

*Д.К. МОНАХОВ*, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков  
*О.Г. СЕРЕДА*, канд. техн. наук., доц., НТУ "ХПИ", Харьков

## **ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В КОНТАКТНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

Обґрунтовано ефективність модернізації нерухомого контактопідтримувача автоматичного вимикача ВА51-39, яка дозволила зменшити струм трогання рухомого контакту. Розроблена і запрограмована методика точного розрахунку електродинамічних зусиль між паралельними провідниками зі струмами.

Обоснована эффективность модернизации неподвижного контактодержателя автоматического выключателя ВА51-39, которая позволила уменьшить ток трогания подвижного контакта. Разработана и запрограммирована методика точного расчета электродинамических усилий между параллельными проводниками с токами.

**Введение.** В эпоху бурного развития электротехники и электроники остро стоит вопрос эффективности и надежности защиты электрических сетей и устройств, подключенных к ним. Повреждение любого элемента электрической цепи при протекании токов короткого замыкания влечет за собой дополнительные материальные затраты из-за остановки технологического процесса, поломки дорогостоящего оборудования, а в ряде случаев создает ситуации, опасные для жизни людей. Для предотвращения подобных ситуаций квалифицированные инженеры различных научно-исследовательских организаций мира проводят исследования в области улучшения характеристик двух основных аппаратов защиты – автоматических выключателей и предохранителей.

Задача защитного аппарата заключается в том, чтобы защитить электрооборудование в образовавшемся короткозамкнутом контуре. Основным фактором, приводящим к выходу из строя токопроводов, является тепловое воздействие аварийного тока. Устройство защиты должно ограничить длительность и амплитуду аварийного тока на таком уровне, чтобы полный интеграл отключения, обеспечиваемый защитой, не превышал значения максимально допустимого для защищаемого объекта. Решение данной задачи характеризуется уравнением:

$$\int_0^t i^2 \cdot dt < [I^2 \cdot t]_{\text{доп}} , \quad (1)$$

где  $t$  – время действия аварийного тока;  $i$  – мгновенное значение аварийного тока;  $[I^2 \cdot t]_{\text{доп}}$  – допустимая перегрузочная способность токопровода (защитный показатель).

Автоматические выключатели и предохранители имеют свои особенности, как положительные, так и отрицательные. Так, предохранители имеют меньшие габариты и интеграл отключения, а автоматические выключатели позволяют многократность действия, универсальность выполняемых функций и возможность быстрого действующего автоматического повторного включения. Сочетать все перечисленные положительные качества в одном устройстве на сегодня не представляется возможным, поэтому конструкторы пошли по пути сближения защитных характеристик автоматических выключателей с положительными качествами предохранителей. Ведутся работы по уменьшению габаритных размеров автоматических выключателей и снижению Джоулева интеграла путем ограничения величины тока короткого замыкания, проходящего по токоведущим частям. Уменьшить временную составляющую, входящую в уравнение (1), не удастся ввиду инерционности пружинных приводов автоматических выключателей.

Вопрос создания автоматического выключателя, который по своим характеристикам близок к положительным характеристикам предохранителей, наиболее актуален в сетях с короткими кабельными линиями, так как амплитуда тока короткого замыкания в таких сетях имеет большую величину. Пример такой электрической сети – кабельное электрооборудование.

**Целью работы** является обоснование эффективности модернизации неподвижного контактодержателя автоматического выключателя ВА51-39, которое позволило уменьшить ток трогания подвижного контакта.

**Технические решения.** Существует несколько технических решений быстродействующих автоматических выключателей направленных на уменьшения интеграла отключения. Основные конструктивные принципы быстродействующих автоматических выключателей на протяжении последних пяти десятилетий остаются без существенных изменений. Улучшение защитных характеристик достигается в основном за счет совершенствования конструкций контактных систем и привода. В среднем время от момента подачи команды на срабаты-

вание (от начала прохождения тока короткого замыкания через катушку электромагнитного расцепителя) до начала размыкания контактов автоматического выключателя составляет десятки миллисекунд.

Для снижения собственного времени срабатывания в ряде конструкций автоматических выключателей используются индукционно-

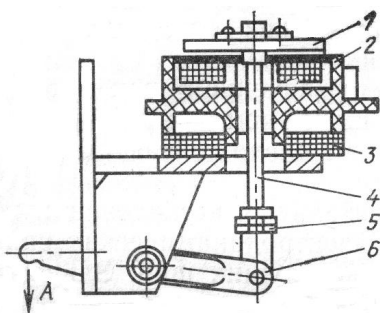


Рис. 1.

привод, состоящий из медного диска 1, катушки 2, прокладки 3, тяги 4, гайки 5 и рычага 6. Когда ток короткого замыкания достигает критического значения (уставки) на катушку 2 поступает импульс тока от предвари-

тельно заряженной конденсатора [2]. При этом по закону электромагнитной индукции в диске 1 ин-

дуцируются токи, которые создают магнитное поле, направленное встречно магнитному полю катушки. В результате взаимодействия магнитных полей диск отталкивается от катушки и через тягу 4 и рычаг 6 воздействует на подвижный контакт выключателя. При этом подвижный контакт размыкается раньше срабатывания электромагнитного расцепителя. Загорается электрическая дуга, ограничивающая ток короткого замыкания, а, следовательно, и интеграл Джоуля.

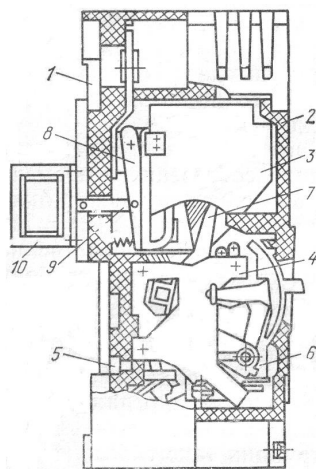


Рис. 2.

При использовании независимого электромагнитного накопителя энергии (независимый электромагнит питается от независимого источника) за сравнительно малое время до размыкания подвижного контакта осуществляется перемещение мало-подвижного контакта и формируется дуга, которая начнет ограничивать ток в защищаемой цепи [2]. На рис. 2 изображен независимый электромагнитный накопитель энергии. Его основными элементами конструкции такого выключателя

чателя являются основание 1, крышка 2, дугогасительная камера 3, механизм свободного расцепления 4, расцепитель максимального тока 5, расцепитель дистанционного отключения 6, контактная система, которая включает в себя подвижный контакт 7 и малоподвижный контакт 8, соединенный тягой 9 с электромагнитом 10. При протекании тока короткого замыкания управляющие импульсы поступают одновременно на катушку дистанционного расцепителя 6, воздействующего на механизм свободного расцепления, и на катушку электромагнита 10. Электромагнит через тягу 9 действует силой на малоподвижный контакт 8 и за несколько миллисекунд отводит его на некоторое расстояние от подвижного контакта 7. Благодаря этому дуга, ограничивающая ток, возникает раньше. Через несколько миллисекунд после этого происходит обычное срабатывание подвижного контакта с последующим вхождением дуги в дугогасительную камеру.

Технические решения, направленные на снижение собственного времени срабатывания, основанные на использовании электродинамических усилий (ЭДУ), являются самыми эффективными и экономически оправданными.

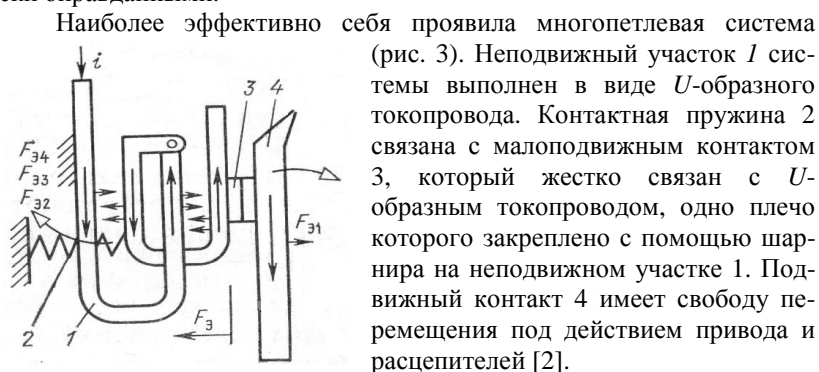


Рис. 3.

Наиболее эффективно себя проявила многопетлевая система (рис. 3). Неподвижный участок 1 системы выполнен в виде U-образного токопровода. Контактная пружина 2 связана с малоподвижным контактом 3, который жестко связан с U-образным токопроводом, одно плечо которого закреплено с помощью шарнира на неподвижном участке 1. Подвижный контакт 4 имеет свободу перемещения под действием привода и расцепителей [2].

Особенностью данной системы является то, что при протекании токов короткого замыкания электродинамические силы, обусловленные воздействием нескольких участков петли, разводят подвижный и неподвижный контакты в противоположные стороны еще до срабатывания расцепителя. При этом образуется дуга, обеспечивающая ограничение тока короткого замыкания через 1÷2 мс после прохождения тока через контактную систему.

Описанные способы ограничения тока короткого замыкания очень эффективны, однако либо требуют чрезмерных энергетических

затрат, либо существенно увеличивают габариты автоматических выключателей. Кроме того, в контактной системе рис. 3 из-за раннего отброса возможно повторное замыкание контактов с последующим свариванием вследствие инерционности привода.

Данная статья посвящена проблеме усовершенствования контактного узла автоматических выключателей с пружинным приводом на основе использования электродинамических сил отталкивания между проводниками с токами разного направления для эффективного токоограничения.

**Модернизированная конструкция.** На рис. 4 изображен контакт

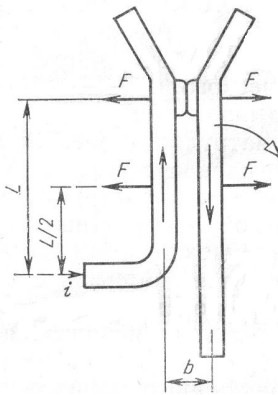


Рис. 4.

полупетлевого типа. Такая конструкция имеет промежуточное положение между контактной системой пальцевого типа, где электродинамический отброс подвижного контактодержателя происходит только под действием сил Двайта в зоне стягивания линий тока к контактным точкам, и двойной электродинамической петлей (рис. 3), где к силе Двайта добавляется четыре электродинамические силы от токов в параллельных плечах. Контактная система рис. 4 размыкается как под действием сил Двайта, так и под действием электродинамической силы при встречно-параллельном протекании тока. Это позволяет зажечь дугу раньше, чем в

контактах пальцевого типа, а также избежать недостатков двойной петли (рис. 3).

В данной работе рассмотрено конструкторское решение проблемы снижения тока трогания подвижного контакта автоматических выключателей с использованием электродинамических сил отталкивания между проводниками с токами разного направления. Схематически изображены контактного узла пальцевого и полупетлевого типа показано на рис. 5.

Использование упрощенного метода расчета электродинамических усилий, вызванных токами короткого замыкания, между проводниками допускает предположение о том, что токи сосредоточены в геометрических осях проводников. Этот метод прост, однако дает большую погрешность. Поэтому его нельзя рекомендовать к использованию в конструкторских расчетах. Для получения результатов с

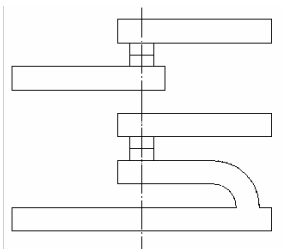


Рис. 5.

Разбиения определяется требуемой степенью точности.

Для расчета было выбрано среднее сечение проводников контактов. На рис. 6 представлено среднее сечение контактов пальцевого, а на рис. 7 – полупетлевого типа.

большой степенью точности в данной статье используется метод, предполагающий разбиение воздействующего проводника и проводника, на который воздействуют, на тонкие проводники произвольного малого квадратного сечения. При этом учитываются силы от каждого элемента разбиения воздействующего проводника на каждый элемент разбиения проводника, на который воздействуют. Величина сечения проводников

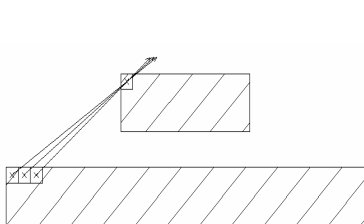


Рис. 6.

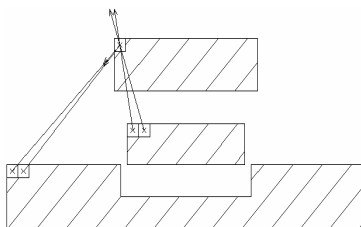


Рис. 7.

После разбиения проводников на элементарные проводники малого сечения находится сумма коэффициентов их контуров с допущением того, что ток течет по геометрическим осям элементарных проводников, по формуле:

$$K = 2 \cdot \frac{D - S}{H}, \quad (2)$$

где  $D$  – длина диагонали четырехугольника, образованного элементарными проводниками;  $S$  – длина боковой стороны четырехугольника;  $H$  – высота четырехугольника.

Электродинамическая сила параллельных токопроводов рассчитывается по формуле:

$$F_{EDU} = 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot K, \quad (3)$$

где  $I_1, I_2$  – действующее значение токов в проводниках.

Сила Двайта, обусловленная стягиванием линий тока в контакте,

определяется по формуле [3]:

$$F_{DV} = 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln \left( R \cdot \xi \cdot \sqrt{\pi \cdot H_B / F_K} \right), \quad (4)$$

где  $I$  – действующее значение тока, проходящего через контакт;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий способ контактирования;  $H_B$  – контактная твердость материала контактов по Бринеллю;  $F_K$  – сила контактного нажатия;  $R$  – эквивалентный радиус контактной площадки.

Эквивалентный радиус контактной площадки равен [4]:

$$R = \sqrt{S / \pi}, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь контактирования эквивалентной цилиндрической напайки, которая вычисляется по формуле:

$$S = \sqrt{F_K / \pi \cdot H_B \cdot \xi} \quad (6)$$

Для нахождения полной силы  $F$ , действующей между проводниками с токами, электродинамическая сила параллельных участков  $F_{EDU}$  суммируется с силой Двайта  $F_{DV}$ :

$$F = F_{EDU} + F_{DV} \quad (7)$$

Для расчетов была написана программа, позволяющая рассчитать

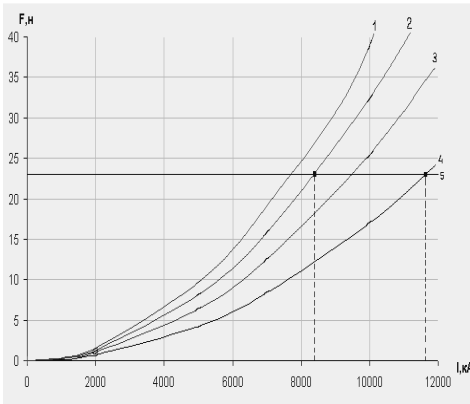


Рис. 8.

ЭДУ между двумя проводниками одинаковой длины произвольного сечения. Программа определяет проекции силы, действующей между проводниками, на горизонтальную и вертикальную составляющие. Для сравнительного анализа также рассчитаны значения ЭДУ по приближенному методу. По результатам расчета построен график, представленный на рис. 8, где 1 – приближенный расчет полупетлевой контактной системы, 2 – точный расчет полупетлевой контактной системы, 3 – приближенный расчет пальцевой контактной системы, 4 – точный расчет пальцевой контактной системы, 5 – сила контактного нажатия.

**Выводы.** 1. Расчеты показали, что замена контактной системы

пальцевого типа в выключателе ВА51-39 на полупетлевую контактную систему позволило уменьшить ток трогания контактов с 11,5 кА до 8,5 кА, что существенно ограничивает максимальное значение аварийного тока КЗ первой полуволны, а следовательно уменьшается термическое и электродинамическое действие тока КЗ на электрооборудование. 2. Применение упрощенной методики расчета приводит к существенной погрешности величины тока трогания подвижного контакта.

**Список источников информации:** 1. Глух Е.М., Зеленов В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970. – 152 с. 2. Намитокоев К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с. 3. Александров Г.Н., Борисов В.В., Каплан Г.С. Проектирование электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 448 с. 4. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования). Учебное пособие для студентов электротехнических вузов. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.



**Монахов Дмитрий Константинович**, магистр кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".  
Научные интересы связаны с электродинамикой и термодинамикой в электротехнических устройствах.



**Середа Александр Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".  
Научные интересы связаны с исследованием проблем энергосбережения в электрических аппаратах.

*Поступила в редколлегию 16.12.09*