

УДК 621.316.35

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКИХ ПРОВОДОВ ОРУ И ВОЗДУШНЫХ ЛЭП

Докт. техн. наук, доц. СЕРГЕЙ И. И., канд. техн. наук, доц. БЛАДЫКО Ю. В., студ. ШИНГЕЛЬ Д. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Разработка и проектирование современных распределительных устройств (РУ) высокого и сверхвысокого напряжений с сокращенными габаритами и компактных воздушных ЛЭП сдерживаются нерешенностью проблемы динамики их токоведущих конструкций с гибкими проводами. Для сооружаемых и эксплуатируемых в Беларуси закрытых РУ 110 кВ особую актуальность приобретает проблема электродинамической стойкости гибких проводов, так как они имеют уменьшенные по сравнению с открытыми РУ (ОРУ) междуфазные расстояния. Динамика проводов при коротком замыкании (КЗ) описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых представляет значительные трудности. Это подтверждается исследованиями проблемы электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода электроустановок в рамках международной программы под эгидой СИГРЭ, объединившей специалистов Европейского Союза, Канады, Японии и других промышленно развитых стран.

В статье рассматривается возможность приближенного математического моделирования задачи электродинамической стойкости проводов и оценивается погрешность такого приближения для различных геометрических характеристик пролетов с гибкими проводами и токов КЗ. При оценке электродинамической стойкости гибких проводов ОРУ и воздушных ЛЭП сравниваются *максимальные отклонения и тяжения* проводов с их допустимыми значениями. В соответствии с ГОСТ Р 50254–92 [1] расчет максимальных отклонений и тяжений проводов с учетом конструктивных элементов следует вести с помощью численных алгоритмов и компьютерных программ. Разработанный в БГПА численный метод расчета токоведущих конструкций с гибкими проводами основан на представлении провода абсолютно гибкой упругой нитью, уравнения динамики которой имеют следующий вид [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial s} \frac{\partial \bar{R}}{\partial s} + T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где T – модуль тяжения элемента провода, Н;

s – дуговая координата вдоль провода, м;

$\bar{R}[x, y, z]$ – радиус-вектор, определяющий мгновенное положение элемента нити в функции дуговой координаты;

\bar{P} – вектор суммарной распределенной весовой, электродинамической, ветровой и гололедной нагрузки, Н;

ρ – масса единицы длины провода, кг/м;

t – время, с.

Дуговая координата ds изменяется из-за растяжения и нагрева проводов токами короткого замыкания и является функцией тяжения и температуры

$$ds(T, \nu) = ds_0(1 + \alpha_t \nu)(1 + \alpha_y T), \quad (2)$$

где $ds(T, \nu)$ – длина элемента провода после растяжения и нагрева;

ds_0 – то же до растяжения и нагрева при $T = 0$ и $\nu = 0$;

α_t – коэффициент температурного удлинения провода, $1/^\circ\text{C}$;

ν – температура провода, $^\circ\text{C}$;

$\alpha_y = \frac{1}{EA}$ – коэффициент упругого удлинения провода;

E – модуль упругости провода, Н/м^2 ;

A – поперечное сечение провода, м^2 .

С учетом (2) уравнения (1) преобразуются к следующему виду [2]:

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} = \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s_0^2} + \frac{a^2 - \lambda^2}{(1+e)^2} \frac{\partial \bar{R}}{\partial s_0} \frac{\partial e}{\partial s_0} + \bar{P}^*, \quad (3)$$

где

$$a^2 = \frac{1}{\rho_0 \alpha_y (1 + \alpha_t \nu)}; \quad (4a)$$

$$\lambda^2 = \frac{T}{\rho_0 (1 + e)}; \quad (4b)$$

$$T = \frac{e - \alpha_t \nu}{\alpha_y (1 + \alpha_t \nu)}; \quad (4b)$$

$$e = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial s_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial s_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial s_0}\right)^2} - 1; \quad (4r)$$

e – относительное удлинение элемента провода;

\bar{P}^* – вектор суммарной нагрузки на единицу массы провода, Н/кг .

В (3) коэффициенты a и λ имеют физический смысл: они представляют собой соответственно скорости распространения продольных и поперечных волн в проводе. Расчеты по (4) показывают, что скорость продольных волн a для стандартных проводов ОРУ и ЛЭП составляет тысячу и более метров в секунду и на порядок превышает скорость распространения поперечных волн λ . Поэтому при численном решении задачи электродинамической стойкости проводов в условие устойчивости подставляется большая скорость a

$$\frac{h}{a} \geq \tau, \quad (5)$$

где τ, h – шаги численного интегрирования уравнений (3) по длине провода и по времени.

В качестве критериев электродинамической стойкости проводов принимаются их максимальные горизонтальные отклонения при отталкивании $y_{1\max}$ и сближении $y_{2\max}$, вертикальные отклонения при подъеме $z_{1\max}$ и опускании $z_{2\max}$ проводов, а также максимумы их тяжений при отталкивании электродинамическими усилиями $T_{2\max}$ и опускании проводов $T_{3\max}$ [3]. Расчеты при выборе шага h проводятся для пролетов длиной $l = 40$ и 400 м при изменении нагрузки P в диапазоне $10 \dots 40$ даН/м и относительных стрелах провеса ($f/l \cdot 100\%$) от 2 до 10 %. Сравнение максимальных тяжений и отклонений проводов при последовательном сгущении сетки показывает, что достаточная точность решения при вычислении $y_{1\max}$, $y_{2\max}$, $z_{1\max}$, $z_{2\max}$, $T_{2\max}$ обеспечивается при сравнительно небольшом числе узлов сетки $n = 60 \dots 80$. Хорошая повторяемость результатов для $T_{3\max}$ начинается с $n = 120$. При средней величине $h = 0,01l$ шаг $\tau = 0,01l/a \approx 10^{-5}l$ является достаточно малой величиной. В связи с этим при рассмотрении трехфазной системы проводов и наличии расщепленных фаз требуется большой объем компьютерных расчетов. Кроме того, использование коэффициента α_y , средняя величина которого может составлять $10^{-7} \dots 10^{-6}$ 1/даН, в формуле для тяжения (4в) $T = (10^6 \dots 10^7)e$ при обычном представлении e в ПЭВМ с точностью шесть значащих цифр после запятой будет производиться с большой погрешностью. Применение чисел удвоенной длины обеспечивает необходимую точность решения (3) и определение тяжения по (4в).

Во всех вариантах тестовых задач динамики провода под воздействием равномерной нагрузки и электродинамических усилий наблюдается незначительная разница тяжений между различными точками провода в пролете (рис. 1).

С учетом этого обстоятельства рассматривается возможность упрощения указанных уравнений. При $\frac{\partial T}{\partial s_0}$ и $\frac{\partial e}{\partial s_0}$, равных нулю, уравнения динамики провода (3) принимают следующий более простой вид:

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} = \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s_0^2} + \bar{P}^* \quad (6)$$

В (6) отсутствуют составляющие, содержащие скорость a , которые позволяют учесть в расчетах динамики провода влияние волн продольной деформации. Следовательно, значительно сокращается объем вычислений, так как в условие устойчивости Куранта для (6) подставляется скорость λ . Для вычисления скорости распространения поперечных волн λ по (46) нужно определить тяжение по суммарной длине провода в пролете

$$T = \frac{\frac{(l_t - l_0)}{l_0} - \alpha_t v}{\alpha_y (1 + \alpha_t v)}, \quad (7)$$

где l_t – длина провода в пролете при $t > 0$;

l_0 – то же до растяжения при $t = 0$.

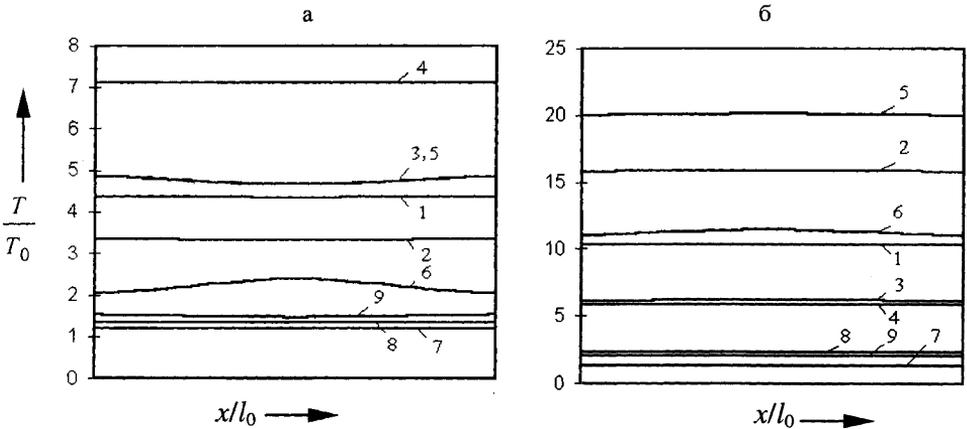


Рис. 1. Распределение относительных тяжений T/T_0 вдоль пролета: а – в момент времени наступления $T_{2\max}$; б – $T_{3\max}$; 1 – длина пролета $l_0 = 5$ м, относительная стрела провеса $f_0/l_0 = 2\%$; 2 – 5 м, 5%; 3 – 5 м, 10%; 4 – 40 м, 2%; 5 – 40 м, 5%; 6 – 40 м, 10%; 7 – 400 м, 2%; 8 – 400 м, 5%; 9 – 400 м, 10%; T_0 – начальное тяжение

Длина провода l_t вычисляется через его координаты

$$l_t = \int_0^{l_0} \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial s_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial s_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial s_0}\right)^2} ds_0 \quad (8)$$

Расчетная модель провода, соответствующая (6), называется гибкой нитью с малой стрелой провеса [4]. Она характеризуется отношением стрелы провеса к длине пролета f_0 , %. Согласно В. К. Качурину [4], для гибкой нити с малой стрелой f_0 не превышает 5%. Под это определение подпадает широкий класс задач динамики проводов РУ и воздушных ЛЭП. Прове-

денные исследования показывают, что разностные схемы, составленные для (3) и (6), дают близкие результаты. Заметное расхождение в результатах расчета $T_{3\max}$ и $y_{2\max}$ по (3) и (6) имеет место только при больших стрелах провеса ($f_0 > 5\%$) и внешних нагрузках в 40 даН/м (рис. 2 и 3), а также для $l = 5$ м. Поэтому для ускорения расчетов динамики проводов средних и больших пролетов рекомендуется использовать уравнения гибкой нити с малой стрелой, что подтверждается [5, 6]. Переход от дифференциальной формы записи закона Гука к интегральной позволяет отказаться от использования чисел удвоенной длины, что повышает экономичность компьютерных расчетов.

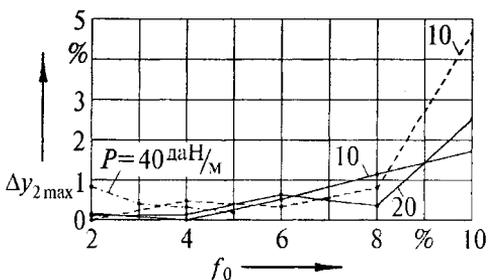


Рис. 2. Расхождение между величинами $y_{2\max}$, найденными по (3) и (6), при различных стрелах провеса: --- $l_0 = 5$ м; — — — 40; - - - - 400 м

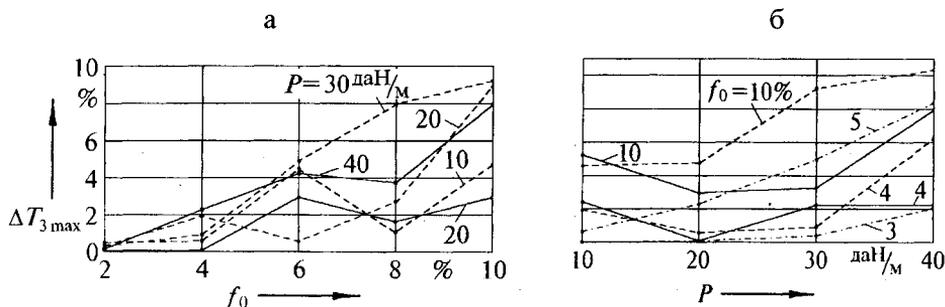


Рис. 3. Расхождение между $T_{3\max}$ по (3) и (6): а — зависимость $\Delta T_{3\max}$ от f_0 ; б — от P ; --- $l_0 = 5$ м; — — — 40; - - - - 400 м

Указанные рекомендации по использованию приближенных уравнений (6) проверены при расчете параметров электродинамической стойкости гибких шин типовых ОРУ 110...330 кВ без учета отпаек к электрическим аппаратам в диапазоне токов 10...50 кА при относительных стрелах провеса от 2 до 10 % (рис. 4–6). В расчетах не учитывается упругая податливость порталов. Эти результаты в целом согласуются с данными, полученными ранее для заданной равномерной нагрузки.

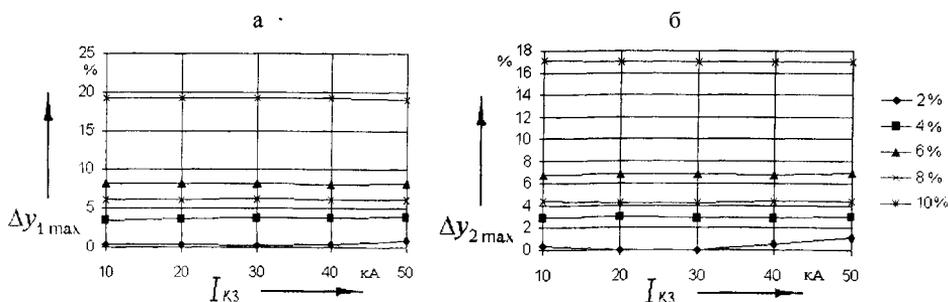


Рис. 4. Расхождение по (3) и (6) для пролета $l_0 = 400$ м при относительных стрелах провеса от 2 до 10 %: а — между величинами $y_{1\max}$; б — $y_{2\max}$

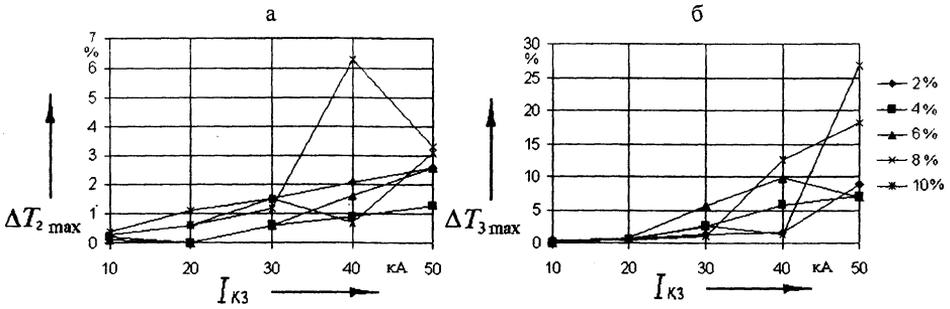


Рис. 5. Расхождения для пролета $l_0 = 40$ м: а – между $T_{2\max}$; б – $T_{3\max}$

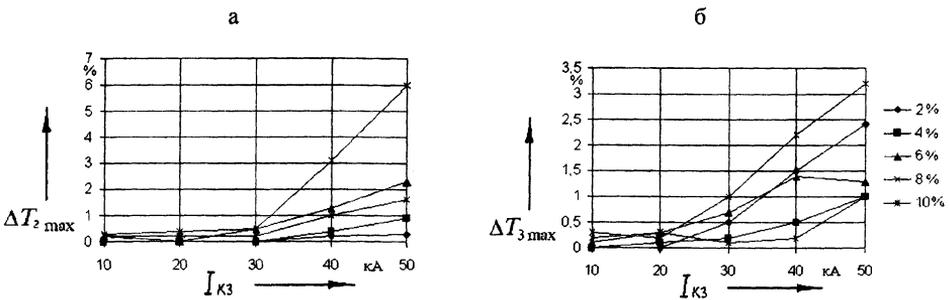


Рис. 6. Расхождения для пролета $l_0 = 400$ м: а – между $T_{2\max}$; б – $T_{3\max}$

ВЫВОД

Выполнена оценка возможности приближенного расчета параметров электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок по уравнениям (6) для различных длин пролетов и величин токов КЗ без учета расщепления фаз, наличия отпаек к электрическим аппаратам и упругой податливости опорных конструкций. Установлено влияние относительной стрелы провеса на параметры электродинамической стойкости гибких проводов.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 50254–92. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.01.94. – М.: Госстандарт России, 1993. – 57 с.
- Сергей И. И. Численный метод расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств электростанций // Электрические станции. – 1999. – № 11. – С. 47–54.
- Miri A. M., Heinrich C. Dynamicische Kurzschlußwirkungen in Hochspannungsschaltanlagen mit Einfach- und Bündelleitern. – Überblick // Elektrizitätswirtschaft. – 1980. – 79, № 19. – S. 708–712.
- Качурин В. К. Гибкие нити с малыми стрелками. – М.: Гостехиздат, 1956. – 172 с.
- Александров Г. Н., Полевой А. И., Половой И. Ф. Движение проводов расщепленной фазы воздушной линии при коротких замыканиях // Электричество. – 1980. – № 6. – С. 12–18.
- Masaru Yamakawa. A Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a Bundle Conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – B99, № 9. – P. 569–576.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 31.10.2001