УДК 621.315

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СБЛИЖЕНИЯ ГИБКИХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ ПО ИМПУЛЬСУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И.,
инженеры ПОНОМАРЕНКО Е. Г., САММУР ВАИЛЬ, КЛИМКОВИЧ П. И.

Белорусский национальный технический университет

Проблема электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) на гибкие провода электроустановок актуальна для многих промышленно развитых стран. В связи с этим уже более 30 лет рабочие группы сначала 23-02 и позже 23-11 комитета 23 «Подстанции» СИГРЭ осуществляют международную программу исследования всех аспектов динамики проводов при КЗ. Совместно с комитетом 73 «Токи КЗ» МЭК ими опубликован проект международного стандарта, в котором обобщены результаты проведенных исследований и даны рекомендации по использованию численных и упрощенных методов расчета [1].

Проблема динамики проводов актуальна и для энергосистемы Беларуси, в первую очередь при $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, так как токи КЗ здесь достигают 45–50 кА (по данным БелНИПИэнергопрома). В 1999 г. в Беларуси введен в действие Межгосударственный стандарт СНГ 3032–95, который также регламентирует использование компьютерных и упрощенных методов расчета динамики проводов при КЗ [2]. Упрощенные методы расчета характеризуются небольшим объемом вычислительных операций и доступностью его применения широким кругом специалистов. Поэтому они рекомендуются прежде всего для использования. В настоящее время известны два упрощенных метода расчета сближения проводов при КЗ: СИГРЭ и МЭК [1], и МЭИ (ТУ) (г. Москва) [3]. Оба метода базируются на расчетной модели провода в виде физического маятника и дифференциальном принципе решения задачи. Они требуют решения дифференциального уравнения движения маятника под действием электродинамических усилий от токов КЗ, которое является нелинейным. При этом вводятся допущения, что ограничивает область их применения на практике.

В статье излагается упрощенный метод расчета динамики проводов при КЗ, использующий интегральный и энергетический принципы механики. Отказ от дифференциального принципа уменьшает количество принимаемых допущений и делает метод более универсальным. Выполненная модификация полученных явных формул с помощью компьютерной программы (КП) BUSEF [4] уменьшает погрешности, обусловленные несовершенством расчетной модели провода в виде физического маятника. Из уравнения баланса кинетической и потенциальной энергий при КЗ для физического маятника получена формула для определения максимального горизонтального отклонения средней точки провода $y_{\max}$ под действием электродинамических усилий (ЭДУ) [5]. Указанную формулу запишем в виде

$$y_{\max} = \sqrt{(h+h_k)(2f_0 - h - h_k)}, \tag{1}$$

где f_0 – стрела провеса провода, м; h – высота подъема средней точки провода после отключения КЗ, м; h_k – то же в момент отключения КЗ, м.

При $(h+h_k) \geq f_0$ $y_{\max} = f_0$.

Высоты подъема h и h_k определяются по импульсу ЭДУ [5]:

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

$$h_k = f_0(1-\cos\alpha_k), \tag{2}$$

где $S^{(2)}$ – импульс двухфазного КЗ, Нс, определяемый по выражению

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

$\alpha_k = 0{,}75\dfrac{S^{(2)}t_k}{\rho l f_0}$ – угол отклонения провода в момент отключения КЗ; ρ – приведенная масса провода, кг/м; l – длина пролета, м; t_k – продолжительность КЗ, с; T_a – постоянная времени цепи КЗ, с; I – начальный периодический ток двухфазного КЗ, кА; a – междуфазное расстояние, м.

Приведенная масса 1 м провода определяется с учетом гирлянд изоляторов и спусков [5]. Формула (1) дает общее решение задачи определения максимальных отклонений проводов ОРУ с учетом конструктивных элементов. Представим это решение в графическом виде, удобном для использования в практике проектирования. При выборе комбинации параметров, откладываемых по оси абсцисс, учитываем, что при действии основных релейных защит присоединений ОРУ h_k, по крайней мере, на порядок меньше, чем высота h. Следовательно, в этом случае $y_{\max}$ в соответствии с (2) является функцией $v_k = \dfrac{S^{(2)}}{\rho l}$. Параметр v_k – скорость движения центра масс провода в момент отключения КЗ, определяет величину запасенной проводом кинетической энергии при КЗ.

Откладываем по оси ординат отношение $\dfrac{y_{\max}}{f_0}$ и строим зависимости $\dfrac{y_{\max}}{f_0} = f(v_k)$ для различных стрел провеса без учета влияния h_k (рис. 1).

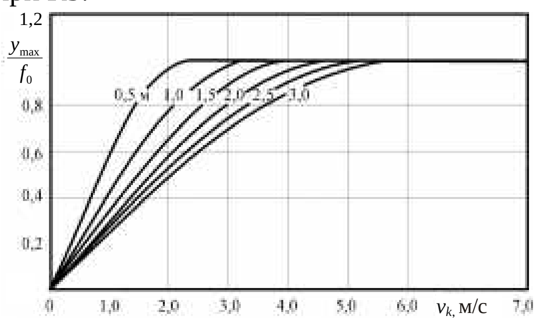

Рис. 1. Максимальные горизонтальные отклонения средней точки провода для различных стрел провеса f_0, м

В соответствии с диаграммой для двух различных режимов КЗ, у которых $S_1^{(2)} = S_2^{(2)}$, имеет место равенство $y_{\max 1} = y_{\max 2}$. Поэтому при известных параметрах одного режима КЗ I_1 и t_{k1} можно определить для другого режима КЗ с током I_2 эквивалентное по электродинамическому действию t_{k2}, при котором будут равны $y_{\max}$:

$$t_{k2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 (t_{k1} + T_a) - T_a . \tag{4}$$

Эквивалентную продолжительность КЗ t_{k2} можно определить также с использованием (1), в этом случае выражение для него получается более сложным

$$t_{k2} = \frac{1}{I_2^2}\sqrt{\left[I_1^2(t_{k1} + T_a)\right]^2 - 271{,}7\, f_0 \left(\frac{a\rho}{k_l}\right)^2 (\cos\alpha_{k1} - \cos\alpha_{k2})} . \tag{5}$$

Из-за наличия в формуле (1) h_k, пропорционального другой комбинации параметров $\frac{v_k t_k}{f_0}$, чем принятой на рис. 1, возникает погрешность между $y_{\max}$, найденным по диаграмме (рис. 1) и по формуле (1). Оценка величины указанной погрешности для различных сочетаний физико-механических параметров проводов, геометрических характеристик пролета и режима КЗ дана в табл. 1. Как видно, с увеличением t_k погрешность возрастает.

Таблица 1

Оценка погрешности определения $y_{\max}$ по диаграмме и по формуле (1) при v_k = 2 м/с

t_k, с	f_0, м	$y_{\max}$, м, по формуле	$y_{\max}$, м, по графику	$\Delta y_{\max}$, %
0,1	0,5	0,97	0,96	1,0
	1,0	0,78	0,78	0,0
	1,5	0,66	0,66	0,0
0,2	0,5	1,00	0,96	4,0
	1,0	0,81	0,78	3,7
	1,5	0,68	0,66	2,9
0,5	0,5	1,00	0,96	4,0
	1,0	0,93	0,78	16,0
	1,5	0,77	0,66	14,3

В формуле (1) не учитывается увеличение $y_{\max}$, обусловленное изменением формы кривой провисания провода с гирляндами изоляторов и его деформацией при КЗ, что вносит значительную погрешность в расчет. Для уменьшения указанной погрешности выполнена модификация упрощенной формулы (1) с помощью КП BUSEF, апробированной опытными данными [4]. Сравнение результатов компьютерного и упрощенного расчетов показало, что в зависимости от относительной стрелы провеса f_0, %, погрешности могут достигать 30 % и более. Для повышения точности упрощенного расчета в (1) вводится поправочный коэффициент $k_ф$, учитывающий изменение формы кривой провисания проводов вместе с гирляндами изоляторов при КЗ:

$$k_ф = \frac{y_{\max\,КП}}{y_{\max}} , \tag{6}$$

где $y_{\max\,КП}$ – максимальное отклонение провода, по КП.

С помощью вычислительного эксперимента по КП BUSEF и расчетов по формуле (1) построены зависимости $k_ф = f\left(\frac{S^{(2)}}{\rho l}\right)$ при разных стрелах провеса. В качестве примера на рис. 2 и 3 показаны зависимости $k_ф = f(v_k)$ для типовых пролетов ОРУ 110 и 220 кВ. На рис. 4 приводятся зависимости $k_ф = f(v_k)$ для различных длин пролетов. При использовании $k_ф$, найденных по кривым, $k_ф y_{max} \neq$ $\neq y_{max\,КП}$. Однако наибольшее расхождение между ними достигает всего 3,1 % (табл. 2). Таким образом, указанная модификация явной формулы повышает точность и придает универсальность упрощенному методу расчета гибких шин РУ электростанций.

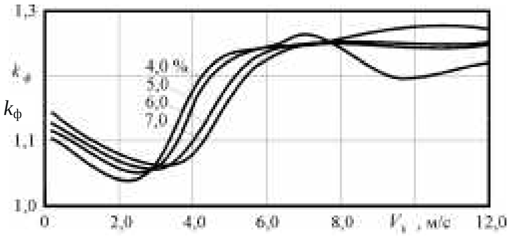

Рис. 2. Зависимость $k_ф$ от v_k при разных стрелах провеса f_0, % ($U_н$ = 110 кВ; l = 27,5 м)

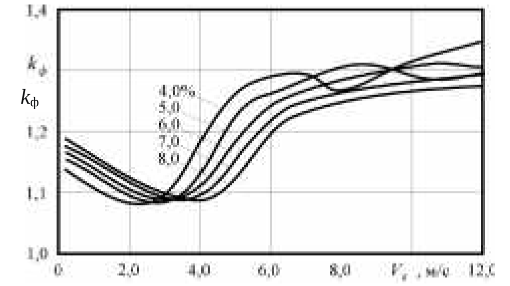

Рис. 3. Зависимость $k_ф$ от v_k при разных стрелах провеса f_0, % ($U_н$ = 220 кВ; l = 30,8 м)

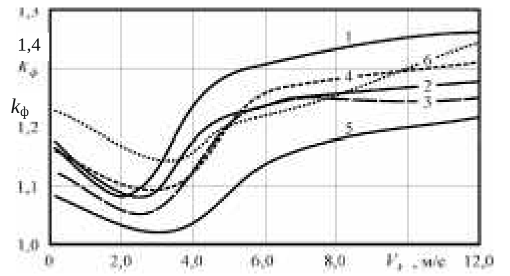

Рис. 4. Зависимость $k_ф$ от v_k для различных длин пролетов: 1 – $U_н$ = 110 кВ, l = 14,5 м; 2 – 110 кВ, 20 м; 3 – 110 кВ, 27,5 м; 4 – 220 кВ, 30,8 м; 5 – 220 кВ, 40,5 м; 6 – 330 кВ, 48 м

Таблица 2

Оценка влияния $k_ф$ на точность расчета y_{max} по формуле (1)

f_0, %	$I_к^{(2)}$, кА	y_{max}, м	$k_ф$	$y_{max} k_ф$	$y_{max\,КП}$, м	Δy_{max}, %
$U_н$ = 110 кВ, пролет 27,5 м, провод АС-500/27						
5	10	0,52	1,09	0,57	0,57	<1
	20	1,35	1,18	1,59	1,60	<1
	30	1,38	1,28	1,77	1,76	<1
$U_н$ = 220 кВ, пролет 30,8 м, провод АС-500/27						
6	10	0,28	1,16	0,32	0,33	3,1
	20	1,08	1,11	1,20	1,20	<1
	30	1,85	1,14	2,11	2,10	<1

Дальнейшая модификация упрощенного метода расчета заключается в корректировке условия проверки гибких шин РУ на схлестывание. В этом условии вместо y_{max} должно быть $y_{2\,max}$ – максимальное горизонтальное отклонение фаз при их сближении (ранее приближенно принималось, что $y_{2\,max} \approx y_{max}$):

$$A_{ф-ф} - 2(y_{2\,max} + r_р) \geq A_{ф-ф\,min\,доп}, \tag{7}$$

где $A_{ф-ф}$, $A_{ф-ф\,min\,доп}$ – соответственно установленные ПУЭ и проектными материалами расстояния между фазами и их минимальные допустимые значения при сближении проводов по рабочему напряжению; $r_р$ – радиус провода или расщепленной фазы.

С использованием КП BUSEF построены зависимости коэффициента уменьшения максимальных отклонений при сближении проводов $k_y = \dfrac{y_{2\,\max}}{y_{1\,\max}} = f\left(\dfrac{S^{(2)}}{\rho l}\right)$ для разных стрел провеса и длин пролетов гибких шин ОРУ 110 и 220 кВ (рис. 5…7). С учетом того, что $y_{2\,\max} = k_ф k_y y_{\max}$, условие (6) сводится к виду

$$A_{ф-ф} - 2\left(k_ф k_y y_{\max} + r_р\right) \ge A_{ф-ф\,\min\,доп}\,. \qquad (8)$$

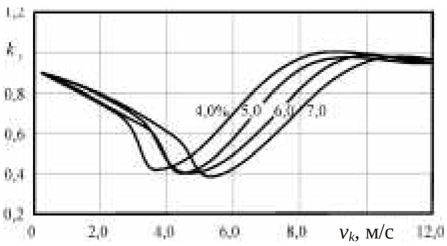

Рис. 5. Зависимость k_y от v_k при разных стрелах провеса f_0, % ($U_н$ = 110 кВ; l = 27,5 м)

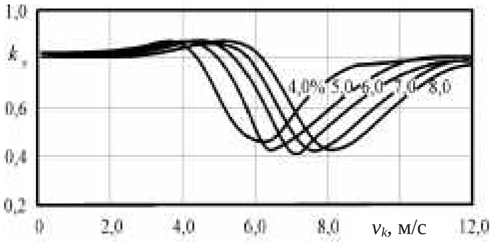

Рис. 6. Зависимость k_y от v_k при разных стрелах провеса f_0, % ($U_н$ = 220 кВ; l = 30,8 м)

По заданным $A_{ф-ф}$, $A_{ф-ф\,\min\,доп}$ можно определить максимально допустимое горизонтальное отклонение провода $y_{доп} = k_ф k_y y_{\max}$, при котором:

$$A_{ф-ф\,\min} = A_{ф-ф\,\min\,доп}\,;$$

$$y_{доп} = \left[0{,}5\left(A_{ф-ф} - A_{ф-ф\,\min\,доп}\right) - r_p\right]. \qquad (9)$$

По величине $y_{доп}$ можно определить значение $S_{доп}$, при котором $y_{\max} = y_{доп}$ [6]. По сравнению с [6] в формуле для определения $S_{доп}$ учитывается влияние угла отклонения α_k провода в момент отключения КЗ

$$S_{доп} = 3{,}3\rho l\sqrt{f_0\cos\alpha_k - \sqrt{f_0^2 - \left(\dfrac{y_{доп}}{k_ф k_y}\right)^2}}\,. \qquad (10)$$

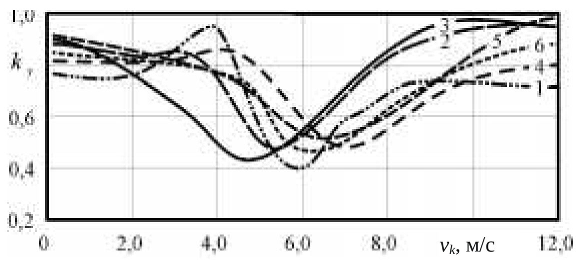

Рис. 7. Зависимость k_y от v_k для различных длин пролетов: 1 – $U_н$ = = 110 кВ, l = 14,5 м; 2 – 110 кВ, 20 м; 3 –110 кВ, 27,5 м; 4 –220 кВ, 30,8 м; 5 – 220 кВ, 40,5 м; 6 – 330 кВ, 48 м

Принимая в формуле (3) $S^{(2)} = S_{доп}$, можно определить ток электродинамической стойкости гибких шин $I_{дин}$.

Для апробации и оценки достоверности упрощенного метода расчета выполнены расчеты $y_{доп}$, $S_{доп}$ и $I_{дин}$ для типовых пролетов гибких шин ОРУ 110–330 кВ (табл. 3). В таблице сравниваются расчетные токи электродинамической стойкости гибких шин $I_{дин}$ с токами КЗ, при которых величина $y_{2\max}$, найденная по КП BUSEF, будет равна $y_{доп}$.

Таблица 3

Определение $y_{доп}$, $S_{доп}$ и $I_{дин}$ для типовых пролетов ОРУ

l, м	a, м	f_0, м	$y_{доп}$, м	$S_{доп}$, Н·с	$I_{дин}$, кА	$I_{КП}$, кА
$U_н$ = 110 кВ, провод АС-500/27						
20	2,5	1	1,01	181	19,5	25,3
27,5	2,5	1,38	1,01	232	18,8	22,0
$U_н$ = 220 кВ, провод АС-500/27						
30,8	4	1,85	1,51	328	26,6	25,3
40,5	4	2,43	1,51	278	21,4	22,1
$U_н$ = 330 кВ, провод 2хАС-500/27						
48	4,5	2	1,29	640	31,6	37,0

ВЫВОДЫ

1. Построены диаграммы для определения максимальных горизонтальных отклонений проводов при КЗ, учитывающие основные физико-механические параметры проводов, геометрические размеры пролетов и основные характеристики режима КЗ.

2. Определены поправочные коэффициенты $k_ф$ и k_y, с помощью которых повышается точность проверки гибких шин ОРУ на схлестывание.

ЛИТЕРАТУРА

1. The mechanical effects of short-circuit currents open-air substations (rigid or flexible bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.

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. Кудрявцев Е. П., Неклепаев Б. Н. Расчет смещений гибких проводников при коротких замыканиях // Электричество. – 1993. – № 5. – С. 17–25.

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

5. Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Саммур Ваиль Махмуд. Упрощенный метод расчета сближения проводов с учетом конструктивных элементов распределительных устройств при двухфазном коротком замыкании // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 2. – С. 5 – 11.

6. Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Саммур Ваиль Махмуд. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 11.12.2004