

УДК 621.315

## УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СБЛИЖЕНИЯ ПРОВОДОВ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ДВУХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И.,  
инженеры ПОНОМАРЕНКО Е. Г., САММУР ВАЙЛЬ МАХМУД

*Белорусский национальный технический университет*

Провода распределительных устройств (РУ) электростанций из-за гибкой конструкции могут принимать форму, заданную приложенными электродинамическими усилиями (ЭДУ) при коротких замыканиях (КЗ). Вследствие этого действие ЭДУ приводит к сближению и даже к схлестыванию соседних фаз. При недопустимом сближении проводов РУ более вероятное первичное КЗ на воздушных ЛЭП, устраняемое, как правило, во время бестоковой паузы автоматическим повторным включением (АПВ), сопровождается вторичным КЗ на гибких шинах РУ электростанций. Следующее за этим отключение системы шин РУ дифференциальной защитой ведет к тяжелым последствиям для энергосистемы в целом. Согласно ПУЭ [1] проверку гибких шин РУ на схлестывание необходимо выполнять при токах КЗ величиной 20 кА и более. Наибольшие уровни токов КЗ в энергосистеме Беларуси в РУ с гибкими проводами имеют место при  $U_{\text{ном}} = 110$  кВ. По данным института «БелНИПИэнергопром» и концерна «Белэнерго», они достигают 40...45 кА и ожидается их дальнейший рост в Минской зоне до 50 кА. Поэтому проблема их электродинамического действия на провода РУ становится актуальной задачей для энергосистемы Беларуси.

В 1999 г. в республике впервые введен в действие Межгосударственный стандарт 30323-95 [2], касающийся методов расчета электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода РУ. ГОСТ регламентирует использование компьютерных программ (КП) и упрощенных методов расчета сближения проводов при КЗ. На кафедре «Электрические станции» БНТУ ведутся научные исследования по указанным направлениям. Алгоритм численного расчета сближения проводов на ЭВМ базируется на расчетной модели провода в виде гибкой упругой нити, сопротивляющейся растяжению и кручению. Движение нити описывается нелинейными гиперболическими дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных, решение которых представляет сложную задачу [3].

Упрощенный метод расчета характеризуется значительно меньшим объемом вычислительных операций и доступностью его применения широким кругом специалистов. Отказ от дифференциального принципа, при котором приходится решать задачу движения проводов как упругой механической системы с бесконечно большим числом степеней свободы под воздействием распределенных ЭДУ, изменяющихся с частотой 100 Гц, и переход к интегральному и энергетическому принципам механики существенно упрощает задачу. Взаимосвязь параметров сближения проводов и характеристик КЗ вытекает из теоремы изменения главного вектора количества движения проводов [3]

$$\rho \bar{l} \bar{v}_k = \bar{S}, \quad (1)$$

где  $\bar{v}_k$  – вектор скорости движения провода в конце КЗ, м/с;  $\rho$  – приведенная масса 1 м провода с учетом конструктивных элементов (натяжных гирлянд и спусков), кг/м;  $l$  – длина пролета, м.

Вектор  $\bar{S}$  является импульсом ЭДУ и в интегральном виде учитывает основные характеристики КЗ [3]

$$\bar{S} = \int_0^{t_k} \bar{F}(t) dt, \quad (2)$$

где  $\bar{F}(t)$  – вектор суммарных ЭДУ, действующих на провод в момент времени  $t$ , Н;  $t_k$  – продолжительность КЗ, с.

ЭДУ между проводами содержат четыре составляющие, которые изменяются с частотами 50 и 100 Гц. Поэтому формулы для импульса ЭДУ в явном виде получаются сложными [3]. Если в них пренебречь знакопеременными составляющими, то при известном направлении действия ЭДУ и импульса (рис. 1) можно получить приближенную формулу расчета модуля импульса ЭДУ [3]

$$S^{(2)} = 0,2 I^2 l \frac{t_k + T_a}{a}, \quad (3)$$

где  $S^{(2)}$  – импульс ЭДУ двухфазного КЗ, Нс;  $I$  – начальный периодический ток двухфазного КЗ, кА;  $T_a$  – постоянная времени цепи КЗ, с;  $a$  – междуфазное расстояние, м.

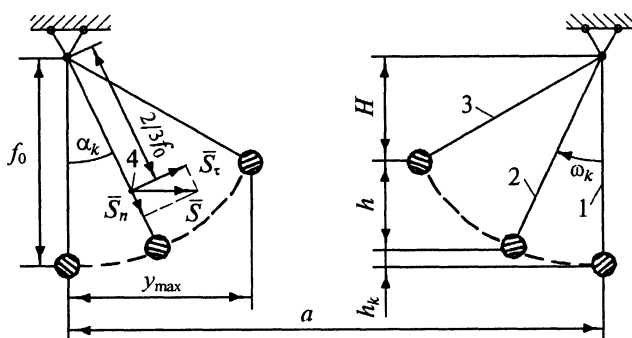


Рис. 1. Расчетная схема сближения проводов при КЗ: 1 – положение провода до КЗ; 2 – при  $t = t_k$ ; 3 – при максимальном отклонении; 4 – положение центра масс провода

На основании энергетического принципа механики запишем уравнение баланса кинетической и потенциальной энергий для провода (рис. 1), представленного физическим маятником, в режиме КЗ

$$J \frac{\omega_k^2}{2} = \frac{2}{3} \rho l h g, \quad (4)$$

где  $J = \frac{8}{15} \rho l f_0^2$  – момент инерции провода, кг · м<sup>2</sup>;  $h$  – высота подъема средней точки провода после отключения КЗ, м (рис. 1);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_k$  – угловая скорость вращения провода в момент отключения КЗ, рад/с;  $f_0$  – начальная стрела провеса, м.

Из рис. 1 следует, что

$$y_{\max} = k_{\phi} \sqrt{f_0^2 - H^2}, \quad (5)$$

где  $H = f_0 - (h + h_k)$ ;  $h_k$  – высота подъема средней точки провода в момент отключения КЗ, м;  $k_{\phi}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние изменения формы провода, деформации провода и опор при КЗ.

В соответствии с рис. 1

$$h_k = f_0 (1 - \cos \alpha_k), \quad (6)$$

где  $\alpha_k = 0,75 \frac{v_k t_k}{f_0}$  [3].

Величина  $h$  определяется из (4) после подстановки  $J$ , выражения  $\omega_k$  через  $v_k$  [3] и преобразования

$$h = 0,092 v_k^2. \quad (7)$$

В соответствии с (1)

$$v_k = \frac{S^{(2)}}{\rho l}. \quad (8)$$

Поэтому

$$h = 0,092 \left( \frac{S^{(2)}}{\rho l} \right)^2. \quad (9)$$

Приведенная масса провода  $\rho$  определяется из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной приведенной массой длине комбинированной нити с распределенными массами разной интенсивности и сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в разных местах пролета [3]:

$$\rho = \rho_0 c, \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – масса 1 м провода, кг;  $c$  – коэффициент приведения, о. е.

Вычисление коэффициента  $c$  производится по формулам [4]. Для пролета с натяжными гирляндами

$$c^2 = \frac{l_1(l+4l_r)}{l^2} + 12 \frac{Q_r l_r}{Q^2 l_1} \left( Q_1 + \frac{2}{3} Q_r \right), \quad (11)$$

где  $Q_r$  и  $l_r$  – сила тяжести и длина гирлянды;  $l_1 = l - 2l_r$ ;  $Q = \rho_0 g l$ ;  $Q_1 = \rho_0 g l_1$ .

Для пролета сборных шин со спуском

$$c^2 = \frac{l_1(l+4l_r)}{l^2} + 12 \left[ \frac{Q_r l_r}{Q^2 l_1} \left( Q_1 + \frac{2}{3} Q_r + P \right) + \left( \frac{P}{Q} \right) \frac{ab - l_r^2}{l_1} + \left( \frac{P}{Q} \right)^2 \frac{ab}{l_1} \right], \quad (12)$$

где  $a$  и  $b$  – расстояния от точки приложения веса спуска  $P$  до левой и правой опор пролета соответственно.

Величина поправочного коэффициента  $k_\phi$  определяется по выражению

$$k_\phi = \frac{y_{\max \text{ КП}}}{\sqrt{f_0^2 - H^2}}, \quad (13)$$

где  $y_{\max \text{ КП}}$  – максимальное горизонтальное отклонение провода, найденное по КП BUSEF [3].

Зависимости коэффициентов  $k_\phi$  от импульса  $S^{(2)}$  для разных относительных стрел провеса  $\frac{f_0}{l} \cdot 100\%$  представлены на рис. 2. При сравнительно небольших импульсах ЭДУ величина коэффициента  $k_\phi$  значительно меньше 1, что обусловлено погрешностью упрощенного расчета. Импульс  $S^{(2)}$  по формуле (3) вычисляется для параллельных бесконечно длинных проводов с неизменным расстоянием между ними. Это ведет к завышенным величинам ЭДУ, и величина  $k_\phi$  по (13) становится менее 1. Для устранения указанной погрешности расчета импульсы ЭДУ определялись по формуле

$$S_l^{(2)} = 0,2 \frac{l}{a_{\text{cp}}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{a_{\text{cp}}}{l} \right)^2} - \frac{a_{\text{cp}}}{l} \right] I_{n0}^2 (t_k + T_a) \cos(\alpha_k / 2), \quad (14)$$

в которой учитываются влияние ограниченной длины проводов в пролете, а также увеличение расстояния между проводами соседних фаз в процессе двухфазного КЗ

$$a_{\text{cp}} = a + y_k = a + \sqrt{(2f_0 - h_k)h_k}, \quad (15)$$

где  $y_k$  – горизонтальное отклонение провода в момент отключения КЗ.

Поскольку движение центра масс провода обусловлено в основном действием тангенциальной составляющей импульса ЭДУ  $S_t$ , в формулу (14) вводится  $\cos(\alpha_k / 2)$  (рис. 1). Нормальная составляющая импульса  $S_n$  вызывает только деформацию провода. По величине  $S_n$  можно определить максимальное тяжение в проводе при КЗ.

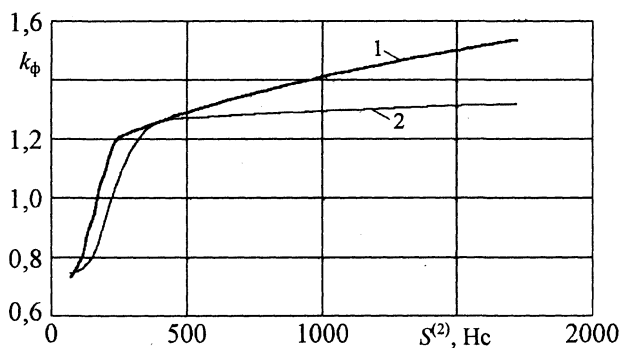


Рис. 2. 1 -  $\frac{f_0}{l} = 3...4,5 \%$ ; 2 -  $5...7 \%$

Выполненная корректировка расчета  $y_{\max}$  с помощью формулы (14) уменьшает указанные в табл. 1 погрешности в определении максимального отклонения, а погрешность упрощенного метода, обусловленная заменой распределенной массы провода сосредоточенной, частично устраняется использованием коэффициента  $k_\phi$  в формуле (5) для определения  $y_{\max}$ . Скорректированные после применения формулы (14) значения  $k_\phi = f\left(\frac{S^{(2)}}{\rho l}\right)$  для различных относительных стрел  $f_0 \%$  РУ 110 кВ приводятся на рис. 3.

Таблица 1

Погрешности расчета  $u_{\text{кп}}$  при использовании различных формул расчета ЭДУ

№	$I, \text{кА}$	10	15	20	25	30	35	40
1 <sup>1</sup>	1 <sup>3</sup>	16,3	16,6	15,1	8,3	1,1	0,92	0,87
	2 <sup>4</sup>	32,4	34,2	34,1	33,6	30,6	18,9	8,6
2 <sup>2</sup>	1 <sup>3</sup>	6,5	7,2	7,7	5,4	0,8	1,6	0,87
	2 <sup>4</sup>	9,3	10,4	11,5	13,6	14,6	11,4	6,1

Примечания: 1 -  $\Delta y \% = \frac{u_{\text{кп}} - u_{\text{кп}(\infty)}}{u_{\text{кп}}} \cdot 100\%$ ; 2 -  $\Delta y \% = \frac{u_{\text{кп}} - u_{\text{кп}(l)}}{u_{\text{кп}}} \cdot 100\%$ ; 3 -  $U_{\text{ном}} = 110 \text{кВ}$ ,

$l = 27,5 \text{ м}$ ,  $a = 2,5 \text{ м}$ ,  $\frac{a}{l} = 0,09$ ; 4 -  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$ ,  $l = 20 \text{ м}$ ,  $a = 4 \text{ м}$ ,  $\frac{a}{l} = 0,2$ ;  $u_{\text{кп}(\infty)}$  -  $u_{\text{кп}}$ , найденное по BUSEF, в которой использована приближенная формула для параллельных проводников неограниченной длины;  $u_{\text{кп}(l)}$  - то же для проводов ограниченной длины  $l$ .

В соответствии с формулами (5)...(7) для одной и той же величины скорости провода  $v_k$  практически должны быть равны и  $y_{\max}$ . Влияние  $t_k$  в формуле для  $\alpha_k$  незначительно при действии основных защит. С увеличением продолжительности КЗ влияние  $\alpha_k$  на расчет возрастает (рис. 4).

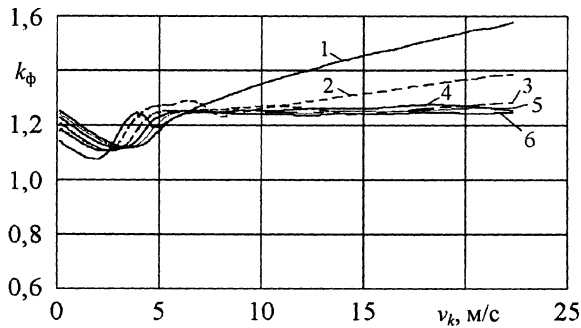


Рис. 3. 1 -  $\frac{f_0}{l} = 3\%$ ; 2 - 4; 3 - 5; 4 - 6; 5 - 7; 6 - 8%

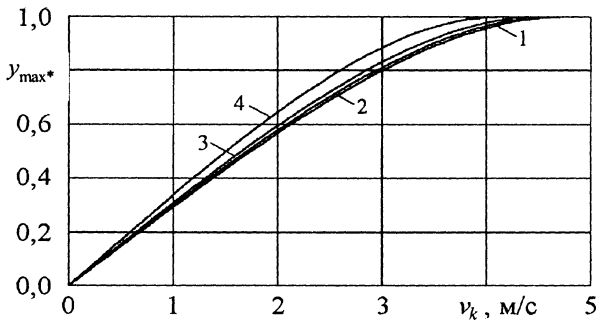


Рис. 4. Зависимость  $y_{\max}$  от  $v_k$ : 1 -  $t_k = 0,1$  с; 2 - 0,2 с; 3 - 0,3 с; 4 - 0,5 с

Кроме того, расчеты по КП BUSEF показывают, что при  $S^{(2)} = \text{const}$ , но токах КЗ разной величины и продолжительности провода двигаются по траекториям, которые несколько отличаются друг от друга. Учет указанного фактора является сложной задачей и производится приближенно с помощью поправочного коэффициента  $k_\phi$ . По величине  $y_{\max}$ , найденной по (5), выполняется проверка гибких шин на недопустимое сближение или схлестывание при двухфазном КЗ [3].

## ВЫВОД

1. Получена явная модифицированная формула для расчета максимальных горизонтальных отклонений проводов при двухфазном КЗ, учитывающая изменение формы и деформацию проводов при КЗ, а также влияние на них конструктивных элементов РУ, достоверность расчетов по которой подтверждается вычислительным экспериментом.

2. Составлены диаграммы для определения поправочного коэффициента  $k_\phi$  для РУ 110 кВ, учитывающего погрешность расчета, обусловленную заменой гибкого упругого провода с распределенной массой маятником с сосредоточенной массой при его различных физико-механических параметрах и размерах пролетов РУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. - 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 648 с.

2. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Мн.: 1999. – 57 с.

3. Сергей И. И., Стрелюк М. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: Теория и вычислительный эксперимент. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.

4. Бошнякович А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 28.01.2004

УДК 621.313.314

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ ЧЕРЕЗ СУХОЕ ИЗОЛЯЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ ПРОВОДОВ ВЛП 10 кВ ПРИ КАСАНИИ ДЕРЕВЬЕВ И ДРУГИХ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ**

Докт. техн. наук, проф. **СТЕПАНЧУК К. Ф.**,  
кандидаты техн. наук, доценты **КЛИМОВИЧ Г. С.**, **КРАСЬКО А. С.**,  
инж. **ЛАМАН М. С.**

*Белорусский национальный технический университет*

Исследования, проведенные на макете ВЛП при схлестывании проводов и попадании на них упавших деревьев, других заземленных предметов, показали, что в таком режиме ВЛП может работать длительное время [1, 2]. Однако при попадании на провода заземленных предметов за счет токов утечки через покрытие провода и заземленный предмет могут появиться высокие потенциалы на этом предмете и вокруг него, т. е. могут возникнуть напряжение прикосновения и шаговое напряжение, опасные для людей и животных. Поэтому с позиции техники безопасности очень важно оценить величины токов утечки через покрытие провода в сухом состоянии провода и под дождем. Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию этой задачи.

Расчетная схема для определения тока через полиэтиленовое покрытие при касании заземленным предметом проводов ВЛП представлена на рис. 1, где  $C_0$  – емкость между проводом и заземленным предметом;  $C_1$  и  $R_1$  – емкость и объемное сопротивление покрытия на единицу длины провода;  $C_2$  и  $R_2$  – удельная поверхностная емкость и поверхностное сопротивление покрытия. Величины токов утечки и распределение напряжения в полиэтиленовом покрытии провода ВЛП определяются значениями этих параметров. Для анализа расчетной схемы необходимо оценить эти величины.