

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЯЖЕНИЙ РАСЩЕПЛЕННЫХ ПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

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

Белорусский национальный технический университет

Оценка электродинамической стойкости расщепленных проводов воздушных линий заключается в проверке их схлестывания и механической прочности. Для проверки схлестывания нужно выявить наибольший размах колебаний при коротких замыканиях (КЗ). Небольшие (на порядок меньше междуфазных) расстояния между проводами расщепленной фазы обуславливают большие электродинамические усилия, действующие внутри расщепленной фазы при КЗ. Испытания в опытных пролетах показали, что при определенном сочетании конструктивных параметров расщепленной фазы и величины токов КЗ возникает схлестывание проводов [1]. После схлестывания провода фазы двигаются под действием междуфазных электродинамических усилий (ЭДУ) [2]. В момент максимального стягивания проводов в пучке под действием внутрифазных ЭДУ происходит резкое увеличение тяжения фаз. Указанный пик тяжения был назван первым максимумом $T_{1\max}$.

Экспериментальные исследования показали, что траектория движения проводов расщепленной фазы при КЗ аналогична движению одиночного провода с эквивалентной расщепленной фазе массой [2]. Поэтому наибольший размах колебания проводов расщепленной фазы, а также второй и третий максимумы тяжений вычисляются с помощью алгоритма, основанного на представлении фазы одиночным эквивалентным проводом [3].

В статье рассматривается расчет первого максимума тяжения для фазы, состоящей из двух проводов. При определении $T_{1\max}$ расчетные формулы выводятся для положения равновесия провода. Допускается, что в момент максимального стягивания проводов в фазе имеет место равновесие приложенных к ним сил и моментов этих сил. Запишем условие упругой деформации растяжения прилегающих к распоркам участков провода по закону Гука [4]

$$\Delta H = \frac{\Delta L}{l} EA, \quad (1)$$

где $\Delta H = H_{\max} - H_0$; H_{\max} – максимальное тяжение провода при схлестывании, Н; H_0 – начальное тяжение провода, Н; $\Delta L = L_{\max} - L_0$; L_{\max} – максимальная длина провода при схлестывании в подпролете, м; L_0 – первоначальная длина провода в подпролете, м; l – длина подпролета, м; E – модуль упругости, Н/мм²; A – поперечное сечение провода, мм².

Первоначальная длина провода определяется по формуле [5]

$$L_0 = l + \frac{q^2 l^3}{24H_0^2}, \quad (2)$$

где q – вес 1 м провода, Н/м.

Из рис. 1 видно, что

$$L_{\max} = L_{OA} + L_{AB} + L_{BC}, \quad (3)$$

где L_{OA} , L_{AB} , L_{BC} – длины участков провода OA , AB , BC , м.

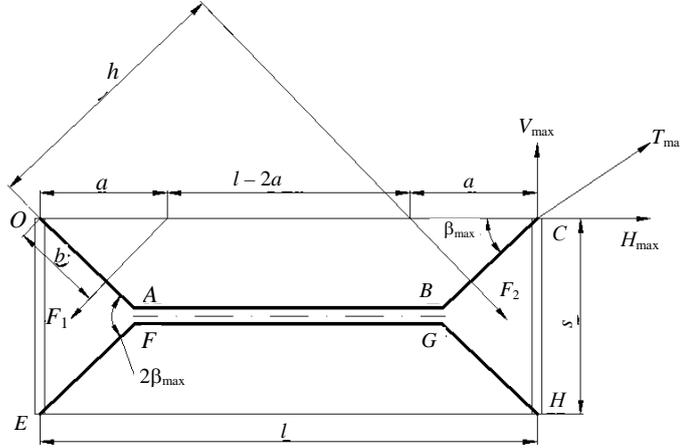


Рис. 1. К определению суммарного момента при предельном стягивании проводов расщепленной фазы

Длина несхлестнувшихся участков OA и BC

$$L_{OA} = L_{BC} = \frac{s}{2 \sin \beta_{\max}}, \quad (4)$$

где s – шаг расщепления, м.

Длина схлестнувшегося участка AB

$$L_{AB} = l - \frac{s}{\operatorname{tg} \beta_{\max}}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) выражение для L_{\max} запишем в следующем виде:

$$L_{\max} = l + \frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}}. \quad (6)$$

После этого выражение для ΔL записывается в виде

$$\Delta L = L_{\max} - L_0 = \frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}} - \frac{q^2 l^3}{24 H_0^2}. \quad (7)$$

Максимальное тяжение

$$H_{\max} = H_0 + \frac{\Delta L}{l} EA. \quad (8)$$

После подстановки значения ΔL из (7) в (8) получим

$$H_{\max} = H_0 + \frac{EA}{l} \left[\frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}} - \frac{q^2 l^3}{24 H_0^2} \right]. \quad (9)$$

Расчет силы сжатия распорки производится по следующему выражению:

$$F_p = 2H_{\max} \operatorname{tg} \beta_{\max}. \quad (10)$$

Если рассматривать расщепленную фазу, состоящую из двух проводов, то на участок провода OA действует ЭДУ $\overline{F_1}$ от участка EF второго провода $EFGH$ и на участок BC провода $OABC - \overline{F_2}$ от участка GH второго провода $EFGH$ (рис. 1). Равнодействующие ЭДУ $\overline{F_1}$ и $\overline{F_2}$ определяются по формуле для случая двух прямолинейных проводников, расположенных в одной плоскости под углом друг к другу [6]. Вследствие симметрии под-пролета ЭДУ $\overline{F_1}$ и $\overline{F_2}$ равны между собой и определяются по следующей формуле [6]:

$$F_1 = F_2 = \frac{i^2}{10} \frac{1 + \cos 2\beta_{\max}}{\sin 2\beta_{\max}} \ln \frac{(l_{OF} + l_{JF})(l_{OF} + l_{JF})}{(l_{OE} + l_{EJ})(l_{AF} + l_{FK})}, \quad (11)$$

где i – ток, протекающий по проводам $OABC$ и $EFGH$, равный половине полного тока КЗ в фазе; l_{OF} , l_{JF} , l_{OE} , l_{EJ} , l_{AF} , l_{FK} – длины прямых OF , JF , OE , EJ , AF и FK (рис. 2).

Выразив длины указанных выше прямых отрезков через шаг расщепления s , диаметр провода d , β_{\max} и подставив их в (11), получим следующее выражение для определения электродинамических усилий:

$$F_1 = F_2 = \frac{i^2 \cos \beta_{\max}}{10 \sin \beta_{\max}} \ln \frac{[K + s - d \cos 2\beta_{\max}][K + s \cos 2\beta_{\max} - d]}{sd(2 \sin \beta_{\max} + 1 - \cos 2\beta_{\max})^2}, \quad (12)$$

где

$$K = \sqrt{d^2 + s^2 - 2ds \cos 2\beta_{\max}}. \quad (13)$$

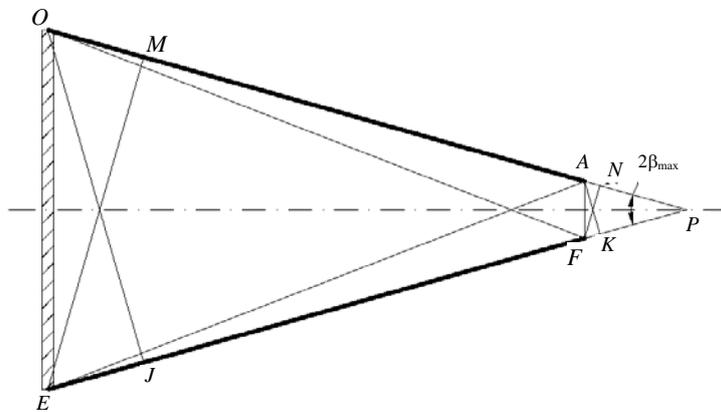


Рис. 2. К определению ЭДУ между несхлестнувшимися участками проводов: OA , EF – несхлестнувшиеся участки провода; OE – шаг расщепления; AF – диаметр провода

Уравнение равновесия моментов приложенных к участку $OABC$ сил записывается в следующем виде:

$$V_{\max} l - F_1 b - F_2 h = 0, \quad (14)$$

где $V_{\max} = H_{\max} \operatorname{tg} \beta_{\max}$ – вертикальная составляющая тяжения T_{\max} (рис. 1); b , h – плечи ЭДУ $\overline{F_1}$ и $\overline{F_2}$ (рис. 1).

С помощью геометрических преобразований получаем выражения для определения b и h :

$$b = a \cos \beta_{\max}; \quad (15a)$$

$$h = (l - a) \cos \beta_{\max}. \quad (15b)$$

Подставляя значения b , h и V_{\max} в (14) и учитывая, что $F_1 = F_2$, получим после сокращения обоих членов

$$H_{\max} \operatorname{tg} \beta_{\max} - F_1 \cos \beta_{\max} = 0. \quad (16)$$

После подстановки значений F_1 из (12) и H_{\max} из (9) в (16) получим

$$\left[H_0 + \frac{EA}{l} \left[\frac{s(1 - \cos \beta_{\max})}{\sin \beta_{\max}} - \frac{q^2 l^3}{24 H_0^2} \right] \right] \operatorname{tg} \beta_{\max} - \frac{i^2 (\cos \beta_{\max})^2}{10 \sin \beta_{\max}} \ln \frac{[K + s - d \cos 2\beta_{\max}][K + s \cos 2\beta_{\max} - d]}{sd(2 \sin \beta_{\max} + 1 - \cos 2\beta_{\max})^2} = 0. \quad (17)$$

Выражение (17) представляет собой трансцендентное алгебраическое уравнение, которое относительно β_{\max} решается методом половинного деления [7] либо с помощью компьютерной программы (КП). После того как β_{\max} определено, выполняется расчет H_{\max} и T_{\max} .

Определение β_{\max} по трансцендентному уравнению (17) вызывает определенные затруднения, поэтому для ускорения и упрощения расчета были получены зависимости угла β_{\max} от сочетания следующих параметров: ток КЗ, шаг расщепления и удельный вес провода на единицу длины

$\beta_{\max} = f\left(\frac{I}{\sqrt{sq}}\right)$. На рис. 3 приведены зависимости для определения β_{\max}

при длине подпролета 5 м, шагах расщепления 0,1; 0,12 и 0,15 м, марках провода 2хАС95/16, 2хАС150/19, 2хАС240/39, 2хАС500/27 и 2хАС650/79. Как видно из рисунка, для упрощенного расчета их можно заменить одной обобщенной зависимостью.

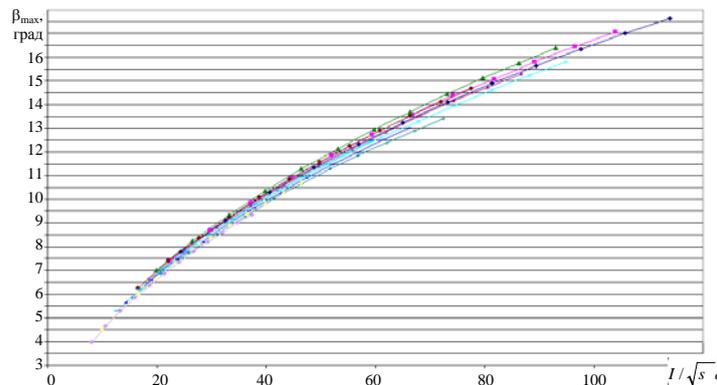


Рис. 3. Зависимость $\beta_{\max} = f\left(I/\sqrt{sq}\right)$ для подпролета 5 м при разном шаге расщепления и для различных марок провода: —◆— 2хАС95/16, $s = 0,1$ м; —■— 2хАС95/16, $s = 0,12$ м; —×— 2хАС150/19, $s = 0,12$ м; 2хАС240/39, $s = 0,15$ м; —▲— 2хАС500/27, $s = 0,15$ м

Аналогичные расчеты были проведены для подпролетов длиной 7 и 9 м, для всех случаев ряд зависимостей можно представить одной кривой (рис. 4).

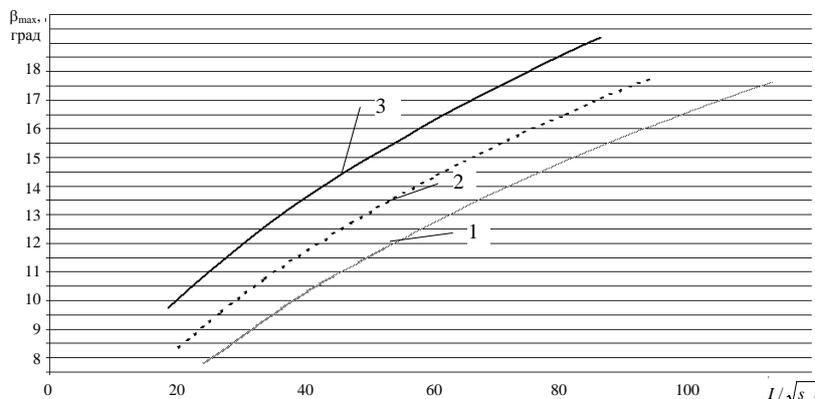


Рис. 4. Зависимость $\beta_{\max} = f(I/\sqrt{sq})$ при разных длине подпролета, шаге расщепления и для различных марок провода: 1 – подпролет 5 м; 2 – 7; 3 – подпролет 9 м

Были проведены расчеты первого максимума тяжения по разработанной методике и КП FAZA. Сравнение результатов расчета (табл. 1) проводились с экспериментальными данными, полученными зарубежными исследователями [8].

Таблица 1
Сравнение результатов расчета $T_{1\max}$ по методу БНТУ и КП FAZA с опытными данными

№ п/п	Тип провода	I_k , кА	T_0 , кН	Длина × число пролетов	$T_{1\max}$, кН			Погрешность, %	
					Опыт	БНТУ	FAZA	$\Delta_{\text{БНТУ}}$	Δ_{FAZA}
1	2хASTER 570	22,5	56,1	76×3	63,0	64,3	65,0	2,11	-3,14
2		41	46,0	76×3	66,4	59,8	62,7	-9,92	-5,52
3		59,8	40,1	76×3	69,1	61,9	71,6	-10,5	3,64
4		60,2	36,8	57×4	75,4	66,1	81,8	-12,3	8,53
5	2хPETUNIA 612	60,2	53,1	57×4	81,8	84,3	105,6	3,09	29,1
6		60,2	55,0	76×3	81,8	76,1	85,0	-6,99	3,87
7		56,9	55,9	76×3	78,2	77,1	81,9	-1,24	4,71

Как видно из табл. 1, упрощенная методика расчета первого максимума тяжения для фазы, состоящей из двух проводов, дает хорошие результаты, которые подтверждаются опытными данными и численными расчетами.

ВЫВОДЫ

Разработан модифицированный метод упрощенного расчета первого максимума тяжения, возникающего в проводах расщепленной фазы при коротком замыкании. Для типовых пролетов открытых распределительных устройств 110–330 кВ получены графики определения максимального угла искривления провода при КЗ, при использовании которых нет необходимо-

сти решения трансцендентного уравнения (17) при определении первого максимума тяжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. O l s z o w s k i, B. Calculation of Mechanical Effects in EHV Outdoor Substations at Short Circuit Currents / B. Olszowski, J. Orkisz, Z. Waszczyszyn // *Revue Electrotechnique*. – 1977. – Vol. 12, № 8. – P. 275–285.
2. M i r i, A. M. Dynamische Kurzschlusswirkungen in Hochspannung-Schaltanlagen mit Einfach- und Bundelleitern- Überblick / A. M. Miri, C. Heinrich // *Elektrizitätswirtschaft*. – 1980. Vol. 79, № 19. – S. 708–712.
3. 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. 12–26.
4. С т р е л ю к, М. И. Выбор расчетных условий при проверке гибкой ошиновки РУ на электродинамическую стойкость при КЗ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей // *Ред. Журнала «Известия вузов СССР. – Энергетика»*. – Минск, 1981. – 18 с. – Деп. в Информэнерго 01.01.1981. – № 2451. – Эн. // РЖ: 22 Энергетика. – 1981. – № 8. – 7Е58 ДЕП. – С. 8.
5. К а ч у р и н, В. К. Теория висячих систем / В. К. Качурин. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 222 с.
6. Х о л я в с к и й, Г. В. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах / Г. В. Холявский. – М.: Энергия, 1971. – 156 с.
7. Д е м и д о в и ч, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М.: Наука, 1968. – 664 с.
8. D a l l e, B. Etude du pincement d'un faisceau de sousconducteurs d'une portee de ligne lors d'un court circuit / B. Dalle // *CIGRE*. – 1982. 23–82 (WG-02) 06-IWD. – P. 1–21.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 08.08.2008

УДК 621.311.017

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ РАЗМЫКАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ 110 кВ И ВЫШЕ

**Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., канд. техн. наук ЗОЛОТОЙ А. А.,
инженеры МАКАРЕВИЧ В. В., МУХА А. Н.**

Белорусский национальный технический университет

Одним из способов ликвидации контурных уравнительных токов является размыкание путей их протекания, т. е. размыкание контуров электрических сетей [1]. Для осуществления экономичных режимов распределительных сетей 10(6) кВ персонал электросетей ежегодно или несколько раз в год разрабатывает так называемую «нормальную» схему эксплуатации с четко установленными точками размыкания контуров и условиями работы устройств защиты и автоматики.