

Нахождение подобных решений уравнений движения проводов при коротком замыкании

Сергей И.И., Пономаренко Е.Г.

Белорусский национальный технический университет

Движения проводов при коротком замыкании описывается уравнениями гибкой упругой нити. Это нелинейные гиперболические дифференциальные уравнения в частных производных. Для решения таких уравнений чаще всего используются численные методы [1], которые позволяют найти только частные решения, соответствующие конкретным граничным условиям. Поэтому обобщение частных решений уравнений движения провода является актуальной задачей.

В докладе предлагается способ приближенного обобщения частных численных решений уравнений движения проводов, основанный на их решении в безразмерной форме. В процессе преобразования уравнений к безразмерному виду выявляются сочетания и комбинации параметров провода, одинаковые для подобных решений задачи. В теории подобия их называют критериями подобия. Для подобия решений уравнений движения проводов при КЗ должны быть соответственно одинаковы определяющие критерии подобия и подобны условия однозначности, т.е. начальные и краевые условия [2]. Подобие механических систем включает в себя геометрическое, кинематическое и динамическое подобия, требующие параллельности и пропорциональности скоростей и сил в любых сходственных точках системы [2].

Уравнение движения провода при коротком замыкании имеет следующий вид

$$T(t) \cdot \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial x^2} + \bar{p} + \bar{f}(t) = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}. \quad (1)$$

При приведении уравнений к безразмерному виду за базисные величины принимаем длину пролета (l), максимальную стрелу провеса (f_0), начальное тяжение провода до КЗ (T_0) и угловую частоту собственных колебаний провода (ω_c). Пара-

метры, входящие в (1) выражаются в безразмерной форме относительно базисных величин [2]

$$x_* = \frac{x}{l}; \quad y_* = \frac{y}{f_0}; \quad z_* = \frac{z}{f_0}; \quad t_* = \omega_c t; \quad T_* = \frac{T(t)}{T_0}.$$

После преобразований уравнение (1) приводится к следующему виду

$$T_* \frac{\partial^2 \bar{R}_*}{\partial x_*^2} + \frac{\bar{p}}{\pi'_\Gamma} + \frac{\bar{f}(t)}{\pi'_\Gamma} = \frac{\partial^2 \bar{R}_*}{\partial t_*^2}, \quad (2)$$

где $\pi'_\Gamma = \frac{T_0 f_0}{l^2}$ — комплекс начальных параметров провода.

Из динамического уравнения (2) при $t = 0$ получаем уравнение начального провисания провода

$$\frac{\partial^2 z_*}{\partial x_*^2} + \frac{pl^2}{T_0 f_0} = 0. \quad (3)$$

Второе слагаемое уравнения (3) представляет собой неизменную комбинацию параметров провода, которая является геометрическим критерием подобия [2]

$$\pi_\Gamma = \frac{pl^2}{T_0 f_0}. \quad (4)$$

Векторные уравнения (2) записываются в проекциях на оси координат

$$\begin{aligned} T_* \frac{\partial^2 y_*}{\partial x_*^2} + \frac{f(t)}{\pi'_\Gamma} &= \frac{\partial^2 y_*}{\partial t_*^2}; \\ T_* \frac{\partial^2 z_*}{\partial x_*^2} + \pi_\Gamma &= \frac{\partial^2 z_*}{\partial t_*^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Динамическое подобие механических систем обеспечивается при параллельности и пропорциональности сил в сходственных точках. Значит для получения одинаковых решений уравнений (5) необходимо иметь одинаковые критерии динамического подобия

$$\pi_\Delta = \frac{f(t)l^2}{T_0 f_0}. \quad (6)$$

Использование критерия динамического подобия записанного в виде (6) не представляется возможным, так как действи-

тельные осциллограммы электродинамических усилий $f(t)$ при приближенных расчетах не известны. Поэтому ЭДУ заменяются эквивалентными значениями f_s на промежутке времени, равном продолжительности КЗ t_k . Эквивалентирование производится с использованием интегрального критерия – импульса ЭДУ $S^{(2)}$.

$$f_s = \frac{S^{(2)}}{t_k l} \quad (7)$$

Тогда выражение для критерия динамического подобия можно записать в следующем виде

$$\pi_d = \frac{f_s l^2}{T_0 f_0} \quad (8)$$

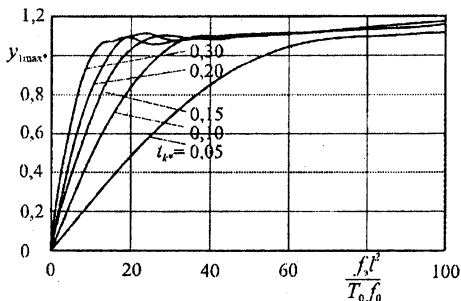


Рис.1. Максимальные горизонтальные относительные отклонения средней точки провода для различных относительных продолжительностей КЗ в функции динамического критерия подобия

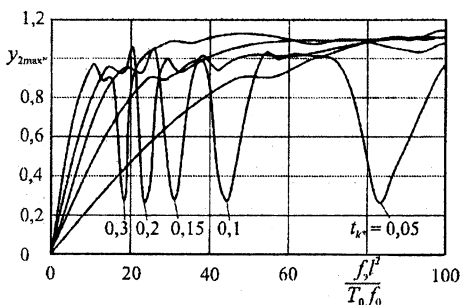


Рис.2. Максимальные горизонтальные относительные отклонения средней точки провода на стадии сближения проводов

По разработанным ранее компьютерным программам был получен большой массив частных численных решений динамики проводов при КЗ. Были рассмотрены случаи с разными геометрическими характеристиками пролетов и параметрами ко-

роткого замыкания. С использованием критериев подобия частные решения удалось обобщить в виде диаграмм. На рис. 1-3 приведены диаграммы максимальных отклонений и тяжений проводов в функции критерия динамического подобия для раз-

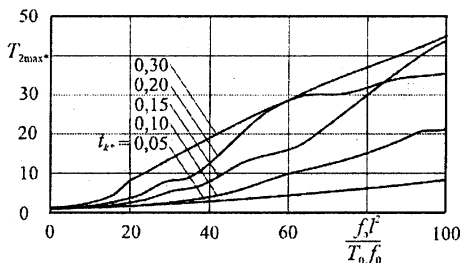


Рис.3. Максимальные тяжения проводов на стадии их отталкивания

личных продолжительностей короткого замыкания в относительных единицах.

В табл. 1 приводится сопоставление результатов расчетов максимальных отклонений по компьютерной программе и по обобщенным кривым (рис. 1) для различных комбинаций и характеристик КЗ и геометрических размеров пролетов, подтверждающее достоверность разработанной методики.

Сопоставление y_{1*max} , определенных по рис.1 и КП Таблица 1

l , м	Провод	$I_{по}$, кА	t_{k*}	y_{1*max} , (рис.1)	y_{1*max} , КП	Δy_{1*max} , %
20	185/24	10,0	0,15	0,900	0,900	0,00
27,5	500/27	20,0	0,1	0,990	0,999	0,90
30	500/27	25,0	0,11	1,109	1,102	0,63
50	600/72	20,0	0,1	0,525	0,524	0,19
60	300/39	25,0	0,2	1,060	1,069	0,84

Литература

- Сергей, И.И., Стрелюк, М.И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
- Сергей, И.И., Пономаренко, Е.Г. Обобщение численных решений уравнений движения проводов при коротком замыкании с помощью критериев подобия// Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 2. – С. 13–19.