

2. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

УДК 621.315

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЯЖЕНИЙ РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ**

*Садовский В.А., Ходос А.Л.*

**Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор СЕРГЕЙ И.И.**

Теоретические и экспериментальные исследования электродинамической стойкости гибких проводников ведутся в странах, участвующих в работе Международной электротехнической комиссии. Актуальность и сложность решения проблемы электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) на гибкие провода электроустановок привели к объединению усилий специалистов ряда стран под эгидой международных энергетических организаций СИГРЭ и МЭК.

Проблема оценки электродинамической стойкости гибких проводников – это проблема оценки смещений проводников при их колебаниях во время КЗ и после него, оценки тяжений в проводниках во время колебаний, вызванных электродинамическими силами, проблема надежного определения моментов времени, когда после отключения тока КЗ сближение проводников максимально и опасно с точки зрения пробоя изоляции, проблема (при увеличенных смещениях) уверенной оценки возможности реализации максимального сближения во время бестоковой паузы, проблема оценки опасности схлестывания проводников при КЗ.

В 1999 г. в Беларуси введен в действие Межгосударственный стандарт СНГ ГОСТ 30323–95, который регламентирует использование компьютерных и упрощенных методов расчета динамики проводов при КЗ [1].

Упрощенные методы расчета характеризуются небольшим объемом вычислительных операций и доступностью его применения широким кругом специалистов. В настоящее время известны два упрощенных метода расчета: СИГРЭ и МЭК [2] и МЭИ (ТУ) [3]. Оба метода базируются на расчетной модели провода в виде физического маятника с массой, сосредоточенной в его центре тяжести, и дифференциальном принципе решения задачи электродинамического действия токов короткого замыкания на гибкие провода электроустановок. При таком решении задачи необходимо вводить ряд допущений, что ограничивает область их применения на практике. Выбор физического маятника в качестве расчетной модели – это результат теоретических и экспериментальных исследований поведения проводников при КЗ. Сопоставление многочисленных опытных данных, полученных на специально построенных экспериментальных установках, с расчетами [2] показали, что модель жесткого маятника дает возможность получать инженерные оценки смещений проводников и тяжений в них, достаточно хорошо согласующиеся с результатами опытов.

На кафедре «Электрические станции» БНТУ также ведутся работы по разработке упрощенного метода расчета электродинамической стойкости проводов при КЗ. Особенностью метода является то, что он основывается на интегральном и энергетическом

принципах механики и не требует решения дифференциальных уравнений. Важным достоинством метода является наличие поправочных коэффициентов, учитывающих увеличение динамических стрел провеса при отталкивании и уменьшение при сближении проводов. Величины указанных коэффициентов получены вычислительным экспериментом по компьютерной программе, в которой реализован численный метод расчета движения проводов, представленных гибкой упругой нитью.

Рассмотрим 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  $E_{\text{п max}}$  преобразуется в энергию упругих деформаций проводов и опор  $E_y$ . Существует еще один максимум тяжения первый  $T_{1\max}$ , когда под действием внутрифазных усилий происходит максимальное удлинение составляющих проводов расщепленной фазы.

Оценка электродинамической стойкости расщепленных проводов воздушных линий заключается в проверке их схлестывания и механической прочности. Для проверки схлестывания нужно выявить наибольший размах колебаний при 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. После схлестывания провода фазы двигаются под действием междуфазных электродинамических усилий ЭДУ. В момент максимального стягивания проводов в пучке под действием внутрифазных ЭДУ происходит резкое увеличение тяжения фаз. Как было отмечено выше, этот пик тяжения был назван первым максимумом тяжения  $T_{1\max}$ .

Наиболее простым и наглядным является случай двух проводов в фазе (рисунок 1). 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.

По методу БНТУ получено уравнение для расчета  $\alpha_{\max}$ :

$$\left[ H_0 + \frac{EA}{l} \left[ \frac{S(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} - \frac{q^2 l^3}{24 H_0^2} \right] \right] i g \alpha_{\max} - \frac{i^2 (\cos \alpha_{\max})^2}{10 \sin \alpha_{\max}} l \frac{\left[ K + \frac{(S+d-d \cos 2\alpha_{\max})}{2 \cdot \sin \alpha_{\max}} \right] \left[ K + \frac{(S+d) \cos 2\alpha_{\max} - d}{2 \sin \alpha_{\max}} \right]}{d(S+d)(1 + \sin \alpha_{\max})^2} = 0. \quad (1)$$

Выражение (1) представляет собой трансцендентное алгебраическое уравнение. Оно решается относительно  $\alpha_{\max}$  методом половинного деления либо с помощью КП. После того, как  $\alpha_{\max}$  определено, выполняется расчет  $I_{\max}$ ,  $T_{1\max}$ ,  $F_p$ :

$$H_{\max} = H_0 + \frac{EA}{l} \cdot \left[ \frac{S(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} - \frac{q^2 l^3}{24H_0^2} \right];$$

$$T_{1\max} = \sqrt{H_{\max}^2 + G_{\max}^2};$$

$$F_p = 2H_{\max} \operatorname{tg} \alpha_{\max}.$$

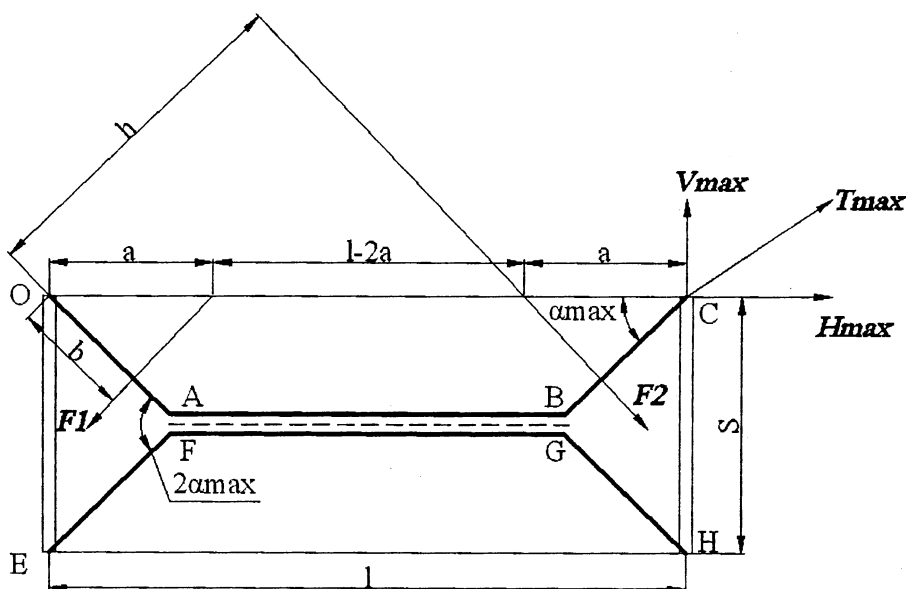


Рис. 1. Предельное стягивание проводов расщепленной фазы

На кафедре были проведены расчеты первого максимума тяжения по разработанной методике и КП FAZA. Сравнение результатов расчета (таблица 1) проводилось с экспериментальными данными полученными зарубежными исследователями.

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

Тип провода	$I_{кз}$ , кА	$T_0$ , кН	Длина × число пролетов	$T_{1\max}$ , кН			Погрешность, %	
				опыт	БНТУ	FAZA	$\Delta_{\text{БНТУ}}$	$\Delta_{\text{FAZA}}$
2хASTER 570	22,5	56,1	76×3	63,0	64,3	65,0	2,11	3,14
	41	46,0	76×3	66,4	59,8	62,7	-9,92	-5,52
	59,8	40,1	76×3	69,1	61,9	71,6	-10,5	3,64
	60,2	36,8	57×4	75,4	66,1	81,8	-12,3	8,53
2хPETUNIA 612	60,2	53,1	57×4	81,8	84,3	105,6	3,09	29,1
	60,2	55,0	76×3	81,8	76,1	85,0	-6,99	3,87
	56,9	55,9	76×3	78,2	77,1	81,9	-1,24	4,71

### Литература

- ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.99. – Минск, 1999. – 57 с.
- The mechanical effects of short-circuit currents open-air substations (rigid or flexible bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.
- Кудрявцев Е.П., Неклепаев Б.Н. Расчет смещений гибких проводников при коротких замыканиях // Электричество. – 1993. – № 5. – С. 17–25.
- Стрелюк М.И., Сергей И.И. Выбор расчетных условий при проверке гибкой ошиновки РУ на электродинамическую стойкость при КЗ // 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. 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.

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

7. Сергей И.И., Пономаренко Е.Г. Обобщение численных решений уравнений движения проводов при коротком замыкании с помощью критериев подобия // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 2. – С. 13–19.

8. Сергей И.И., Андрукевич А.П., Пономаренко Е.Г. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–16.

УДК 621.316.925

## **МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА МР-500**

*Крымов Д.М., Лось Ю.Н.*

**Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент ТИШЕЧКИН А.А.**

Ввод в эксплуатацию линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, электростанций большой мощности, интенсивное развитие основных и распределительных сетей чрезвычайно усложнили проблему управления.

В связи с этим идет непрерывный процесс развития и совершенствования техники релейной защиты. Создаются и вводятся в эксплуатацию новые защиты для дальних ЛЭП, для крупных генераторов, трансформаторов и энергоблоков. Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов. При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок. При возникновении ненормальных режимов защита, в зависимости от характера нарушения, производит операции необходимые для восстановления нормального режима или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

Основные требования, предъявляемые к релейной защите:

- селективность;
- быстрота действия;
- чувствительность;
- надежность.

Микропроцессорные устройства релейной защиты в последнее время существенно потеснили электромеханические и даже электронные, особенно в энергосистемах западных стран. Специалисты спорят, хорошо это или плохо, но такова всеобщая тенденция. Беларусь пока находится только в начале этого пути, однако процесс более широкого применения микропроцессорных реле набирает силу и в нашей стране. Опыт применения микропроцессорных устройств релейной защиты во многих энергосистемах позволил не только оценить их преимущества, но и выявить серьезные недостатки.

Микропроцессорные устройства релейной защиты являются весьма сложными устройствами со специфическим принципом действия, не имеющим ничего общего с обычными (традиционными) реле защиты. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько вообще микропроцессорное реле является собственно реле.