

## УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЯЖЕНИЙ ПРОВОДОВ НА ДВУХ СТАДИЯХ ИХ ДВИЖЕНИЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И.,  
инженеры АНДРУКЕВИЧ А. П., ПОНОМАРЕНКО Е. Г.

*Белорусский национальный технический университет*

Гибкие шины распределительных устройств (РУ) обладают существенной гибкостью и могут принимать форму, обусловленную действием распределенных электродинамических усилий (ЭДУ), возникающих при коротком замыкании. Поэтому динамика гибких шин в общем случае описывается с использованием расчетной модели гибкой нити с распределенной по длине массой. Движение гибкой нити под воздействием распределенных нагрузок описывается дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных. Получить решение таких уравнений можно лишь численными методами. Алгоритмы решения таких уравнений реализованы в ряде коммерческих программ.

При компьютерных расчетах большое количество времени тратится на сбор массива исходных данных, а также на анализ результатов расчета. А в результате получается только одно частное решение уравнений. В проектной практике целесообразно применение упрощенных методов расчета параметров электродинамической стойкости гибких шин, реализованных в виде простых формул и таблиц. Практика применения упрощенных методов одобрена в международном и межгосударственном стандартах [1, 2].

К параметрам электродинамической стойкости относятся максимальные отклонения и тяжения проводов. Методика для определения этих параметров была предложена российскими учеными Б. Н. Неклепаевым, В. П. Кудрявцевым и А. П. Долиным. Их методика была использована при разработке нового российского ГОСТа. Но формула для расчета максимальных тяжений, предложенная ими, пригодна лишь для ориентировочных расчетов, так как дает значительное расхождение при сравнении с опытными данными.

В статье излагается упрощенный метод расчета максимальных тяжений в гибких шинах РУ, основанный на представлении провода физическим маятником и составленных для него формулах энергетического баланса во время и после КЗ. В осциллограмме тяжения провода при и после КЗ выделяются два характерных максимума. Один из них наступает в момент времени, когда провода при их отталкивании подвергаются максимальному растяжению под действием ЭДУ  $T_{2\max}$ . После отключения КЗ в момент сближения проводов появляется еще один максимум тяжения, так называемый третий максимум  $T_{3\max}$ , который имеет большую величину. В зарубежной практике он называется максимальным тяжением при падении проводов и имеет наибольшее значение  $T_{3\max\text{НБ}}$ , когда вся накопленная токоведущими конструкциями потенциальная энергия при и после КЗ  $E_{\text{п}\max}$

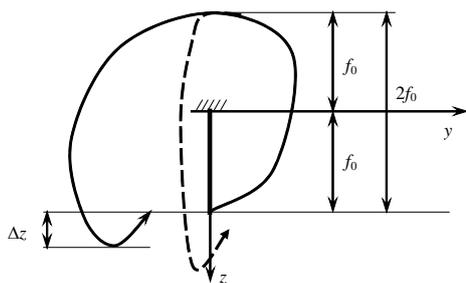


Рис. 1. К определению  $T_{3\max\text{НБ}}$

преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор  $E_y$  (рис. 1). Существует еще один максимум тяжения  $T_{1\max}$ , когда под действием внутрифазных усилий происходит максимальное удлинение составляющих проводов расщепленной фазы. В данной статье динамика тяжений в расщепленной фазе не рассматривается.

При движении провода часть кинетической энергии  $E_k$  провода преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор  $E_y$ . Величина кинетической энергии провода определяется через момент инерции  $J$  и угловую скорость  $\omega_k$  провода

$$E_k = J \frac{\omega_k^2}{2}. \quad (1)$$

Момент инерции зависит от характеристик провода и геометрических параметров пролета

$$J = \frac{8}{15} \rho l f_0^2, \quad (2)$$

где  $\rho$  – приведенная масса единицы провода, кг [3];  $l$  и  $f_0$  – соответственно длина пролета и стрела провеса провода, м.

Угловая скорость выражается через скорость поступательного движения провода в конце КЗ  $v_k$

$$\omega_k = 0,75 \frac{v_k}{f_0}. \quad (3)$$

В свою очередь скорость  $v_k$  выражается через импульс ЭДУ двухфазного короткого замыкания  $S^{(2)}$

$$v_k = \frac{S^{(2)}}{\rho l}. \quad (4)$$

Выражение для упругой деформации провода запишем в следующем виде [1]

$$E_y = \frac{1}{2} Nl (T_{2\max}^2 - T_0^2), \quad (5)$$

где  $Nl = \frac{l}{EA} + \frac{1}{K_{\text{оп}}}$  – результирующий коэффициент упругой деформации системы «провод – опора»;  $E$  – модуль упругости материала провода, Н/м<sup>2</sup>;  $A$  – поперечное сечение провода, мм<sup>2</sup>;  $K_{\text{оп}}$  – коэффициент жесткости опоры, Н/м;  $T_0$  – начальное тяжение провода, Н.

Для учета той части кинетической энергии провода, которая расходуется на его упругие деформации, вводится поправочный коэффициент  $k_n$ ,

который определяется с помощью вычислительного эксперимента и опытных данных. В первом приближении  $k_{\text{н}} = 2/3$ . Приравняем (1) и (5) и преобразуем полученное выражение путем подстановки (2)–(4). После этого получаем выражение для расчета максимального тяжения на стадии отгалкивания проводов при КЗ

$$T_{2\text{max}} = \sqrt{T_0^2 + 0,3K_{\text{оп}} \frac{EA}{IK_{\text{оп}} + EA} \left( \frac{k_{\text{н}} S^{(2)}}{\rho I} \right)^2}. \quad (6)$$

При рассмотрении упрощенной модели пролета с абсолютно жесткими опорами ( $K_{\text{оп}} \rightarrow \infty$ ) получаем формулу

$$T_{2\text{max}} = \sqrt{T_0^2 + 0,3 \frac{EA}{\rho} \left( \frac{k_{\text{н}} S^{(2)}}{I} \right)^2}. \quad (7)$$

При определении  $T_{3\text{max}}$  принимаем

$$E_{\text{пmax}} = E_y. \quad (8)$$

Величина наибольшей потенциальной энергии провода имеет место при максимальном угле отклонения его плоскости, равном  $180^\circ$ , когда  $h + h_k = 2f_0$  [4], где  $h$  и  $h_k$  – соответственно высоты подъема средней точки провода после отключения и в момент отключения КЗ, м. Тогда

$$E_{\text{пmax}} = \frac{2}{3} \rho g l^2 f_0. \quad (9)$$

После подстановки (9) и (5) в (8) получим

$$T_{3\text{max НБ}} = \sqrt{T_0^2 + \frac{8}{3} EA \rho g f_0} \cong \sqrt{T_0^2 + 26,2 EA \rho f_0}. \quad (10)$$

При меньших токах КЗ величина суммарной высоты подскока провода после КЗ будет меньше  $2f_0$ , соответственно меньшим будет и  $T_{3\text{max}}$ . Для этого случая

$$T_{3\text{max}} = \sqrt{T_0^2 + \frac{4}{3} EA \rho g (h + h_k)} \cong \sqrt{T_0^2 + 13,1 EA \rho (h + h_k)}. \quad (11)$$

С учетом гибкости порталов (11) примет вид

$$T_{3\text{max}} = \sqrt{T_0^2 + 13,1 \rho K_{\text{оп}} \frac{EA}{IK_{\text{оп}} + EA} (h + h_k)}. \quad (12)$$

Важным параметром при определении максимальных тяжений является модуль упругости провода. Модуль упругости витого провода следует принимать меньшим модуля упругости материала проводника, так как он состоит из отдельных волокон материала и обладает повышенной растяжимостью при воздействии нагрузки. Комитетом СИГРЭ были проведены

опытные исследования проводов марки ACSR различных сечений с целью определения реальных значений модуля упругости [1]. Анализируя графики СИГРЭ, можно принять

$$\frac{E_s}{E} = 0,6, \quad (13)$$

где  $E$  – модуль упругости материала провода;  $E_s$  – то же витых гибких проводов ОРУ.

Поэтому в расчетах для получения более точных результатов следует принимать значения модуля  $E_s$ .

Для подтверждения справедливости выражений (6), (7) и (11) производятся расчеты характерных максимумов тяжений для опытного пролета длиной 36 м [5]. Результаты расчетов сравниваются с опытными данными (табл. 1). Также приводятся результаты расчетов с теми же исходными данными по методике СИГРЭ и по компьютерной программе BusEF, разработанной на кафедре «Электрические станции», которая позволяет получить точные численные решения уравнений динамики проводов при КЗ (табл. 1, 2).

Таблица 1

Результаты расчета  $T_{2\max}$  при  $K_{\text{оп}} = 715 \text{ Н/мм}$  и  $E = 30000 \text{ Н/мм}^2$

Ток КЗ, кА	БНТУ	СИГРЭ	BusEF	Опыт	Погрешность $\Delta_{\text{БНТУ}} / \Delta_{\text{СИГРЭ}} / \Delta_{\text{BusEF}}, \%$
	$T_{2\max}, \text{ Н}$	$T_{2\max}, \text{ Н}$	$T_{2\max}, \text{ Н}$	$T_{2\max}, \text{ Н}$	
20	6741	5624	4890	6300	7,00 / -10,7 / -22,4
25	9351	8185	6250	8000	16,8 / 2,3 / -21,9
30	12470	11680	8710	10000	24,7 / 16,8 / -12,9
35	16380	15900	11310	13000	26,0 / 22,3 / -13,0

Таблица 2

Результаты расчета  $T_{3\max}$  при  $K_{\text{оп}} \rightarrow \infty$  и  $E = 30000 \text{ Н/мм}^2$

Ток КЗ, кА	БНТУ	СИГРЭ	BusEF	Опыт	Погрешность $\Delta_{\text{БНТУ}} / \Delta_{\text{СИГРЭ}}, \%$
	$T_{3\max}, \text{ Н}$	$T_{3\max}, \text{ Н}$	$T_{3\max}, \text{ Н}$	$T_{3\max}, \text{ Н}$	
25	34590	41650	22810	–	51,6 / 82,6
30	46580	49550	34190	–	36,2 / 44,9
35	54450	55780	38640	–	40,9 / 44,4

Как видно из табл. 1, погрешность при расчетах второго максимума тяжений  $T_{2\max}$  не превышает 30 %, что является допустимой погрешностью для упрощенных методов расчета динамики проводов при КЗ. Результаты расчета  $T_{3\max}$  (табл. 2) как по методике БНТУ, так и по методике СИГРЭ значительно отличаются от результатов точных численных решений. Чтобы повысить точность расчетов на данном этапе, вводится поправочный коэффициент

$$k_T = \frac{T_{3\max(\text{КП})^*}}{T_{3\max}^*}, \quad (14)$$

где  $T_{3\max(\text{КП})^*}$  и  $T_{3\max}^*$  – соответственно третий относительный максимум тяжения, определяемый по компьютерной программе BusEF и по приближенному методу БНТУ.

Проведенные упрощенные расчеты максимальных тяжений с учетом поправочных коэффициентов показали, что точность их оценки

значительно увеличилась. На рис. 1 в качестве примера приведены графические зависимости  $k_{T3}$  от интегрального параметра  $\left(\frac{S}{\rho l}\right)^2 = v_k^2$ .

В табл. 3 приведен сравнительный анализ результатов расчета по методикам БНТУ, СИГРЭ и по компьютерной программе BusEF.

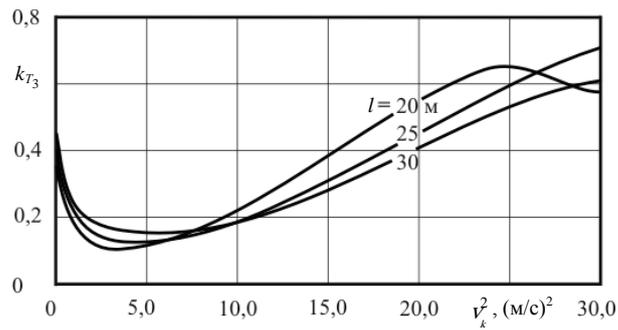


Рис. 1. Уточняющие коэффициенты для провода АС-185/29. Продолжительность КЗ – 0,1 с

Таблица 3

**Сравнительный анализ результатов расчета максимальных тяжений**

Ток КЗ, кА	Тяжение, Н						Погрешность, %			
	БНТУ		СИГРЭ		BusEF		ΔБНТУ		ΔСИГРЭ	
	$T_{2\max}$	$T_{3\max}$	$T_{2\max}$	$T_{3\max}$	$T_{2\max}$	$T_{3\max}$	$\Delta T_{2\max}$	$\Delta T_{3\max}$	$\Delta T_{2\max}$	$\Delta T_{3\max}$
Пролет 110 кВ; $l = 27,5$ м; провод АС-500/27; $t_k = 0,1$ с										
20	2568	3079	1473	19210	2610	2980	-1,6	3,3	-43	>100
29	4804	25032	2982	27390	5270	24710	8,8	1,3	-43	10,8
Пролет 110 кВ; $l = 27,5$ м; провод АС-500/27; $t_k = 0,3$ с										
20	4035	14736	3724	31480	3710	15770	-8,8	-6,6	0,38	99
25	5730	17700	6716	41230	6890	14450	17	22	-2,5	>100
Пролет 220 кВ; $l = 40,5$ м; провод АС-185/43; $t_k = 0,1$ с										
20	2880	3488	1295	13950	3430	3260	-16	7,0	-62	>100
25	4300	14690	1957	17150	5050	14840	-15	-1,0	-61	15

Как видно из табл. 3, упрощенная методика, разработанная на кафедре «Электрические станции», дает хорошие результаты, которые подтверждаются опытными данными и точными численными расчетами.

**ВЫВОДЫ**

Получены модифицированные формулы для определения максимальных тяжений, возникающих в проводах на двух стадиях их движения в режиме короткого замыкания.

**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. – Минск, 1999. – 57 с.
3. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.
4. Сергей, И. И. Упрощенный метод расчета сближения проводов с учетом конструктивных элементов распределительных устройств при двухфазном коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, В. М. Саммур // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 2. – С. 5–11.
5. Landin, I. Mechanical effects of high short-circuit currents in substations / I. Landin, C. J. Lindquist, L. R. Bergström, G. R. Cullen // IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. – 1975. – P. 1657–1665.

Представлена кафедрой электрических станций

Поступила 7.07.2006