

УДК 621.315

## ОЦЕНКА СБЛИЖЕНИЯ ПРОВОДОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО ДОПУСТИМОМУ ИМПУЛЬСУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

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

*Белорусский национальный технический университет*

Согласно ПУЭ проверку недопустимого сближения и схлестывания гибких шин распределительных устройств (РУ) нужно проводить при токах короткого замыкания (КЗ) 20 кА и более [1]. Однако величина тока КЗ не может являться комплексным критерием, по которому определяется необходимость расчета гибких шин РУ на электродинамическую стойкость [2]. Указанный критерий должен быть комбинацией параметров проводов, геометрических размеров гибкой ошиновки РУ и характеристик КЗ, при которых может произойти недопустимое сближение фаз.

В статье предлагается простой и физически наглядный критерий недопустимых отклонений и сближений фаз в виде импульса ЭДУ. В основу указанного метода положены формулы для расчета импульсов электродинамических усилий при различных видах КЗ. Впервые полученные в [3], они были использованы в [4, 5] при разработке упрощенного метода расчета сближения проводов фаз гибкой ошиновки РУ, достоверность результатов которых подтверждена опытом и расчетом. При решении поставленной задачи определения допустимого в отношении сближения фаз импульса ЭДУ громоздкие формулы для их вычисления упрощаются. Устранение погрешностей расчета импульсов ЭДУ, обусловленных использованием формулы вычисления ЭДУ для бесконечно длинных проводов с неизменным расстоянием между ними, производится с помощью поправочных коэффициентов, необходимость которых обоснована в [5]:

$$S^{(2)} = 0,2 \frac{l}{a} k_l [I_{n0}^{(2)}]^2 (t_k + T_a k_a);$$

$$S_{A,C}^{(3)} = 0,5 \frac{l}{a} k_l [I_{n0}^{(3)}]^2 (3t_k + 3,232 T_a k_a); \quad (1)$$

$$S_B^{(3)} = 0,173 \frac{l}{a} k_l [I_{n0}^{(3)}]^2 T_a k_a,$$

где

$$k_l = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l};$$

$$k_a = 1 - e^{-\frac{2t_k}{T_a}};$$

$t_k$  – продолжительность КЗ, с;  $T_a$  – постоянная времени цепи КЗ, с;  $l$  – длина пролета, м;  $a$  – расстояние между проводами соседних фаз, м;  $I_{n0}$  – начальный периодический ток КЗ, кА;  $S^{(2)}$ ,  $S_{A,C}^{(3)}$ ,  $S_B^{(3)}$  – соответственно импульсы ЭДУ двух- и трехфазного КЗ для крайних и средней фаз, Н · с.

Более точный расчет импульсов ЭДУ можно выполнить с помощью диаграмм, полученных в [3] (рис. 1). Величины импульсов ЭДУ при заданных токе и длине пролета вычисляются следующим образом:

$$S = 2 \frac{l}{a} S_{\text{ед}} k_l I^2, \quad (2)$$

где  $S_{\text{ед}}$  – найденный по диаграмме рис. 1 импульс ЭДУ при  $I = 1$  А;  $l = 1$  м и  $a = 1$  м.

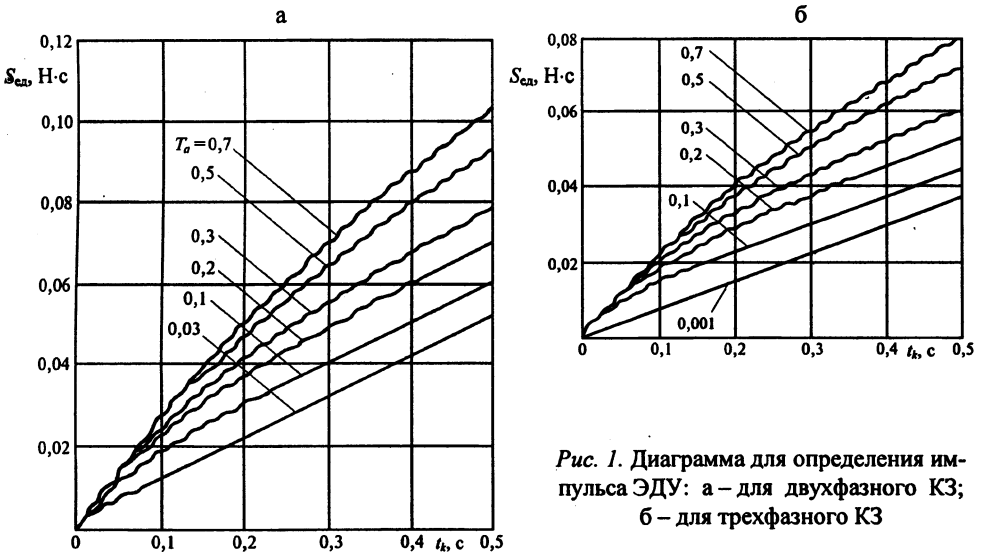


Рис. 1. Диаграмма для определения импульса ЭДУ: а – для двухфазного КЗ; б – для трехфазного КЗ

Согласно ГОСТ [6] проверка отклонений и сближений гибких проводов РУ производится по условию

$$R_{\text{max}} \leq R_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{max}}$ ,  $R_{\text{доп}}$  – соответственно максимальное и допустимое отклонения проводов при КЗ.

Для фаз гибкой ошиновки РУ, расположенных практически в горизонтальной плоскости, условие (3) записывается в виде:

$$A_{\phi-3} - y_{A \max} \geq A_{\phi-3 \min \text{ доп}}; \quad (4)$$

$$A_{\phi-\phi} - (y_{A \max} + y_{B \max} + 2r_p) \geq A_{\phi-\phi \min \text{ доп}},$$

где  $A_{\phi-\phi}$ ,  $A_{\phi-3}$ ,  $A_{\phi-3 \min \text{ доп}}$ ,  $A_{\phi-\phi \min \text{ доп}}$  — соответственно установленные ПУЭ и проектными материалами расстояния между фазами, между фазами и заземленными частями, а также их минимальные допустимые значения при сближении;  $y_{A \max}$ ,  $y_{B \max}$  — максимальные горизонтальные отклонения фаз при КЗ;  $r_p$  — радиус провода или радиус расщепленной фазы.

Наибольшее приближение крайней фазы к заземленным конструкциям имеет место при трехфазном КЗ, так как  $S_{A,C}^{(3)} > S^{(2)}$  [3]. Максимальное сближение соседних фаз гибких шин наблюдается при двухфазном КЗ, когда они сближаются после отключения КЗ в результате колебаний проводов. Общепринято, что максимальные отклонения фаз при сближении равны их максимальным отклонениям при отталкивании ЭДУ.

С учетом сказанного из (4) получим выражение для допустимых горизонтальных отклонений проводов:

$$y_{\text{доп}}^{(3)} = A_{\phi-3} - A_{\phi-3 \min \text{ доп}}; \quad (5)$$

$$y_{\text{доп}}^{(2)} = 0,5(A_{\phi-\phi} - A_{\phi-\phi \min \text{ доп}}) - r_p.$$

Например, для проводов ячейки ОРУ 110 кВ при  $a = 2,5$  м  $y_{\text{доп}} = 0,975$  м, а для проводов сборных шин —  $y_{\text{доп}} = 1,125$  м. Используя явную формулу для  $y_{\max}$ , полученную в [5], принимаем  $y_{\max} = y_{\text{доп}}$  и устанавливаем взаимосвязь между  $y_{\text{доп}}$  и  $S_{\text{доп}}$ , при которой максимальные отклонения становятся равными допустимым значениям. При выводе формул расчета  $S_{\text{доп}}$  уравнение энергетического баланса провода при КЗ запишем в следующем виде:

$$0,75J \left( \frac{S_{\text{доп}}}{\rho l f_0} \right)^2 = \frac{2}{3} \rho l f_0 g (\cos \alpha_k - \cos \alpha_{\text{доп}}), \quad (6)$$

где  $\alpha_k$  — угол отклонения провода в момент отключения КЗ, рад;  $\alpha_{\text{доп}}$  — то же при максимальном горизонтальном отклонении.

Для тяжелых проводов больших сечений сборных шин в пролетах ОРУ, составляющих несколько десятков метров, при продолжительности КЗ в диапазоне 0,1...0,2 с (исходя из времени действия основных защит) величиной  $\alpha_k$  пренебрегаем. Тогда  $\cos \alpha_k \approx 1$  и

$$\cos \alpha_{\text{доп}} = \frac{\sqrt{f_0^2 - \left( \frac{y_{\text{доп}}}{k_s} \right)^2}}{f_0}, \quad (7)$$

где  $k_s$  — поправочный коэффициент, учитывающий изменение формы провода при КЗ [5].

После подстановки (7) в (6) и преобразований получим приближенную формулу для расчета допустимого импульса ЭДУ

$$S_{\text{доп}} = 3,3\rho l \sqrt{f_0 - \sqrt{f_0^2 - \left(\frac{y_{\text{доп}}}{k_s}\right)^2}} \quad (8)$$

Зная допустимый импульс ЭДУ, можно записать дополнительное условие проверки недопустимых сближений проводов при КЗ в виде

$$S \leq S_{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $S$  – расчетный импульс ЭДУ, определяемый в зависимости от вида и величины тока КЗ по (1).

Простая структура формулы (8) позволяет выполнить расчеты  $S_{\text{доп}}$  для наиболее часто используемых типовых проектов ЗРУ 110, 220 и 330 кВ. Наличие в ней коэффициента  $k_s$ , являющегося функцией импульса ЭДУ, требует построения итерационного процесса:

- 1)  $k_s$  принимается равным единице;
- 2) определяется при заданных параметрах и размерах гибких шин  $S_{\text{доп}}$ ;
- 3) по кривым  $k_s = f\left(\frac{S}{\rho l}\right)$  [5] находится величина  $k'_s$  и повторяется рас-

чет  $S_{\text{доп}}$ .

Для получения удовлетворительного результата достаточно выполнить две-три итерации по  $k_s$ . Полученные таким образом  $S_{\text{доп}}$  приводятся в табл. 1. Подставим в формулу (1) вместо импульса ЭДУ  $S_{\text{доп}}$  и определим допустимые токи (токи электродинамической стойкости) по условию сближения фаз при двухфазном КЗ (табл. 1). Определим при указанных токах по КП BUSEF  $y_{\text{max КП}}$  и сравним с  $y_{\text{доп}}$ . Как видно из таблицы, погрешность  $\Delta y$  не превышает 10 %. Аналогично можно найти  $S_{\text{доп}}$  по условию допустимого приближения фаз гибкой ошиновки к заземленным конструкциям РУ. Поскольку импульс ЭДУ трехфазного КЗ для крайних фаз несколько больше, чем при двухфазном КЗ [3], в этом случае расчетный импульс ЭДУ определяется при трехфазном КЗ.

Таблица 1

Определение  $S_{\text{доп}}$  и  $I_{\text{доп}}$  для типовых пролетов ячейки ОРУ

$a$ , м	$l$ , м	$f_0$ , М	$y_{\text{доп}}$ , М	$S_{\text{доп}}$ , Н·с	$I_{\text{доп}}$ , кА	$y_{\text{КП}}$ , М	$\Delta y$ , %
$U_{\text{ном}} = 110$ кВ, провод АС-500/27, $a_{\text{мин доп}} = 0,45$ м							
2,5	27,5	1,57	1,012	116,7	17,05	1,05	3,8
3,0	27,0	1,50	1,26	156,9	22,06	1,33	5,6
3,0	18,0	1,20	1,26	172,1	29,1	1,367	8,5
$U_{\text{ном}} = 220$ кВ, провод АС-500/27, $a_{\text{мин доп}} = 0,95$ м							
4,0	30,8	2,15	1,512	203,5	27,42	1,564	3,4
4,0	40,5	2,43	1,512	198	23,23	1,43	5,4
4,0	22,0	1,14	1,512	247,6	36,72	1,42	6,1
$U_{\text{ном}} = 330$ кВ, провод 2×АС-500/27, $a_{\text{мин доп}} = 1,4$ м							
6,0	76,0	2,8	2,05	925,8	44,5	2,052	0,1
6,0	63,3	2,9	2,05	818,5	43,2	2,174	6,0
6,0	54,1	2,1	2,05	1080	57,8	2,24	9,3

## ВЫВОДЫ

1. Получена приближенная явная формула для определения критерия электродинамического действия токов КЗ – допустимого импульса ЭДУ, который является комбинацией параметров и геометрических размеров проводов и минимального допустимого расстояния между фазами. Установлены величины  $S_{\text{доп}}$  для наиболее часто применяемых типовых пролетов и проводов ОРУ 110, 220 и 330 кВ.

2. Получено дополнительное условие проверки недопустимых отклонений и сближений проводов гибкой ошиновки РУ по величинам расчетного и допустимого импульсов ЭДУ, достоверность которого подтверждается расчетами по КП BUSEF.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Кудрявцев Е. П., Неклепаев Б. Н. Расчет смещений гибких проводников при коротких замыканиях // Электричество. – 1993. – № 5. – С. 17–25.
3. Выбор расчетных условий при проверке гибкой ошиновки РУ на электродинамическую стойкость при КЗ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей: Ред. журнала «Изв. вузов СССР – Энергетика». – Минск, 1981. – 18 с. – Деп. в Информэнерго 01.01.1981. – № 2451. – ЭН // РЖ: 22 энергетика. – 1981. – № 8. – 7Е58 ДЕП. – С. 8.
4. Стрелюк М. И., Сергей И. И., Бладыко Ю. В. Приближенная проверка гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий при коротком замыкании // Энергетика и транспорт. Изв. АН СССР. – 1989. – № 4. – С. 83–89.
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. ГОСТ 30323–95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Мн., 1999. – 57 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 3.03.2004

УДК 621.315

## О ПАРАМЕТРАХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Засл. деят. науки и техники Республики Беларусь,  
докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

*Белорусский национальный технический университет*

Электропередачи должны передавать, прежде всего, активную мощность в соответствии с графиком нагрузки. Имея в виду это обстоятельство, проблему снабжения потребителей реактивной мощностью следует ре-