

УДК 621.311.4

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ТОКОВЕДУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ГИБКИМИ ПРОВОДНИКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ ПОДОБИЯ

Голотин И.А., Францевич Р.Г., Махнач Д.Н.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Сергей И.И.

Под электродинамической стойкостью гибких проводников электроустановок понимают их способность противостоять электродинамическому действию токов короткого замыкания (КЗ) до и после автоматического отключения цепи КЗ без повреждений. Согласно ПУЭ, наименьшим током, начиная с которого необходимо проверять гибкие шины РУ на схлестывание или опасное сближение, является ток трёхфазного КЗ в 20 кА.

Расчёт параметров электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками производится по разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерной программе FLEBUS. В программе FLEBUS применена расчётная модель провода в виде гибкой упругой нити. Представление провода расчётной моделью с распределённой массой позволяет более точно выполнить расчёт электродинамического взаимодействия. Движение провода описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами. Решить нелинейные уравнения движения провода классическим методом не удаётся. Для этого использован численный метод, где производные представлены конечными разностями. Однако численные методы позволяют найти только частное решение задачи динамики провода при КЗ.

Для обобщения частных численных решений задачи динамики провода при КЗ его уравнения движения решены в безразмерной форме. В процессе преобразования уравнений движения к безразмерной форме выявлены сочетания и комбинации параметров, одинаковые для подобных решений задачи. В теории подобия их называют критериями подобия. Подобие механических систем включает в себя геометрическое, кинематическое и динамическое подобия, требующие параллельности и пропорциональности скоростей и сил в любых сходных точках системы. После приведения к безразмерной форме уравнения движения провода с учётом малой стрелы провеса в полёте принимают вид:

$$T_* \frac{d^2 y_*}{dx_*^2} + \pi_D = \frac{d^2 y_*}{dt_*^2}, \quad (1)$$

$$T_* \frac{d^2 z_*}{dx_*^2} + \pi_\Gamma = \frac{d^2 z_*}{dt_*^2}, \quad (2)$$

где  $x_* = \frac{x}{l}$ ;  $y_* = \frac{y}{f_0}$ ;  $z_* = \frac{z}{f_0}$  – относительные декартовы координаты мгновенного положения провода;

$T_*$  – кратность динамического тяжения относительно начального;

$t_*$  – текущее время в относительных единицах;

$\pi_D$ ,  $\pi_\Gamma$  – соответственно динамический и геометрический критерии подобия.

Текущее время в относительных единицах можно найти по формуле:

$$t_* = \omega_c \cdot t, \quad (3)$$

где  $\omega_c$  – собственная частота колебаний провода,  $c^{-1}$ .

Собственная частота колебаний провода с малой стрелой провеса определяется по формуле:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{T_0}{\rho_{\text{э}} \cdot l^2}}, \quad (4)$$

где  $T_0$  – начальное тяжение провода, Н;

$\rho_{\text{э}}$  – приведённая масса одного метра провода, кг/м;

$l$  – длина пролёта.

Одинаковые решения могут иметь системы с гибкими проводниками, имеющие одинаковые геометрический  $\pi_{\Gamma}$  и динамический  $\pi_{\text{д}}$  критерии подобия.

Геометрический критерий подобия находится по выражению:

$$\pi_{\Gamma} = \frac{p_z \cdot l^2}{T_0 \cdot f_0}, \quad (5)$$

где  $p_z$  – нагрузка на гибкие проводники по оси  $z$  (вес провода, гололёд, вес натяжных гирлянд изоляторов);

$f_0$  – стрела провеса провода.

Критерий динамического подобия рассчитывается с использованием эквивалентных ЭДУ за время короткого замыкания.

$$\pi_{\text{д}} = \frac{f_{\text{э}}^{(2)} \cdot l^2}{T_0 \cdot f_0}, \quad (6)$$

где  $f_{\text{э}}^{(2)}$  – эквивалентная ЭДУ при двухфазном КЗ, даН/м.

Эквивалентная ЭДУ рассчитывается по формуле:

$$f_{\text{э}}^{(2)} = 0,2 \frac{(I_{\text{п},0}^{(2)})^2}{a}, \quad (7)$$

где  $I_{\text{п},0}^{(2)}$  – периодическая составляющая тока двухфазного КЗ, кА;

$a$  – междуфазное расстояние, м.

Начальное тяжение провода определяется из выражения:

$$T_0 = \frac{P_{\text{э}} \cdot l^2}{8 \cdot f_0}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{э}}$  – приведённый вес одного метра провода, даН/м.

Если подставить значение  $T_0$  в (6), то можно получить более простой критерий динамического подобия:

$$\pi_{\text{д}} = 8 \cdot \frac{f_{\text{э}}^{(2)}}{P_{\text{э}}}, \quad (9)$$

Приведённый вес провода – это вес провода с учётом натяжных гирлянд изоляторов и спусков к аппаратам. Он находится по формуле:

$$P_{\text{э}} = P_0 \cdot c, \quad (10)$$

где  $P_0$  – вес одного метра провода, даН/м;

$c$  – коэффициент нагрузки пролёта.

В результате выполнения работы получены графические зависимости, обобщающие частные численные решения дифференциальных уравнений движения провода. С их помощью можно без использования компьютерной программы быстро определить максимальное отклонение провода от положения равновесия, зная лишь начальное тяжение фазы, стрелу провеса, удельный вес провода, междуфазное расстояние и ток КЗ.