УДК 621.315

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЯВНОЙ СХЕМЫ

Инж. ПОНОМАРЕНКО Е. Г.

Белорусский национальный технический университет

В распределительных устройствах высокого напряжения электростанций и подстанций в Республике Беларусь применяются преимущественно токоведущие конструкции с гибкими проводами. Гибкость проводов позволяет им принимать форму, обусловленную внешними нагрузками. При протекании по ним токов КЗ в результате электродинамического взаимодействия соседних проводников может произойти их недопустимое по условию электрической прочности изоляционного промежутка сближение. На электрические аппараты распределительных устройств и опорные конструкции при этом воздействуют ударные нагрузки. Это приводит к необходимости разработки методов расчета динамики гибких проводов при КЗ, с помощью которых можно было бы определить критерии электродинамической стойкости проводов – максимальные отклонения и тяжения [1].

В научных трудах широкое применение получила расчетная модель провода в виде гибкой упругой нити [2]. Представление провода расчетной моделью с распределенной массой позволяет более точно выполнить расчет электродинамического взаимодействия и вычислить характеристики любой его точки. Пространственное движение провода в виде гибкой упругой нити при КЗ описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами [2]. Такие уравнения могут быть решены только с помощью численных методов. Численные методы расчета динамики проводов при КЗ получили развитие на кафедре «Электрические станции» с 1974 г. Большой вклад в разработку численных методов расчета внесли зарубежные ученые [2].

При численном расчете производные в уравнениях движения проводов заменяются конечно-разностными отношениями. Для решения конечно-разностных алгебраических уравнений могут быть использованы явная и неявная схемы. Явная схема дает меньший объем вычислений и позволяет рассчитывать даже разрывные решения [2]. Поэтому она была применена к решению дифференциальных уравнений движения проводов. Разработанная методика расчета электродинамической стойкости реализована в ряде компьютерных программ (CONEF, BUSEF). Она позволяет учитывать действие основных конструктивных элементов распределительных устройств, таких как порталы, гирлянды изоляторов, спуски к электрическим аппаратам. Однако в процессе эксплуатации программных продуктов были выявлены их некоторые недостатки (например, неустойчивость численного решения при больших токах короткого замыкания (табл. 1)), что особенно актуально в связи с ростом их уровней. В случаях, отраженных

Таблица 1

Случаи аварийного останова расчета по КП BUSEF

Пролет	Ток, кА
110 кВ, 20,0 м, АС-500/27	39
110 кВ, 27,5 м, АС-500/27	45
220 кВ, 30,8 м, АС-300/39	71
220 кВ, 40,5 м, АС-300/39	87

в табл. 1, сбой в программе происходит из-за учета гибкости порталов, прогибом которых определяются краевые условия для дифференциальных уравнений движения гибкой нити. Недостатком явной схемы в данном случае является ее чувствительность к переменным краевым условиям.

При расчете гибкой ошиновки пролетов распределительных устройств с отпайками к электрическим аппаратам получение устойчивых решений становится еще более сложной задачей. Спуски в отличие от сильно натянутых главных шин монтируются практически без тяжения и при движении могут легко искривляться и испытывать значительные резкопеременные нагрузки. Все это может нарушить устойчивость численного решения и привести к аварийному останову программы.

Перечисленные выше проблемы частично могут быть устранены путем применения неявной схемы для решения конечно-разностных уравнений. Преимуществом неявной схемы является ее безусловная сходимость [3]. Недостаток – большой объем вычислений, но в связи со значительным ростом производительности ЭВМ в последнее время эта проблема отодвигается на второй план.

На первом этапе используем неявную схему для решения уравнений движения провода, представленного гибкой нитью с малой стрелой провеса. Такая расчетная модель провода применяется, когда отношение стрелы провеса к длине пролета составляет не более 5 % [2]. Дифференциальные уравнения движения провода в этом случае имеют следующий вид [2]:

$$\frac{\partial^2 \overline{R}}{\partial t^2} - \lambda^2 \frac{\partial^2 \overline{R}}{\partial s_0^2} = \overline{P}^*, \tag{1}$$

где $\overline{P}^*$ – вектор распределенной внешней нагрузки на единицу массы провода.

Запишем (1) в виде конечно-разностных уравнений [2]

$$\frac{\hat{\overline{R}}_k - 2\overline{R}_k + \check{\overline{R}}_k}{\tau^2} - \lambda^2 \frac{\hat{\overline{R}}_{k+1} - 2\hat{\overline{R}}_k + \hat{\overline{R}}_{k-1}}{h^2} = \overline{P}_k^*, \tag{2}$$

где индекс k – номер узла сетки численного решения уравнений (k = 1, 2, …, n – 1); n – количество узлов.

Решим систему конечно-разностных уравнений методом прогонки [3]. Для этого выполним следующие преобразования:

$$\left(-\lambda^2 \hat{\overline{R}}_{k+1} + 2\lambda^2 \hat{\overline{R}}_k - \lambda^2 \hat{\overline{R}}_{k-1}\right)\tau^2 + \hat{\overline{R}}_k h^2 = \overline{P}_k^* \tau^2 h^2 + \left(2\overline{R}_k - \check{\overline{R}}_k\right)h^2. \tag{3}$$

Запишем (3) относительно координат k-го узла на новом (t + 1)-м слое

$$\hat{\overline{R}}_k = \overline{a}_k + b_k \hat{\overline{R}}_{k+1}, \tag{4}$$

где

$$\overline{a}_k = \frac{\left(\overline{P}_k^* \tau^2 + 2\overline{R}_k - \overset{\vee}{\overline{R}}_k\right) h^2 + \lambda^2 \tau^2 \overset{\wedge}{\overline{R}}_{k-1}}{2\lambda^2\tau^2 + h^2};$$
$$b_k = \frac{\lambda^2\tau^2}{2\lambda^2\tau^2 + h^2}. \quad (5)$$

Разделим (5) на h^2

$$\overline{a}_k = \frac{\overline{P}_k^* \tau^2 + 2\overline{R}_k - \overset{\vee}{\overline{R}}_k + f \overset{\vee}{\overline{R}}_{k-1}}{2f + 1};$$
$$b_k = \frac{f}{2f + 1}, \quad (6)$$

где $f = \lambda^2 \left(\frac{\tau}{h}\right)^2$.

Запишем (4) для $(k - 1)$-го узла сетки

$$\overset{\wedge}{\overline{R}}_{k-1} = \overline{a}_{k-1} + b_{k-1} \overset{\wedge}{\overline{R}}_k. \quad (7)$$

Подставим (7) в (3) и выполним преобразования к виду (4)

$$\overset{\wedge}{\overline{R}}_k = \overline{a}_k + b_k \overset{\wedge}{\overline{R}}_{k+1},$$

где

$$\overline{a}_k = \frac{\overline{a}_{k-1} f + \overline{P}_k^* \tau^2 + 2\overline{R}_k - \overset{\vee}{\overline{R}}_k}{f(2 - b_{k-1}) + 1};$$
$$b_k = \frac{f}{f(2 - b_{k-1}) + 1}. \quad (8)$$

Из сравнения выражений (6) и (8) для рекуррентных формул определения прогоночных коэффициентов видно, что $b_{k-1} = 0$ и $\overline{a}_{k-1} = \overset{\vee}{\overline{R}}_{k-1}$. Тогда при $k = 2$ $b_1 = 0$ и $\overline{a}_1 = \overset{\vee}{\overline{R}}_1$.

Решение конечно-разностных уравнений методом прогонки производится в следующем порядке: 1) прямой ход прогонки – по выражениям (8) заготавливаются коэффициенты $\overline{a}_k$ и b_k при изменении индекса k от 2 до n; 2) обратный ход – по (4) определяются координаты $\overset{\wedge}{\overline{R}}_k$ при изменении k от n до 2.

Разработанный метод численного решения дифференциальных уравнений по неявной схеме был использован при составлении компьютерной программы BUSNJA, которая предназначена для расчета динамики проводов по уравнениям гибкой упругой нити с малой стрелой провеса. С ее помощью были проведены расчеты для опытного пролета [4] (рис. 1), которые сравнивались с расчетами, полученными по явной схеме, реализованной в компьютерной программе BUSEF [2].

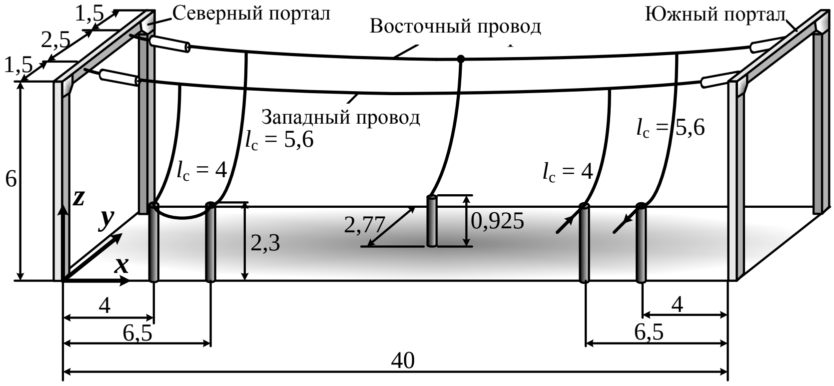

Рис. 1. Геометрия тестового пролета LABORELEC [5]: масса гирлянды – 52,3 кг; длина – 1,54 м; жесткость в точке крепления провода – около $3 \cdot 10^5$ Н/м; масса стойки – 720 кг; масса траверсы – 550 кг; скорость ветра – 3,5 м/с; **случай 4**: провод – М324; стрела провеса – 0,95 м; начальная температура провода – 14,1 ºС; ток КЗ – 29,4 кА (ударный – 72,7 кА); постоянная времени – 0,033 с; продолжительность КЗ – 0,8 с; **случай 5:** провод – М105; стрела провеса – 1,245 м; температура – 19,3 ºС; ток КЗ – 28,8 кА (65,4 кА); постоянная времени – 0,019 с; продолжительность КЗ – 0,5 с; **случай 6** (с добавочным спуском в середине пролета): провод – М324; стрела провеса: восточный провод – 1,1 м, западный – 1,0 м; температура – 19 ºС; ток КЗ – 27,9 кА (73,3 кА); постоянная времени – 0,033 с; продолжительность КЗ – 0,81 с

На рис. 2–5 представлены зависимости основных критериев электродинамической стойкости от величины тока двухфазного КЗ. Это: $y_{1\max}$ и $y_{2\max}$ – максимальные отклонения средних точек проводов соответственно при их отталкивании и сближении; $T_{2\max}$ и $T_{3\max}$ – характерные пики тяжений соответственно при их отклонении и падении [2]. Штриховой линией показаны результаты расчетов с использованием явной схемы. Из диаграмм видно, что достигается хорошее совпадение результатов. Небольшое различие наблюдается лишь в области больших токов (>40 кА) для $y_{2\max}$ и $T_{3\max}$, что обусловлено увеличением погрешности расчета по явной схеме.

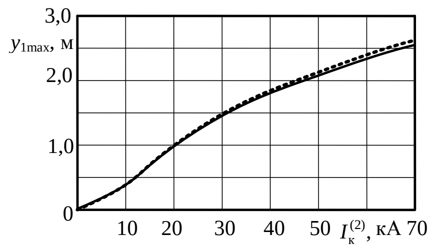

Рис. 2. Максимальные отклонения $y_{1\max}$

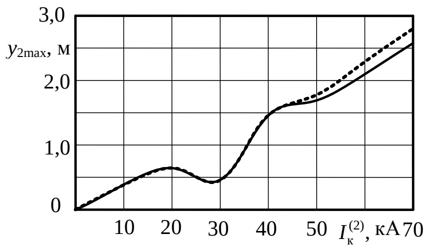

Рис. 3. Максимальные отклонения $y_{2\max}$

В распределительных устройствах стрела провеса гибких шин со спусками может превышать 5 % длины пролета. Поэтому математическое описание их движения и ненатянутых спусков производится по точным уравнениям упругой нити [2, с. 15]:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \left[\lambda^2 + b^2\left(\frac{\partial x}{\partial s_0}\right)^2\right]\frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2\frac{\partial x}{\partial s_0}\frac{\partial y}{\partial s_0}\frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2\frac{\partial x}{\partial s_0}\frac{\partial z}{\partial s_0}\frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_x^*;$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = b^2\frac{\partial y}{\partial s_0}\frac{\partial x}{\partial s_0}\frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2\left(\frac{\partial y}{\partial s_0}\right)^2\right]\frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2\frac{\partial y}{\partial s_0}\frac{\partial z}{\partial s_0}\frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_y^*; \qquad (9)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = b^2\frac{\partial z}{\partial s_0}\frac{\partial x}{\partial s_0}\frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2\frac{\partial z}{\partial s_0}\frac{\partial y}{\partial s_0}\frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + \left[\lambda^2 + b^2\left(\frac{\partial z}{\partial s_0}\right)^2\right]\frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + P_z^*.$$

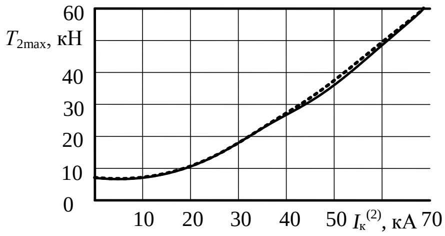

Рис. 4. Максимальные тяжения $T_{2\max}$

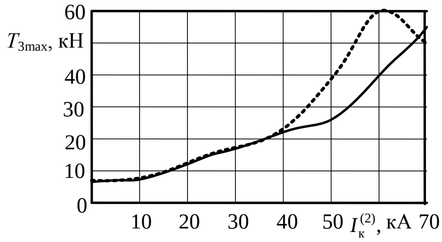

Рис. 5. Максимальные тяжения $T_{3\max}$

Производные в системе уравнений (9) заменяются разностными выражениями [2, с. 21] для нового (t + 1)-го слоя, после чего объединяются подобные члены. В результате преобразований получается система линейных алгебраических уравнений, которую удобно представить в матричном виде:

$$C\overline{U}_{k+1} + B\overline{U}_k + C\overline{U}_{k-1} = \overline{D}, \qquad (10)$$

где $\overline{U} = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix}$ – матрица-вектор координат провода на (t + 1)-м временном слое; C и B – матрицы коэффициентов; $\overline{D} = \begin{pmatrix} \check{x}_k - 2x_k - \tau^2 \cdot F_{xk} \\ \check{y}_k - 2y_k - \tau^2 \cdot F_{yk} \\ \check{y}_k - 2y_k - \tau^2 \cdot F_{yk} \end{pmatrix}$ – матрица правых частей уравнений; τ – шаг численного дифференцирования по времени.

Умножаем (10) на матрицу C^{-1}

$$\overline{U}_{k+1} + C^{-1}B\overline{U}_k + \overline{U}_{k-1} = C^{-1}\overline{D}.$$

Вводим замену

$$\overline{U}_{k+1} + A\overline{U}_k + \overline{U}_{k-1} = \overline{F}. \qquad (11)$$

Уравнение (11) решается методом матричной прогонки. Приводим (11) к виду, удобному для выражения матриц прогонки:

$$\overline{U}_k = -A^{-1}\overline{U}_{k+1} - A^{-1}\left(\overline{U}_{k-1} - \overline{F}\right). \tag{12}$$

Матрицы прогонки:

$$\begin{gathered} E_k = -A^{-1}; \\ \overline{b}_k = -A^{-1}\left(\overline{U}_{k-1} - \overline{F}\right) = E_k\left(\overline{U}_{k-1} - \overline{F}\right). \end{gathered} \tag{13}$$

Для (k – 1)-го шага

$$\overline{U}_{k-1} = E_{k-1}\overline{U}_k + \overline{b}_{k-1}. \tag{14}$$

Подставим (14) в (11) и после преобразований получим

$$\overline{U}_k = -\left(A + E_{k-1}\right)^{-1}\overline{U}_{k+1} + \left(A + E_{k-1}\right)^{-1}\left(\overline{F} - \overline{b}_{k-1}\right). \tag{15}$$

Из выражения (15) вычленяем рекуррентные матрицы:

$$\begin{gathered} E_k = -\left(A + E_{k-1}\right)^{-1}; \\ \overline{b}_k = \left(A + E_{k-1}\right)^{-1}\left(\overline{F} - \overline{b}_{k-1}\right) = E_k\left(\overline{b}_{k-1} - \overline{F}\right). \end{gathered} \tag{16}$$

Алгоритм матричной прогонки будет выглядеть следующим образом: 1) формирование матриц коэффициентов C, B и матрицы правых частей уравнений $\overline{D}$; 2) вычисление матриц $\overline{F} = C^{-1}\overline{D}$ и $A = C^{-1}B$; 3) вычисление прямым ходом матриц E_k и $\overline{b}_k$ по (16), полагая, что $E_1 = 0$ и $\overline{b}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$; 4) вычисление обратным ходом координат на (t + 1)-м слое

$$\overline{U}_k = E_k\overline{U}_{k+1} + \overline{b}_k. \tag{17}$$

Расчет динамики ненатянутых спусков при КЗ имеет особенности. Ненатянутый спуск, представленный абсолютно гибкой нитью и разбитый на конечные отрезки в соответствии с шагом интегрирования, может принимать любое пространственное положение. Поэтому в отдельных точках возникают изломы провода, чего не может быть в действительности из-за наличия жесткости провода на изгиб. Изломы спуска приводят к тому, что тяжение, рассчитанное по закону Гука [2], становится сильно завышенным. В итоге это приводит к искажению результатов расчета. Для приближенного учета изгибной жесткости провода в правые части (9) вводится сила, которая появляется при изгибе спуска и препятствует ему. При определении места приложения, модуля и направления данной силы рассматриваются не свойства провода как гибкой упругой нити, а свойства модели провода в виде конечного числа линейных отрезков, которыми он представлен при численном решении (9) (рис. 6). Таким образом, при изгибе провода возникает угол между отдельными отрезками. Вводимая сила действует подобно усилию пружины П, работающей на сжатие. Усилие на (i + 1)-й элемент провода со стороны (i – 1)-го

$$\overline{F}_{i+1,i-1} = EJ\,\frac{L_{i-1,i} + L_{i,i+1} - L_{i-1,i+1}}{L_{i-1,i} + L_{i,i+1}}, \tag{18}$$

где EJ – коэффициент изгибной жесткости, который подбирается экспериментально таким образом, чтобы рассчитываемая сила повышала точность численного решения и при этом минимально влияла на ход вычислительного процесса.

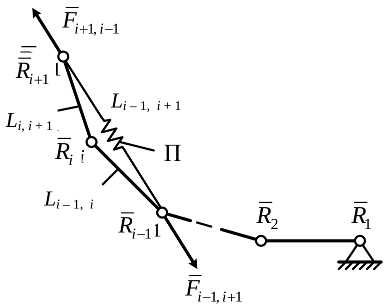

Рис. 6. Изгиб спуска

При такой форме записи (18) в прямом проводе эта сила отсутствует, а при наличии изгиба стремится выпрямить его. На (i + 1)-й элемент, кроме того, действует усилие и с противоположной стороны от (i + 3)-го элемента. $\overline{F}_{i+1,i-1}$ и $\overline{F}_{i+1,i+3}$, действуя вдоль пролета, при сложении практически компенсируют друг друга и не влияют на ход решения.

Разработанный метод численного решения уравнений движения провода (9) реализован в компьютерной программе FLEBUS, работающей в ОС WINDOWS. В программе учитываются основные конструктивные элементы пролетов распределительных устройств с гибкой ошиновкой: порталы, гирлянды изоляторов, электрические аппараты и отпайки к ним (до трех отпаек), а также параметры короткого замыкания и климатические условия.

Для оценки достоверности результатов расчета по компьютерной программе FLEBUS проводится комплексное сопоставление расчетных и экспериментальных данных. В качестве экспериментальных данных используются результаты испытаний на тестовом пролете LABORELEC [4] (рис. 1), рекомендованные СИГРЭ для сравнительной оценки программных средств.

Расчетные и опытные данные в виде совмещенных диаграмм приводятся на рис. 7–12. В табл. 2 дается сопоставление максимальных отклонений $y_{\max} = y_{1\max} + y_{2\max}$ и пиков тяжений $T_{2\max}$ и $T_{3\max}$. Из анализа приведенных диаграмм и сопоставления видно, что достигается хорошее совпадение результатов расчета и опытных измерений с допустимой для численных расчетов погрешностью. Погрешность обусловлена допущениями, принятыми для модели провода в виде гибкой упругой нити. Это неучет сопротивления провода кручению и изгибу. При программной реализации уравнений (9) не были учтены реальные процессы, связанные с динамикой гирлянд изоляторов при КЗ: нагрев и растяжение отдельных ее элементов, шарнирное соединение изоляторов между собой. Большое влияние на динамику проводов при КЗ оказывает податливость опорных конструкций [2], которые определяют краевые условия при решении уравнений (9). Порталы в программе представлены упрощенно в виде сосредоточенных масс траверсы и стоек, закрепленных на пружинах [2]. В реальности траверса и стойки крепятся друг к другу шарнирно и состоят из множества металлических элементов различного профиля, скрепленных между собой болтовыми соединениями. В эксплуатации порталов могут также наблюдаться местные дефекты в виде ослабления затяжки резьбовых соединений. Поэтому наблюдается разница между расчетными и экспериментально-измеренными отклонениями порталов (рис. 7), что, очевидно, и вносит наибольшую погрешность в расчеты. Также погрешность обусловлена неточностью задания исходных данных.

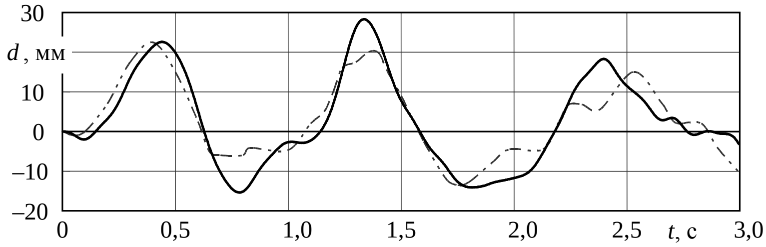

Рис. 7. Перемещение северного портала (случай 4): ——— – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

а

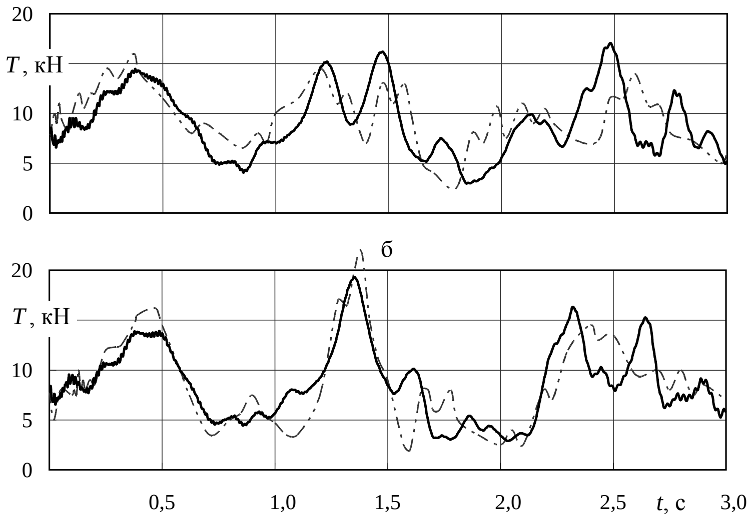

Рис. 8. Динамика тяжений в точке крепления проводов к северному порталу (случай 4): а – восточный провод; б – западный; ▬▬▬ – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

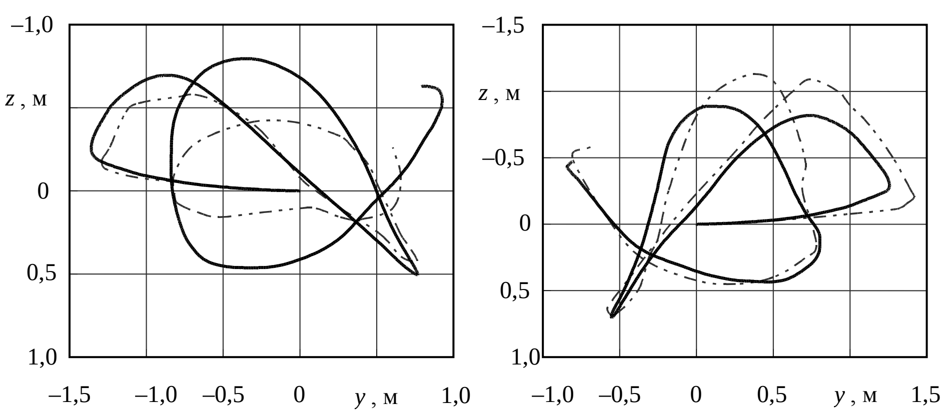

Рис. 9. Траектории движения проводов в средней точке пролета (случай 4): а – восточный провод; б – западный; ▬▬▬ – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

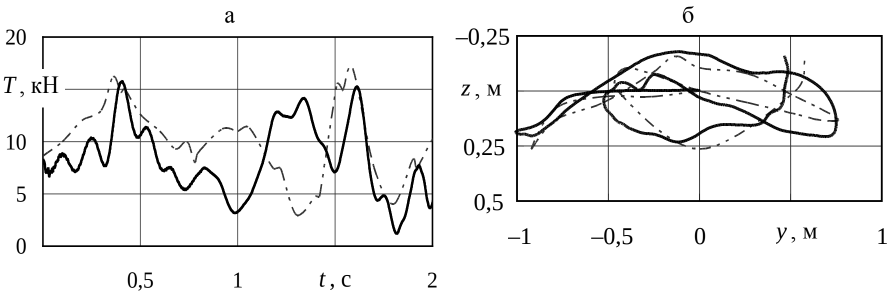

Рис. 10. а – динамика тяжения; б – траектория движения восточного провода в средней точке пролета (случай 6 – спуск в середине пролета): ▬▬▬ – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

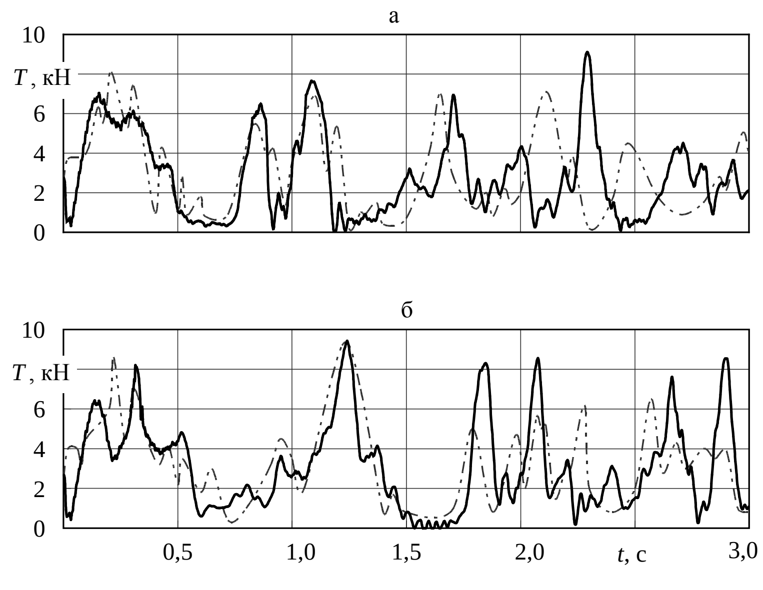

Рис. 11. Динамика тяжений в точке крепления проводов к северному порталу (случай 5): а – восточный провод; б – западный; ——— – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

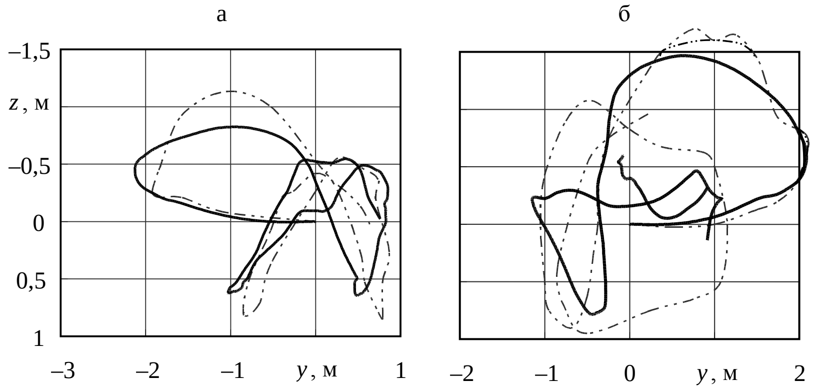

Рис. 12. Траектории движения проводов в средней точке пролета (случай 5): а – восточный провод; б – западный; ——— – расчет по программе FLEBUS; — · · — · · – экспериментальные данные

Таблица 2

Сопоставление опытных и расчетных критериев электродинамической стойкости пролета с гибкими шинами

Параметры провода	Восточный			Западный		
	Опыт	Расчет	Расхождение, %	Опыт	Расчет	Расхождение, %
Случай 4						
y_{max}, м	2,05	2,11	2,9	2,00	1,82	–9,0
T_{2max}, кН	16,0	14,5	–9,4	16,0	14,0	–12,5
T_{3max}, кН	14,7	15,1	2,7	22,0	19,5	–11,3
Случай 5						
y_{max}, м	2,85	2,97	4,2	3,15	3,23	2,5
T_{2max}, кН	8,30	7,00	–15,6	8,60	8,20	–4,7
T_{3max}, кН	6,9	7,49	8,6	9,37	9,40	0,3
Случай 6						
y_{max}, м	1,68	1,74	3,6	–	–	–
T_{2max}, кН	16,2	15,7	–3,1	–	–	–
T_{3max}, кН	17	15,2	–10,5	–	–	–

Для проверки работоспособности компьютерной программы FLEBUS при больших токах КЗ были проведены расчеты для шинного пролета типового ОРУ 110 кВ длиной 27 м с тремя отпайками [5] при изменении тока от 50 до 150 кА. Результаты расчета представлены в табл. 3. Как видно из таблицы, расчеты при больших токах выполняются успешно, при этом с ростом токов КЗ происходит плавное изменение основных показателей расчета: максимальных отклонений в середине пролета y_{max} и тяжений T_{max} в первом цикле колебаний провода.

Для иллюстрации влияния жесткости провода в уравнениях (9) на ход компьютерного расчета на рис. 13 приведены диаграммы тяжений в спуске восточного провода экспериментального пролета LABORELEC с учетом и без учета жесткости. Всплески и провалы тяжения на рис. 13а, возникающие в результате изломов провода, указывают на нарушение устойчивости численного решения, которые в определенных случаях могут привести к аварийному останову расчета по программе.

Таблица 3

Проверка устойчивости численного решения по КП FLEBUS

Параметры провода	Ток двухфазного короткого замыкания, кА										
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Фаза А											
y_{max}, м	1,60	1,68	1,72	1,68	1,69	1,84	1,82	1,92	2,08	1,89	1,96
T_{max}, кН	1969	3133	3929	3972	4879	6040	7363	8293	10839	13516	17426
Фаза В											
y_{max}, м	1,40	1,78	2,00	2,19	2,34	2,47	2,56	2,61	2,72	2,76	2,85
T_{max}, кН	2792	3596	4510	5653	6072	7460	9506	13549	14930	12929	17530

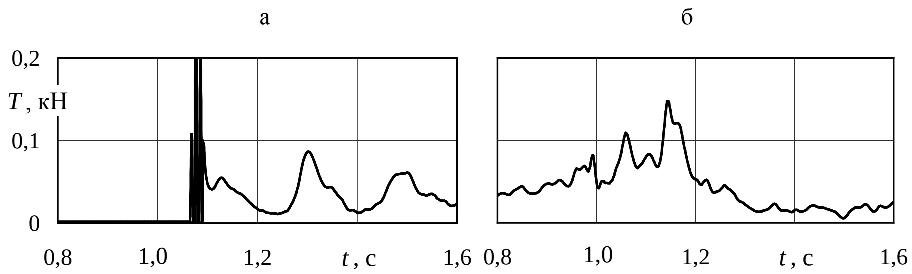

Рис. 13. Динамика тяжения в спуске восточного провода экспериментального пролета LABORELEC: а – без учета жесткости провода спуска; б – с учетом

Искажение результатов численного решения возникало также из-за того, что влияние веса и тяжения спусков на главные шины учитывалось на один шаг интегрирования по времени сзади. Указанная погрешность была устранена с помощью применения простой одношаговой итерации.

Разработанная компьютерная программа FLEBUS может быть рекомендована для расчета параметров электродинамической стойкости как пролетов типовых РУ с гибкими шинами, так и пролетов со сложной пространственной конфигурацией. Программа снабжена дружественным пользовательским интерфейсом, имеет в своем составе инструменты для графического и текстового отображения результатов расчета как в процессе, так и после его выполнения. Для удобства пользователя имеются встроенные каталоги проводов и гирлянд изоляторов, а также расширенная справочная система.

При оценке электродинамической стойкости конструкции в проектной практике нельзя полагаться на результаты одного расчета. Следует провести серию расчетов с подбором наиболее тяжелых условий короткого замыкания для данной конструкции, изменяя величину тока, продолжительность, вид и место короткого замыкания, климатические условия и другие параметры. Причем наибольшие возможные ток и продолжительность КЗ далеко не всегда будут являться самыми тяжелыми условиями с точки зрения электродинамической стойкости гибких шин со спусками.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствован численный метод расчета динамики гибкой ошиновки ОРУ при КЗ по уравнениям гибкой упругой нити с применением неявной схемы.

2. На основе численного метода разработана компьютерная программа расчета динамики гибкой ошиновки РУ при КЗ FLEBUS. Произведены апробирование и оценка достоверности результатов расчета по программе с использованием экспериментальных данных, по результатам которых можно утверждать, что данная программа является самостоятельным инструментом для расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. К о р о т к и е замыкания в электроустановках: методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323–95. – Введ. 01.03.1999. – Минск, 1999. – 57 с.

2. 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.

3. К а л и т к и н, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 509 с.

4. T h e m e c h a n i c a l effects of short-circuit currents open-air substations (rigid or flexible bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.

5. Д в о с к и н, Л. И. Схемы и конструкции распределительных устройств / Л. И. Двоскин. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 220 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 26.06.2008