

## **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]:

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

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

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

$$\frac{\hat{R}_k - 2\bar{R}_k + \check{R}_k}{\tau^2} - \lambda^2 \frac{\hat{R}_{k+1} - 2\hat{R}_k + \hat{R}_{k-1}}{h^2} = \bar{P}_k^*, \quad (2)$$

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

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

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

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

$$\hat{R}_k = \bar{a}_k + b_k \hat{R}_{k+1}, \quad (4)$$

где

$$\bar{a}_k = \frac{\left( \bar{P}_k^* \tau^2 + 2\bar{R}_k - \check{R}_k \right) h^2 + \lambda^2 \tau^2 \hat{R}_{k-1}}{2\lambda^2 \tau^2 + h^2}; \quad (5)$$

$$b_k = \frac{\lambda^2 \tau^2}{2\lambda^2 \tau^2 + h^2}.$$

Разделим (5) на  $h^2$

$$\bar{a}_k = \frac{\bar{P}_k^* \tau^2 + 2\bar{R}_k - \check{R}_k + f \check{R}_{k-1}}{2f + 1}; \quad (6)$$

$$b_k = \frac{f}{2f + 1},$$

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

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

$$\hat{R}_{k-1} = \bar{a}_{k-1} + b_{k-1} \hat{R}_k. \quad (7)$$

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

$$\hat{R}_k = \bar{a}_k + b_k \hat{R}_{k+1},$$

где

$$\bar{a}_k = \frac{\bar{a}_{k-1} f + \bar{P}_k^* \tau^2 + 2\bar{R}_k - \check{R}_k}{f(2 - b_{k-1}) + 1}; \quad (8)$$

$$b_k = \frac{f}{f(2 - b_{k-1}) + 1}.$$

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

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

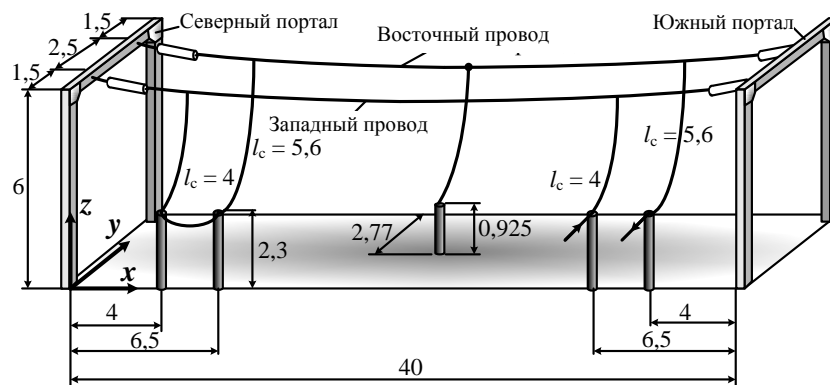


Рис. 1. Геометрия тестового пролета LABORELEC [5]: масса гирлянды – 52,3 кг; длина – 1,54 м; жесткость в точке крепления провода – около  $3 \cdot 10^5$  Н/м; масса стойки – 720 кг; масса траверсы – 550 кг; скорость ветра – 3,5 м/с; **случай 4**: провод – М324; стрела провеса – 0,95 м; начальная температура провода – 14,1 °С; 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 °С; 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 °С; 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.

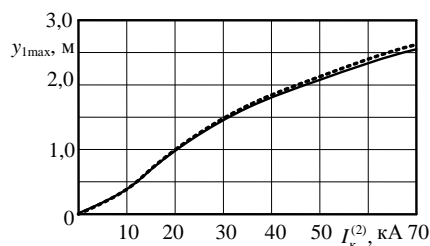


Рис. 2. Максимальные отклонения  $y_{1\max}$

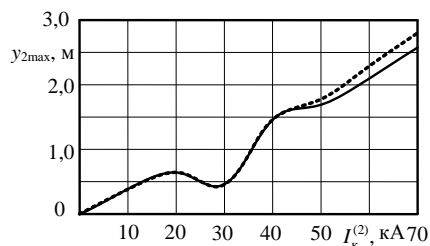


Рис. 3. Максимальные отклонения  $y_{2\max}$

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]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \left[ \lambda^2 + b^2 \left( \frac{\partial x}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + F_x^*; \\ \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + \left[ \lambda^2 + b^2 \left( \frac{\partial y}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + F_y^*; \quad (9) \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial x}{\partial s_0} \frac{\partial^2 x}{\partial s_0^2} + b^2 \frac{\partial z}{\partial s_0} \frac{\partial y}{\partial s_0} \frac{\partial^2 y}{\partial s_0^2} + \left[ \lambda^2 + b^2 \left( \frac{\partial z}{\partial s_0} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 z}{\partial s_0^2} + F_z^*.\end{aligned}$$

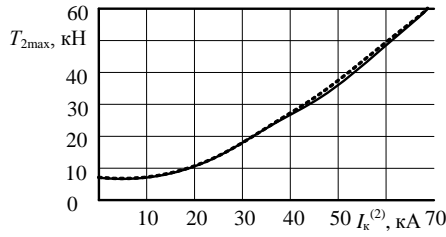


Рис. 4. Максимальные тяжения  $T_{2\max}$

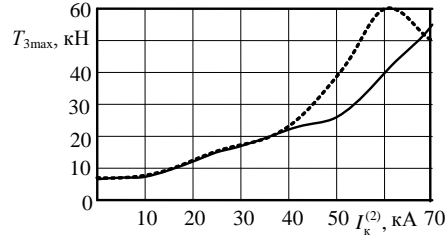


Рис. 5. Максимальные тяжения  $T_{3\max}$

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:

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

где  $\bar{U} = \begin{pmatrix} \wedge \\ x \\ \wedge \\ y \\ \wedge \\ z \end{pmatrix}$  – матрица-вектор координат провода на  $(t + 1)$ -м временном

слое;  $C$  и  $B$  – матрицы коэффициентов;  $\bar{D} = \begin{pmatrix} \vee \\ x_k - 2x_k - \tau^2 \cdot F_{xk} \\ \vee \\ y_k - 2y_k - \tau^2 \cdot F_{yk} \\ \vee \\ y_k - 2y_k - \tau^2 \cdot F_{yk} \end{pmatrix}$  – матрица

правых частей уравнений;  $\tau$  – шаг численного дифференцирования по времени.

Умножаем (10) на матрицу  $C^{-1}$

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

Вводим замену

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

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

$$\bar{U}_k = -A^{-1}\bar{U}_{k+1} - A^{-1}(\bar{U}_{k-1} - \bar{F}). \quad (12)$$

Матрицы прогонки:

$$\begin{aligned} E_k &= -A^{-1}; \\ \bar{b}_k &= -A^{-1}(\bar{U}_{k-1} - \bar{F}) = E_k(\bar{U}_{k-1} - \bar{F}). \end{aligned} \quad (13)$$

Для  $(k-1)$ -го шага

$$\bar{U}_{k-1} = E_{k-1}\bar{U}_k + \bar{b}_{k-1}. \quad (14)$$

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

$$\bar{U}_k = -(A + E_{k-1})^{-1}\bar{U}_{k+1} + (A + E_{k-1})^{-1}(\bar{F} - \bar{b}_{k-1}). \quad (15)$$

Из выражения (15) вычлняем рекуррентные матрицы:

$$\begin{aligned} E_k &= -(A + E_{k-1})^{-1}; \\ \bar{b}_k &= (A + E_{k-1})^{-1}(\bar{F} - \bar{b}_{k-1}) = E_k(\bar{b}_{k-1} - \bar{F}). \end{aligned} \quad (16)$$

Алгоритм матричной прогонки будет выглядеть следующим образом:  
1) формирование матриц коэффициентов  $C$ ,  $B$  и матрицы правых частей уравнений  $\bar{D}$ ; 2) вычисление матриц  $\bar{F} = C^{-1}\bar{D}$  и  $A = C^{-1}B$ ; 3) вычисле-

ние прямым ходом матриц  $E_k$  и  $\bar{b}_k$  по (16), полагая, что  $E_1 = 0$  и  $\bar{b}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ ;

4) вычисление обратным ходом координат на  $(t+1)$ -м слое

$$\bar{U}_k = E_k\bar{U}_{k+1} + \bar{b}_k. \quad (17)$$

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 пред-

ставлен 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

$$\bar{F}_{i+1,i-1} = EJ \frac{L_{i-1,i} + L_{i,i+1} - L_{i-1,i+1}}{L_{i-1,i} + L_{i,i+1}}, \quad (18)$$

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.

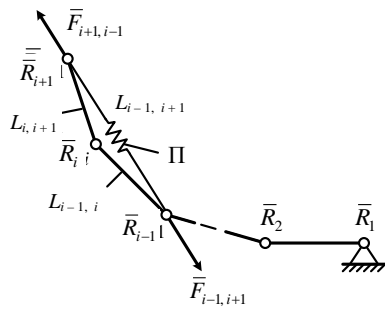


Рис. 6. Изгиб спуска

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.  $\bar{F}_{i+1,i-1}$  и  $\bar{F}_{i+1,i+3}$ , 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 отпайек), 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.

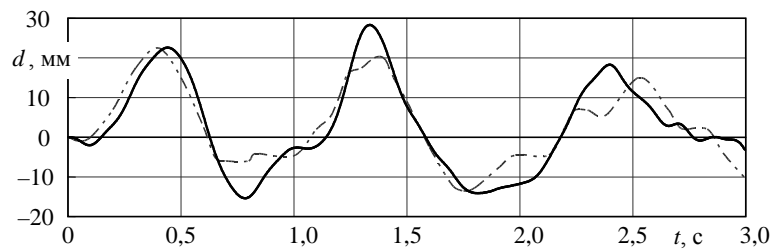


Рис. 7. Перемещение северного портала (случай 4): — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · — · · — экспериментальные данные

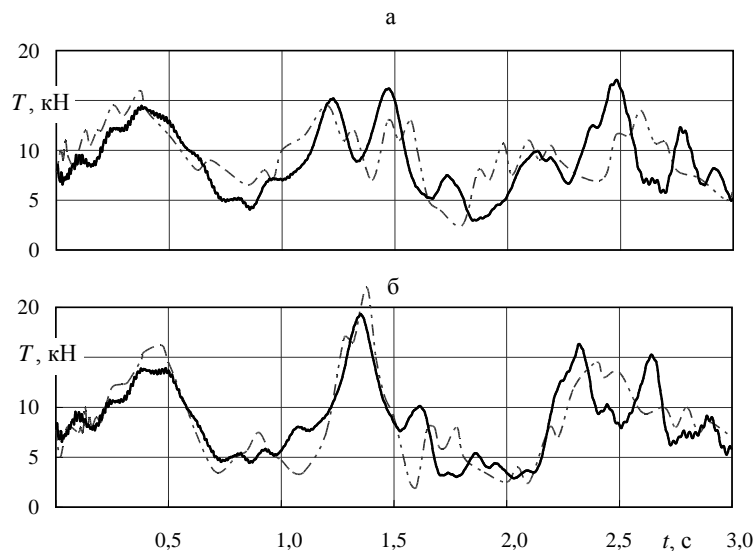




Рис. 8. Динамика тяжений в точке крепления проводов к северному порталу (случай 4): а – восточный провод; б – западный; — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · · — · · · — экспериментальные данные

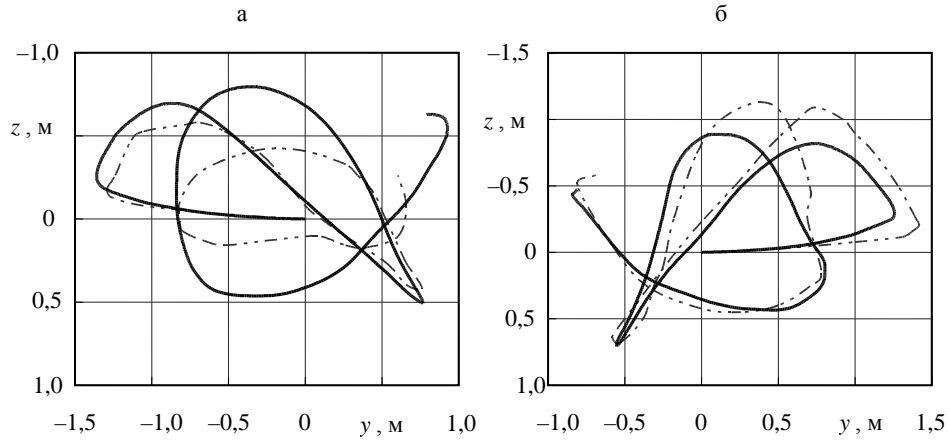


Рис. 9. Траектории движения проводов в средней точке пролета (случай 4): а – восточный провод; б – западный; — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · · — · · · — экспериментальные данные

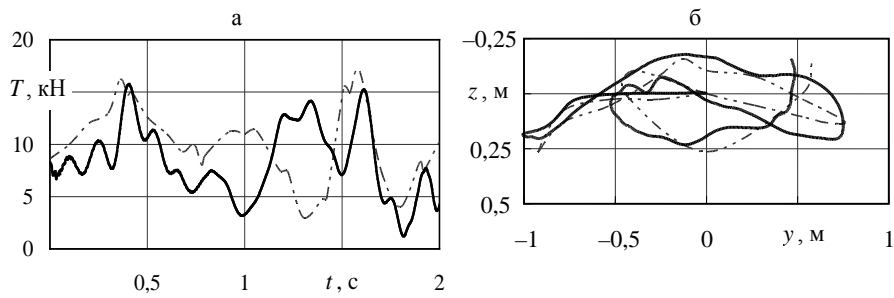


Рис. 10. а – динамика тяжения; б – траектория движения восточного провода в средней точке пролета (случай 6 – спуск в середине пролета): — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · · — · · · — экспериментальные данные

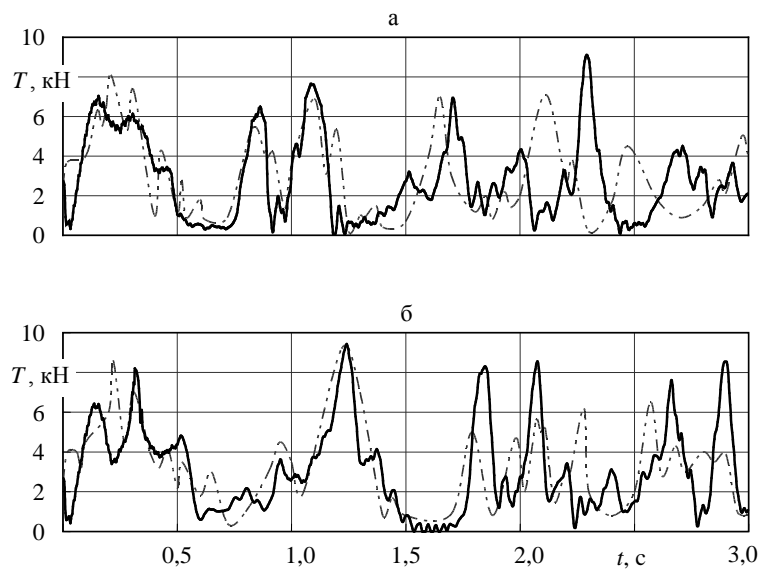


Рис. 11. Динамика тяжений в точке крепления проводов к северному порталу (случай 5): а – восточный провод; б – западный; — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · — · · — экспериментальные данные

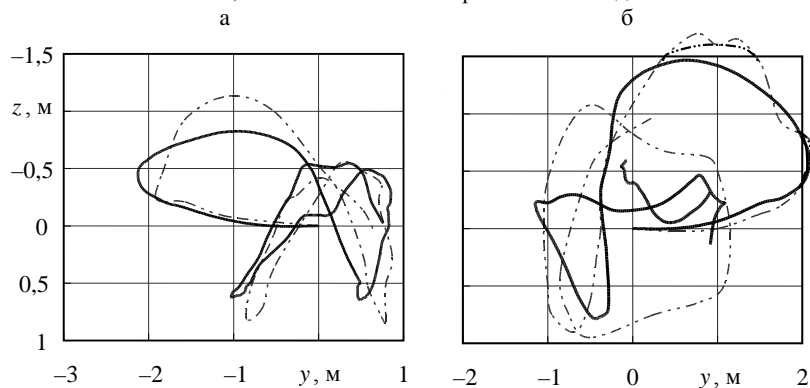


Рис. 12. Траектории движения проводов в средней точке пролета (случай 5): а – восточный провод; б – западный; — — — — — расчет по программе FLEBUS; — · · — · · — экспериментальные данные

Таблица 2

**Сопоставление опытных и расчетных критериев  
электродинамической стойкости пролета с гибкими шинами**

Параметры провода	Восточный			Западный		
	Опыт	Расчет	Расхожде- ние, %	Опыт	Расчет	Расхожде- ние, %
Случай 4						
$y_{\max}$ , м	2,05	2,11	2,9	2,00	1,82	-9,0
$T_{2\max}$ , кН	16,0	14,5	-9,4	16,0	14,0	-12,5
$T_{3\max}$ , 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
$T_{2\max}$ , кН	8,30	7,00	-15,6	8,60	8,20	-4,7
$T_{3\max}$ , кН	6,9	7,49	8,6	9,37	9,40	0,3
Случай 6						
$y_{\max}$ , м	1,68	1,74	3,6	—	—	—
$T_{2\max}$ , кН	16,2	15,7	-3,1	—	—	—
$T_{3\max}$ , 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											
$u_{\max}$ , 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											
$u_{\max}$ , 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

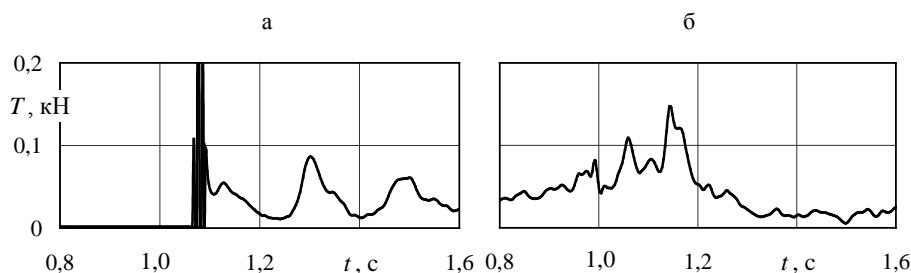


Рис. 13. Динамика тяжения в спуске восточного провода экспериментального пролета LABORELEC: а – без учета жесткости провода спуска; б – с учетом

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

ти 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