечение провода может быть несимметричным относительно оси $C\xi$, т. е. $|\eta_{max}^B| \neq |\eta_{max}^H|$, аэродинамический след, образующийся за проводом, будет также несимметричным относительно этой оси (рис. 2).

Для оценки асимметрии обозначим $k_a = |\eta_{max}^B|/|\eta_{max}^H|$, при $k_a = 1$ провод считается аэродинамически симметричным;

при $k_a < 1$ провод вытянут вниз;

при $k_a > 1$ провод вытянут вверх.

Для симметричного относительно оси $C\xi$ сечения подъемная сила, действующая на подветренный провод, направлена к оси симметрии аэродинамического следа, на которой $L_k = 0$.

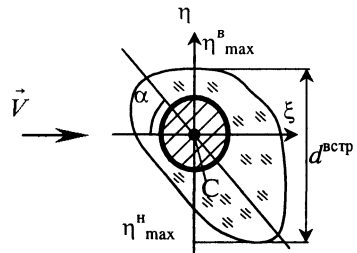


Рис. 1. Профиль обледенелого провода в местной системе координат $C\xi\eta$: d^B – диаметр «встречи»; α – угол атаки

Для случая асимметрии наветренного провода также существует ось аэродинамической симметрии, параллельная вектору скорости \vec{V} , на которой $L_k = 0$, однако данная ось не проходит через центр масс C наветренного провода (рис. 2).

Аэродинамический след, возникающий за наветренным проводом, считаем симметричным относительно данной оси.

Принимаем, что аэродинамический след, возникающий за асимметричным наветренным проводом, эквивалентен следу, который образуется за проводом круглого сечения с диаметром, равным d_b ; через его центр масс проходит ось аэродинамической симметрии.

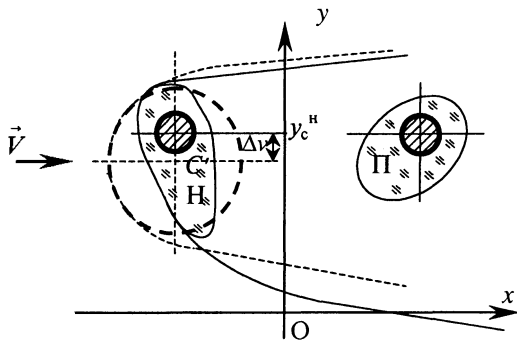


Рис. 2. Аэродинамический след в системе координат, связанной с центром масс поперечного сечения РФ: Н – наветренный провод; П – подветренный провод; пунктиром отмечены «эквивалентное» круглое сечение и аэродинамический след за ним

В расщепленной фазе, состоящей из проводов с произвольной формой поперечных сечений, добавочные аэродинамические коэффициенты подветренных проводов зависят от положения центра масс подветренного профиля в аэродинамическом следе наветренного провода. При проведении аэродинамических расчетов для проводов, которые имеют произвольную форму поперечного сечения, наветренный провод заменяется на провод с круглым поперечным сечением. Диаметр «эквивалентного» круглого провода равен диаметру «встречи» наветренного провода.

Центр поперечного сечения данного «эквивалентного» круглого провода C' смещается по оси ординат на величину $\Delta y = (\eta^B_{\max}(\alpha) - \eta^H_{\max}(\alpha))/2$ от центра масс обледенелого провода (рис. 2).

Таким образом моделируются аэродинамические коэффициенты проводов с учетом геометрии их поперечных сечений и взаимного расположения. Для каждого k -го провода необходимо учесть влияние на значения аэродинамических коэффициентов всех остальных $j = 1 \dots (n-1)$

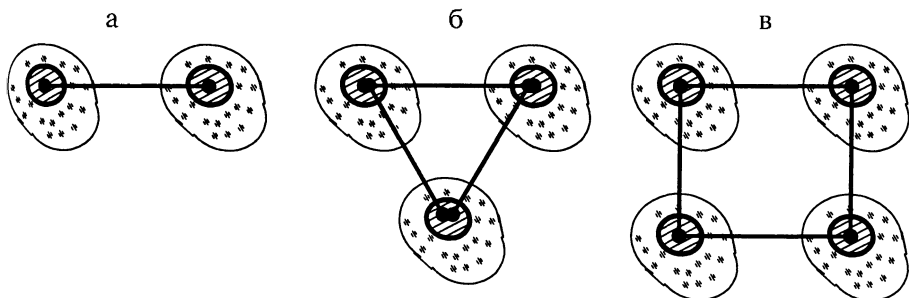


Рис. 3. Поперечные сечения РФ, использовавшихся при моделировании: а – двухпроводная; б – трехпроводная; в – четырехпроводная

проводов РФ, поэтому после вычисления всех $C_{xk(f)}^D$, $C_{yk(f)}^D$ эти влияния алгебраически суммируются в силу гипотезы аддитивности [6].

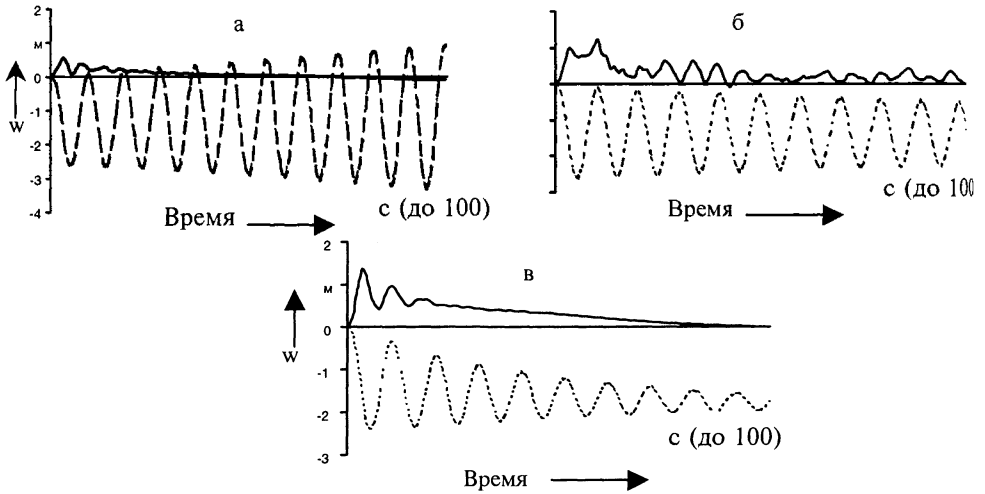


Рис. 4. Поперечные колебания расщепленной фазы в плоскости ее начального провисания: — — — «чистых» проводов; - - - - проводов с наледью: а — двухпроводная РФ; б — трехпроводная; в — четырехпроводная

В качестве моделей рассмотрены: двухпроводная, трехпроводная и четырехпроводная расщепленные фазы. В исследовании использовалась модель формы обледенения, описанная в [5] (рис. 3). Скорость ветрового потока была принята равной 7 м/с. Рассматривались установившиеся колебания.

В результате было установлено, что даже при малых скоростях ветрового потока амплитуды колебаний РФ с проводами, подверженными обледенению, для данных РФ в 2–4 раза больше амплитуд колебаний чистых проводов (рис. 4). Медленнее происходит затухание колебаний.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель расчета аэродинамических характеристик проводов расщепленной фазы с учетом их возможной формы поперечного сечения с гололедом, реализованная в компьютерной программе.

2. Выявлена существенная разница в протекании процессов колебаний РФ с чистыми и обледенелыми проводами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванько В. И., Платонова И. А. Сравнительный анализ свободных колебаний расщепленных фаз применительно к компактным ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – № 5. – С. 27–33.
2. Transmission line reference book: Wind-induced conductor motion // EPRI. – 1979. – Р. 244.
3. Кларен Р., Диана Дж., Николини П. Колебания проводов в расщепленных фазах // Воздушные линии электропередачи (СИГРЭ-74). – М.: Энергия, 1977. – С. 36–63.

4. Diana G., Gasparetto M., Giacomo G. Analytical method for computing subspan oscillation. Analytical and experimental results.—New York, 1974. — 9p. (IEEE Conf. Pap. C74493–3).

5. Графский И. Ю., Казакевич М. И., Лукьянова В. Н. Экспериментальное определение аэродинамических сил, действующих на стержень с плохобтекаемым сечением // Известия вузов. Машиностроение. — 1985. — № 1. — С. 17–20.

6. Ванько В. И., Соловьева Е. В., Феоктистов В. В. Аэродинамические характеристики расщепленных проводов для воздушных линий электропередачи // Известия РАН. Энергетика. — 1994. — № 4. — С. 104–111.

Представлена кафедрой
прикладной математики

Поступила 11.04.2000

УДК 621

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НАСТРОЙКИ ДУГОГАСЯЩЕЙ КАТУШКИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Инженеры ЛУКЪЯНЕНОК М. Ю., АПЕТЕНОК О. М.

Глубокские ЭС («Витебскэнерго»)

На подстанциях 110, 35/10 кВ широкое применение получила защита от замыканий на землю (ЗЗН), включенная на фильтр напряжения нулевой последовательности [1].

При металлическом замыкании на землю в сети 10 кВ в разомкнутом треугольнике трансформатора напряжения, подключенного к шинам 10 кВ подстанции, появится напряжение нулевой последовательности $3U_0 = 100$ В.

Перед введением компенсации емкостного тока необходимо выполнить выравнивание емкостей фаз и снизить степень несимметрии до [2]

$$U_{нс} \leq 0,75 \% U_{ф},$$

где $U_{нс}$ — напряжение естественной несимметрии; $U_{ф}$ — фазное напряжение сети.

Напряжение смещения нейтрали при отсутствии замыкания на землю при резонансной настройке дугогасящей катушки (ДГК) не должно превышать [2]

$$U_{сн} \leq 15 \% U_{ф},$$

где $U_{сн}$ — напряжение смещения нейтрали при резонансной настройке ДГК.

Уставка срабатывания защиты выбирается по условиям отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра нулевой последовательности и рассчитывается по формуле [3]