

УДК 621.315

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО ТЯЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И., инж. АНДРУКЕВИЧ А. П.

Белорусский национальный технический университет

К параметрам электродинамической стойкости проводов относятся их максимальные отклонения и тяжения. Достаточно хорошо развиты упрощенные и численные методы расчета отклонений и сближений гибких проводов при коротком замыкании (КЗ). Результаты их расчета согласуются с опытными данными и результатами других авторов [1]. Более сложной задачей является определение максимальных тяжений гибких проводов при коротком замыкании. Приведенная в [2] явная формула для расчета максимального тяжения проводов при КЗ пригодна лишь для ориентировочных оценок. Упрощенные методы расчета максимальных тяжений проводов при КЗ регламентированы и в зарубежных стандартах [3]. Однако в них не учитывается влияние наклона траектории движения проводов после отключения КЗ на величину максимального тяжения.

В расчетной осциллограмме тяжения провода при и после КЗ выделяются два характерных максимума, зависимости которых от скорости движения провода при КЗ, полученные по компьютерной программе (КП) BusEf [4], приведены на рис. 1. Один из них наступает в момент времени, когда провода при их отталкивании подвергаются максимальному растяжению под действием электродинамических усилий $T_{2\max}$. После отключения КЗ в момент падения проводов появляется еще один максимум тяжения, так называемый третий максимум $T_{3\max}$, который имеет наибольшее значение, когда вся накопленная токоведущими конструкциями потенциальная энергия при и после КЗ $E_{п,\max}$ преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор E_y .

Статья посвящена дальнейшему развитию и совершенствованию упрощенного метода расчета третьего максимума тяжения гибких проводов распределительных устройств, основанного на представлении провода физическим маятником.

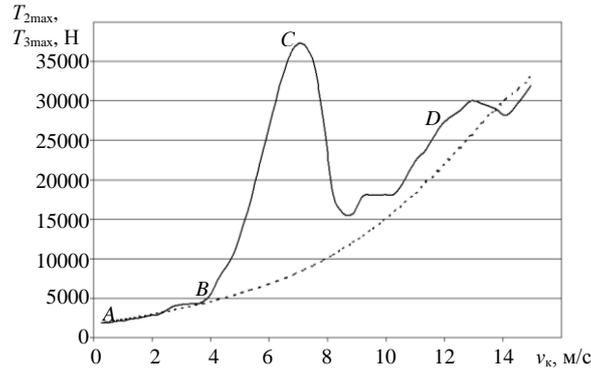


Рис. 1. Значения тяжений в зависимости от скорости движения v_k для провода АС-500/27 в пролете длиной 45 м и времени КЗ 0,2 с:
 – T_{2max} ; ——— – T_{3max}

При двухфазном КЗ можно выделить три характерные траектории движения проводов, которым будут соответствовать различные подходы в определении третьего максимума тяжений. Они могут иметь место при различных геометрических размерах пролета и характеристиках КЗ. На рис. 2 приведены траектории движения проводов, полученные по КП BusEf без учета гибкости порталов.

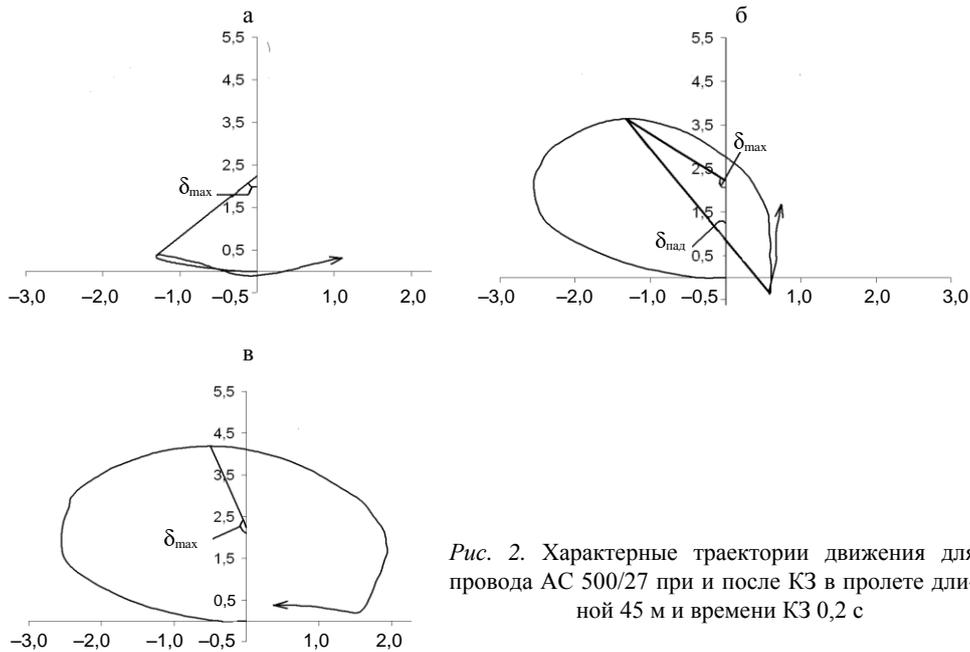


Рис. 2. Характерные траектории движения для провода АС 500/27 при и после КЗ в пролете длиной 45 м и времени КЗ 0,2 с

При максимальном угле отклонения плоскости провода δ_{max} в диапазоне 40–50° (рис. 2а) он движется подобно маятнику и возникающее при этом максимальное тяжение соответствует участку AB зависимости T_{3max} от скорости движения провода (рис. 1). В этом случае T_{3max} практически не превышает второго максимума тяжения. Поэтому T_{2max} можно принять расчетным для оценки электродинамической стойкости гибких шин распределительных устройств на указанном участке зависимости.

При максимальном угле отклонения провода, лежащего в диапазоне 50–140° (рис. 2б), он после КЗ перемещается по наклонной криволинейной траектории. В этом случае $T_{3\max}$ соответствует участку BC (рис. 1) и в точке C тяжение падения имеет свое наибольшее значение. В пределе при вертикальном падении провода получим максимально возможное тяжение падения после КЗ. Однако в действительности провод всегда перемещается по наклонной криволинейной траектории из-за наличия запасенной при КЗ кинетической энергии движения и угол его падения $\delta_{\text{пад}}$ не равен нулю. Поскольку данный угол из-за криволинейности траектории движения провода является переменным, в упрощенном расчете определяется средняя величина этого угла. Для нахождения среднего угла $\delta_{\text{пад}}$ соединяем точки наивысшего подъема и наинизшего опускания провода прямой линией. Угол между этой линией и вертикалью представляет собой средний угол падения $\delta_{\text{пад}}$ (рис. 2б).

При больших углах отклонения провода, превышающих 140° (рис. 2в), из-за действия больших токов КЗ импульс электродинамических усилий достаточен для того, чтобы заставить его двигаться по круговой траектории. В этом случае максимальное тяжение соответствует отрезку CD графика (рис. 1). Расчетным участком зависимости $T_{3\max} = f(v_k)$ является участок BC (рис. 1), определяющий диапазон токов и характеристик КЗ, а также параметров пролета, которым соответствует максимальное тяжение падения проводов.

Высота, с которой провод падает после отключения КЗ, зависит от величины импульса электродинамических усилий [5]. В наивысшей точке движения проводника накапливается максимальная потенциальная энергия [3]

$$E_{\text{п.макс}} = \cos\delta_{\text{пад}} - \cos\delta_{\text{макс}} \rho l g \frac{2}{3} f_0, \quad (1)$$

где ρ – приведенная масса единицы провода, кг [5]; l и f_0 – соответственно длина пролета и стрела провеса провода, м.

Выражение для энергии упругой деформации провода запишем в следующем виде [3]:

$$E_y = \frac{1}{2} Nl T_{3\max}^2 - T_0^2, \quad (2)$$

где T_0 – начальное тяжение провода, Н; $Nl = \frac{l}{EA} + \frac{1}{K_{\text{оп}}}$ – результирующий коэффициент упругой деформации системы «провод – опора» [3]; $K_{\text{оп}}$ – коэффициент жесткости опоры, Н/м, для абсолютно жестких порталов $K_{\text{оп}} = \infty$.

Из равенства величин энергий (1) и (2) после преобразований получим формулу для определения третьего максимума тяжений проводов

$$T_{3\max} = \sqrt{T_0^2 + 13,08EAf_0\rho \cos\delta_{\text{пад}} - \cos\delta_{\text{макс}}}. \quad (3)$$

Как видно из (3), точность расчета максимального таяния падения зависит от точности определения углов $\delta_{\text{пад}}$ и δ_{max} . Максимальный угол отклонения плоскости провода определим из уравнения энергетического баланса провода после КЗ. Для этого уравнение энергетического баланса провода при КЗ запишем в следующем виде [4]:

$$0,75J \left(\frac{S}{\rho l f_0} \right)^2 = \frac{2}{3} \rho l f_0 g \cos \delta_k - \cos \delta_{\text{max}}, \quad (4)$$

где S – импульс электродинамических усилий, Н; δ_k – угол отклонения провода в момент отключения КЗ, град.; J – момент инерции, $J = \frac{8}{15} \rho l f_0^2$.

После преобразований запишем

$$\delta_{\text{max}} = \arccos \left(\cos \delta_k - 0,06116 \frac{v_k^2}{f_0} \right). \quad (5)$$

В [6] получены графики для определения горизонтальных отклонений в зависимости от динамического критерия подобия π_d . Для приближенного определения критерия π_d применяется замена действительных осциллограмм ЭДУ их эквивалентными значениями на промежутке времени, равном продолжительности КЗ t_k :

$$\pi_d = \frac{f_3 l^2}{T_0 f_0} = \text{idem}, \quad (6)$$

где f_3 – эквивалентное электродинамическое усилие [6].

С использованием динамического критерия подобия получим графики для определения δ_{max} для различных продолжительностей КЗ в относительных единицах t_{k*} (рис. 3).

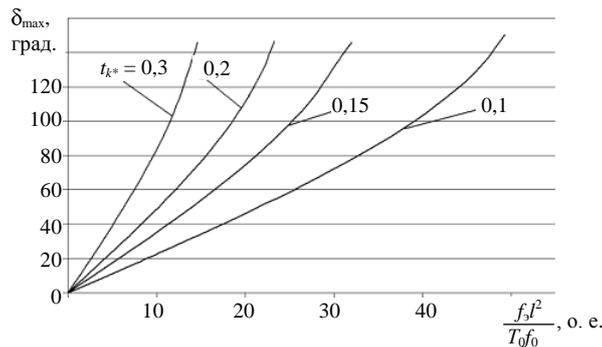


Рис. 3. Максимальный угол отклонения провода для различных относительных продолжительностей КЗ [6] в функции динамического критерия подобия

С помощью вычислительного эксперимента по компьютерной программе BusEf построены зависимости угла падения $\delta_{\text{пад}}$ от максимального угла отклонения провода для различных сочетаний характеристик КЗ

и геометрических параметров пролета (рис. 4а): длина пролета варьировалась в диапазоне от 30 до 55 м, ток КЗ – от 20 до 50 кА и продолжительность КЗ – от 0,1 до 0,2 с. Как видно из рис. 4а, для упрощенного расчета их можно заменить одной обобщенной зависимостью, приведенной на рис. 4б. Таким образом, величина угла падения позволяет уточнить характер траектории движения провода после отключения КЗ и соответственно повысить точность расчета $T_{3\max}$.

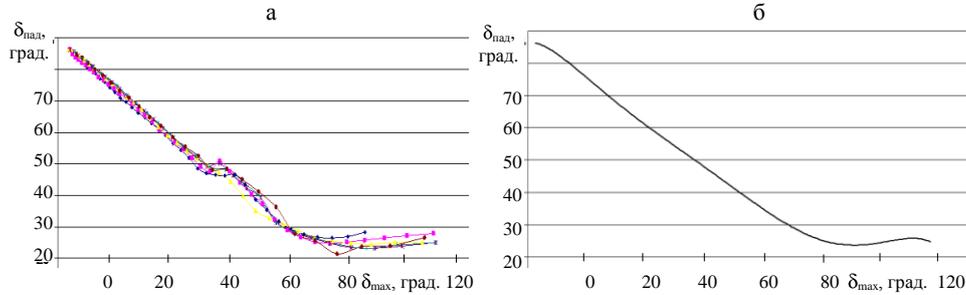


Рис. 4. Зависимость угла падения от максимального угла отклонения провода

Анализ результатов расчета показал, что замена криволинейного участка траектории движения провода из точки максимального подъема в точку падения прямой линией приводит к завышению максимального тяжения падения (табл. 1).

Таблица 1

Анализ результатов расчета третьего максимума тяжений по (3)

Ток КЗ, кА	δ_{\max} , град.	$\delta_{\text{пад}}$, град.	Упрощенный расчет $T_{3\max}$, Н	Компьютерный расчет $T_{3\max}$, Н	Погрешность $\Delta T_{3\max}$, %
АС-500/27, длина пролета – 45 м, время КЗ – 0,1 с					
39	78	36	24780	14820	67,2
41	88	30	28540	21760	31,2
43	99	26	31710	28510	11,2
АС-800/105, длина пролета – 30 м, время КЗ – 0,2 с					
29	75	38	37760	20350	85,5
31	86	32	46770	32570	43,6
33	99	26	53210	45920	15,9

После анализа результатов вычислительного эксперимента и обработки полученных данных формула (3) была модифицирована и в общем случае для расчета третьего максимума тяжений в случае жесткого закрепления проводов она имеет следующий вид:

$$T_{3\max} = \cos^n \delta_{\text{пад}} \sqrt{T_0^2 + 13,08EAf_0\rho (1 - \cos \delta_{\max})}, \quad (7)$$

где n – показатель степени; $n = 3$, если $\delta_{\max} \leq 100^\circ$; $n = 1$, если $\delta_{\max} > 100^\circ$.

В компьютерной программе BusEf для учета гирлянд изоляторов гибкая шина представляется в виде комбинированной нити с распределенными

массами разной интенсивности и сосредоточенными нагрузками различной величины, приложенными в разных местах пролета. Движение провода с учетом гирлянд изоляторов под действием электродинамических усилий в случае короткого замыкания будет происходить по более сложной траектории. Для учета влияния гирлянд изоляторов на величину третьего максимума тяжения вычислительным экспериментом получен поправочный коэффициент k_r , $k_r = \sqrt{f_0}^{-1}$. Модифицированная формула для расчета третьего максимума тяжения с учетом гирлянд изоляторов имеет следующий вид:

$$T_{3\max} = k_r \cos^2 \delta_{\text{пад}} \sqrt{T_0^2 + 13,08 E A f_0 \rho} \cdot 1 - \cos \delta_{\max} . \quad (8)$$

Как видно из табл. 2, применение поправочного коэффициента k_r позволяет повысить точность расчета третьего максимума тяжения для случая подвеса провода на натяжных гирляндах изоляторов.

В общем случае с учетом гирлянд изоляторов и жесткости порталов максимальное тяжение будет определяться по формуле

$$T_{3\max} = k_r \cos^n \delta_{\text{пад}} \sqrt{T_0^2 + 13,08 f_0 \rho I K_{\text{оп}} \frac{EA}{IK_{\text{оп}} + EA}} \cdot 1 - \cos \delta_{\max} , \quad (9)$$

где n – показатель степени, $n = 1$, если $\delta_{\max} \leq 70^\circ$; $n = 2$, если $\delta_{\max} > 70^\circ$.

Сравнение результатов упрощенного и численного расчетов (табл. 2) показывает, что после модификации формулы для расчета $T_{3\max}$ они лучше согласуются друг с другом, чем в [7].

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов расчета третьего максимума тяжения по модифицированным формулам (7)–(9)

Ток КЗ, кА	δ_{\max} , град.	$\delta_{\text{пад}}$, град.	Упрощенный расчет $T_{3\max}$, Н		Компьютерный расчет $T_{3\max}$, Н	Погрешность расчета $\Delta T_{3\max}$, %	
			без k_r	с k_r		без k_r	с k_r
АС-600/72, длина пролета – 35 м, время КЗ – 0,1 с							
40	63	45	18045	13660	13900	29,8	-1,73
44	77	36	28157	21304	22887	23,1	-6,91
48	94	28	39292	29726	26703	47,1	11,3
2хАС-240/39, длина пролета – 35 м, время КЗ – 0,2 с							
34	72	39,5	21763	16475	15421	41,1	6,83
37	86	31,5	30741	23271	22690	35,5	2,56
40	102	25	39670	30030	28625	38,6	4,91

ВЫВОД

Разработан модифицированный метод упрощенного расчета максимального тяжения падения проводов при коротком замыкании, который позволяет учесть реальную форму траектории их движения и конструктивные элементы распределительного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. L i l i e n, J. L. Comparison between experimental and numerical results on flexible conductors / J. L. Lilien. – Paris, 1980. – 10 p. (Preprint / CIGRE, 23-80 (WG-02) 18 – IWD.)
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. С е р г е й, И. И. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Ваиль Махмуд Саммур // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9.
6. С е р г е й, И. И. Обобщение численных решений уравнений движения проводов при коротком замыкании с помощью критериев подобия / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 2. – С. 13–19.
7. С е р г е й, И. И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич, Е. Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–16.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 8.08.2007

УДК 537.624

ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ОТ СООТНОШЕНИЯ ЧАСТОТ И ВРЕМЕНИ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Канд. техн. наук, доц. МОРОЗ Р. Р.

Белорусский национальный технический университет

Ферромагнитное тело можно характеризовать откликом на воздействие внешнего магнитного поля. Результатом отклика будет изменение магнитного состояния (намагниченности ферромагнитного тела). Намагниченность ферромагнитного тела определяется его магнитной структурой, под которой понимают форму областей самопроизвольной намагниченности (доменов), их размеры и ориентацию. При воздействии на ферромагнитное тело магнитным полем изменяется состояние доменов: границы доменов смещаются, их размеры увеличиваются или уменьшаются, а направление намагниченности доменов изменяется. После удаления внешнего поля гра-