

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА: Новая защита от сверхтоков

Реми УАЙДА¹, Жан Франсуа де ПАЛМА¹, Жиль Гонтье²

¹Компания «MERSEN», 15 rue de Вокансон, 69720 Сен Боне де Мюре, ФРАНЦИЯ

²Компания «HERAKLES Groupe Safran», Авеню Гей Люссак, 33167 Сен-Медар-эн-Жаль,

ФРАНЦИЯ

remy.ouaida@mersen.com

Краткий обзор – Предохранители и автоматические выключатели играют важную роль безопасности в системах электротранспорта. Появление новых сфер применения, особенно в электрических сетях постоянного тока, привело к тому, что традиционные устройства ограничения тока достигли своего предела. Фактически возможно, что, механические выключатели слишком медленно размыкают цепи постоянного тока с высоким значением тока короткого замыкания. С другой стороны возможно, что, предохранители слишком медленно размыкают цепи постоянного тока с очень низким значением тока короткого замыкания. В областях применения цепи переменного тока отключению токов КЗ способствует естественное прохождение через нуль. В областях применения постоянного тока отсутствие естественного прохождения через нуль делает отключение токов КЗ традиционными технологиями ограничения тока сложным процессом. В данном документе предлагается новое решение для защиты систем транспортировки на постоянном токе с использованием гибридной системы, состоящей из предохранителя и пироэлектрического выключателя, которая будет применяться в генерировании фотоэлектрической энергии, сохранении энергии, электротранспортных средствах.

Ключевые термины – Гибридная защита от сверхтоков, сфера применения постоянного тока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно защитными приборами от сверхтоков (ОПС) были предохранители и механические прерыватели цепи, быстродействующие и используемые в общих целях. Кроме того, каждый раз, когда измерение и тестирование электрических параметров достигали новых этапов и способствовали выдвигению новых проблем в отключении токов КЗ, в ответ на это появлялись решения, включающие предохранители и/или прерыватели цепи. Так ли по-прежнему обстоят дела сегодня?

На Рисунке 1 изображена матрица требований по номинальным значениям тока/напряжения для существующих и будущих сфер применения постоянного тока. Значения тока и напряжения для данных сфер применения варьируются между 500 В – 1 500 В и 200 А – 1 500 А. Компания «MERSEN» разрабатывает новые продукты/технологии, отвечающие различным требованиям систем постоянного тока (1 - 5). Тем не менее, традиционные приборы защиты от сверхтоков ОПС достигли своего физического предела в функциональных характеристиках, размере и стоимости.

Предохранители служат защитой электрических систем в течение всего времени существования электричества. Точнее говоря, в течение более ста лет предохранители-ограничители тока были экономичной, легко устанавливаемой, компактной, быстрой и надежной защитой от сверхтоков для электрических систем: от сетей распределения до импульсных источников питания. Будучи наиболее безаварийным и компактным решением, с 1950 года технология предохранителей-ограничителей тока развила свою скорость, максимально допустимую мощность и адаптировалась к более экстремальным рабочим условиям с целью

защиты полупроводниковых устройств или оборудования в новой эре силовой электроники. Однако, ограниченная теплофизикой неконтролируемая природа предохранителей делает сложным их обращение к основным требованиям от сфер применения систем транспортировки на постоянном токе, которые, как правило, требуют определенного размера продукции, повышения температуры, способности маневренного режима мощности и надежной защиты сравнительно малых токов КЗ, до распределительных сетей (как правило, килоамперы в аккумуляторных системах против десятков килоампер в распределительных сетях)

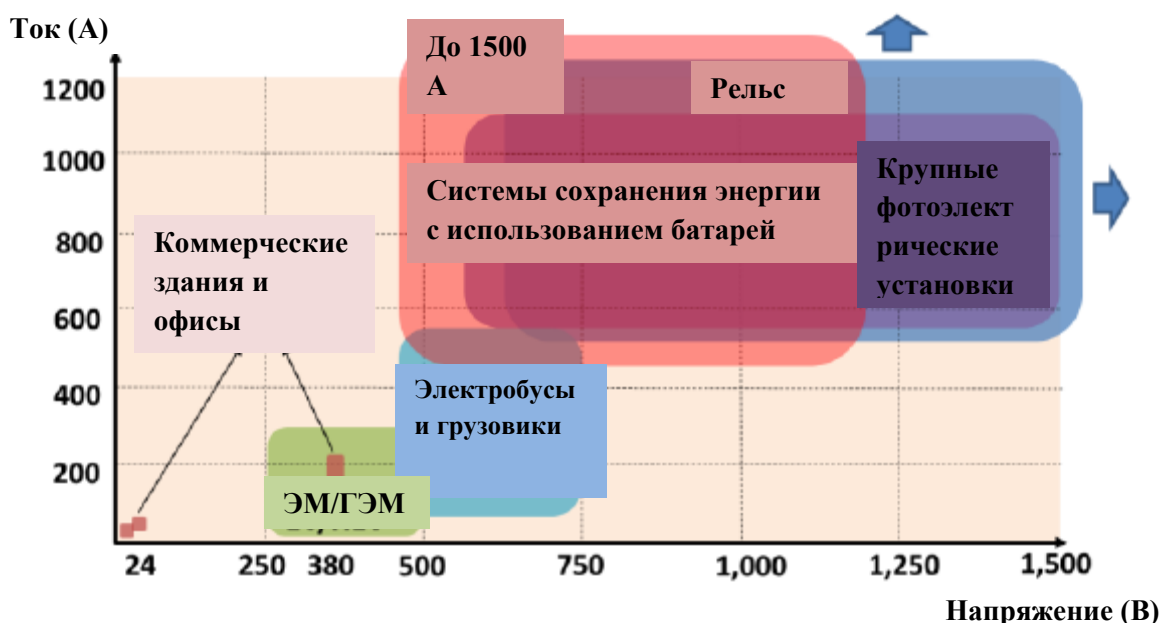


Рисунок 1: Определенные требования по току и напряжению для существующих и будущих сфер применения постоянного тока

С другой стороны, для защиты от короткого замыкания широко используются прерыватели цепи. Их функция восстановления имеет большое преимущество перед предохранителями. Более того, прерыватели цепи характеризуются более низким падением напряжения в замкнутом состоянии, а также гальваническим разделением в разомкнутом состоянии. Однако, при обнаружении тока КЗ прерыватели цепи срабатывают более медленно, чем предохранители-ограничители тока, вследствие большой механической временной составляющей. В сетях постоянного тока наличие дуг ведет к эрозии контактов и к усталости дугогасительной камеры, то есть к более короткому времени эксплуатации и высоким затратам на техническое обслуживание. Более продолжительное время реакции на высокое значение тока КЗ ведет к более высокому проходящему току, который, в конце концов, подвергнет напряжению отходящую цепь, которая должна быть защищена.

Конечно, предохранители и прерыватели цепи могут и должны улучшаться и адаптироваться к требованиям новых сфер применения. Но они, тем не менее, всегда будут базироваться на одних и тех же фундаментальных принципах. В данном документе представлена новая разработка, основанная на гибридизации предохранителей и пироэлектрических выключателей, которая способна ответить на новые требования защиты сетей постоянного тока. В данном документе описываются рабочие принципы гибридной системы защиты от сверхтоков и показаны результаты тестирования в качестве подтверждения правильности проектного решения. И наконец, будет представлено сравнение между характеристиками новой защиты и традиционного предохранителя.

II. НОВАЯ ЗАЩИТА ОТ СВЕРХТОКОВ

А. Пирозлектрический выключатель

Компания «Mersen», ранее называвшаяся «Ferraz Shawmut», в 80-х разрабатывала пиротехнические устройства с номинальным значением напряжения 1 кВ – 24 кВ переменного/постоянного тока и тока 2 кА – 10 кА. Такие пиротехнические устройства (6) были выбраны и все еще продаются в сферах применения постоянного/переменного тока, включая помимо прочего аэродинамические трубы, понижающие преобразователи частоты переменного напряжения и распределение высокого напряжения. Маломощные пиротехнические защитные устройства приобрели популярность в начале 1990 годов в автомобильной промышленности, когда в эксплуатацию вошли первые аварийные предохранительные подушки в рулевых колесах европейских средств передвижения. Пирозлектрический выключатель – это электрический размыкатель, но при его использовании в отличие от предохранителя время достижения полного размыкания цепи не будет зависеть от магнитуды сверхтоков. Как правило, в пирозлектрическом выключателе используется миниатюрное режущее устройство, работающее от пиротехнического заряда, обеспечивающего мощность, необходимую для разрезания металлического проводника (шины), как показано на рисунке 2. Это способствует очень простому, а значит, чрезвычайно надежному поведению (7-9). Пирозлектрический выключатель никак не воздействует на электрическую систему перед срабатыванием, так как он расположен над шиной. После срабатывания он разрезает шину и разделяет/изолирует два проводника. Это занимает меньше одной миллисекунды. На рисунке 2 представлен вид в разрезе пирозлектрического выключателя, изобретенного компанией «Herakles Safran» (10). Медный стержень изображен оранжевым цветом, пусковое устройство – желтым и ножевое устройство – синим.

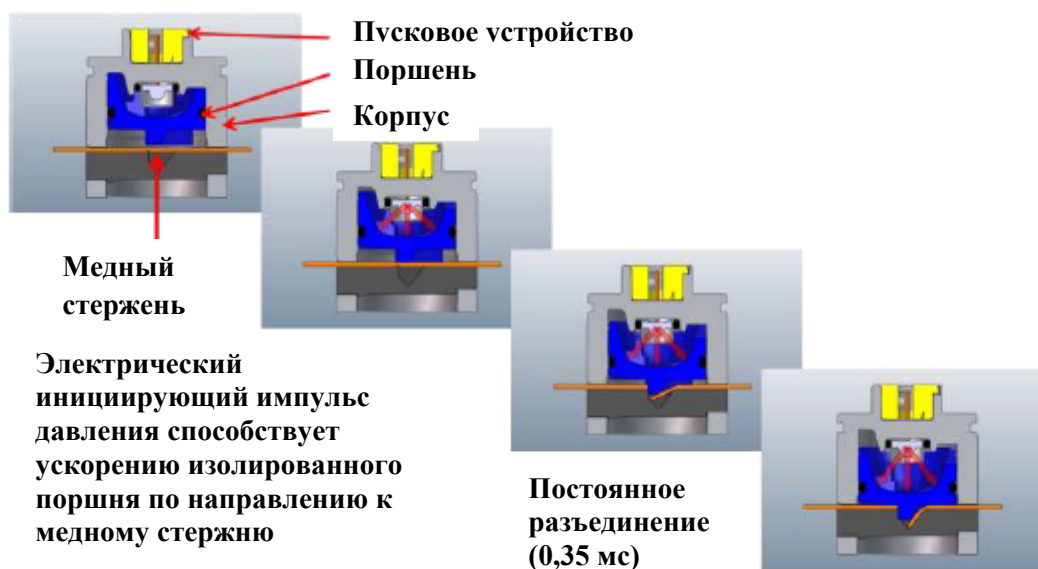


Рисунок 2: Вид пирозлектрического выключателя в разрезе

Одиночный пирозлектрический выключатель предназначен для работы со среднemosными устройствами (электрическое устройство) при силе тока в 400 А и напряжении в 50 В. Любое увеличение токового диапазона требует увеличения сечения шины, и таким образом, увеличения энергии при зажигании, необходимом для разъединения. Аналогичным образом, любое увеличение напряжения требует большего расстояния между проводниками после разрезания шины, и, значит, более сложного и крупного в размере устройства.

Несмотря на то, что пирозлектрический выключатель имеет преимущество более быстрого срабатывания, чем строго механический аппарат, и является менее дорогим, чем просто электрические выключатели в сферах применения с высокой нагрузкой, такое устройство имеет несколько недостатков. Самый заметный среди них – риск возникновения вредоносной электрической дуги при разрывании индуктивной цепи. Простое объяснение этому: то, что цепь с индуктивным током трудно поддается изменениям. Такое сопротивление способствует образованию вредоносной дуги между двумя ранее соединенными проводниками в момент разъединения. В отличие от типа «мягкой» дуги, которая образуется в любое время при разъединении цепи без индуктивного сопротивления (то есть емкостной цепи), дугу под воздействием индуктивного сопротивления очень сложно погасить. Так как причины таких недостатков не являются очевидными, сбои в пирозлектрических прерывателях цепи при высокой нагрузке могут происходить вследствие их неспособности быстро отключать ионизацию между частями электродов.

Одиночный пирозлектрический выключатель был предварительно протестирован с целью выявить ограничения способности защиты системы постоянного тока. Первое испытание проводилось при 200 В, 250 А с очень низким L/R 200 мкс. На рисунке 3 изображен пирозлектрический выключатель после испытания под нагрузкой. Устройство разорвало цепь, но на медном стержне появилось темное пятно вследствие сопротивления. Разрывное напряжение после испытания было также аномально низким (диэлектрическое испытание = 500 В). Также было проведено другое испытание при более низком напряжении 150 В, и разрывное напряжение после зажигания было таким, как и предполагалось (то есть ≈ 5 кВ). То есть 150 В – это предел для данного пирозлектрического выключателя.

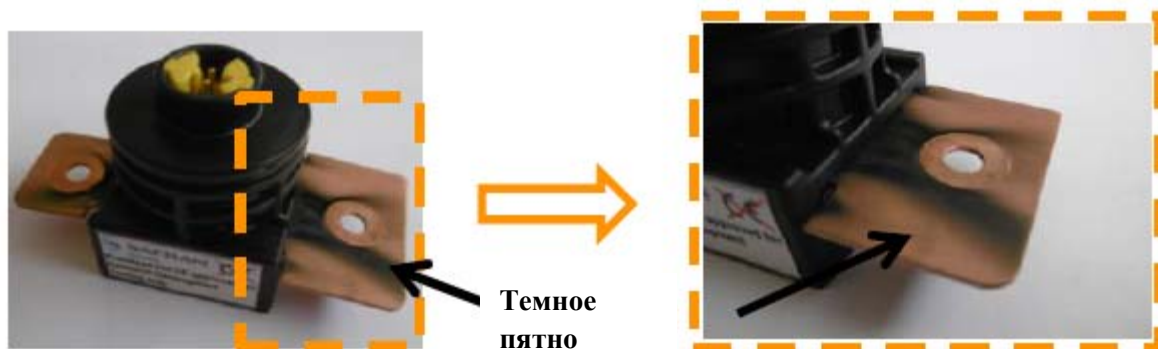


Рисунок 3: Пирозлектрический выключатель после испытания под нагрузкой (200 В-250 А- L/R =200 мкс)

Вот один из объектов, описанных в данном документе, обеспечивающих высокую скорость, это высоковольтное гибридное устройство защиты от сверхтоков, способное минимизировать возникновение токов КЗ в системе.

В. Гибридное решение: пирозлектрический предохранитель

В данном разделе представлено новое гибридное решение защиты от сверхтоков, которое представляет собой параллельную электрическую конфигурацию элемента пирозлектрического выключателя и элемента предохранителя. На рисунке 4 изображены пирозлектрический выключатель (серый) и предохранитель (белый). Параллельная конфигурация означает то, что проектировщик может выбрать наилучшие компоненты из каждого типа. Фактически, предохранитель и пирозлектрический выключатель взаимодействуют между собой. В данном разделе представлены этапы их поведения.

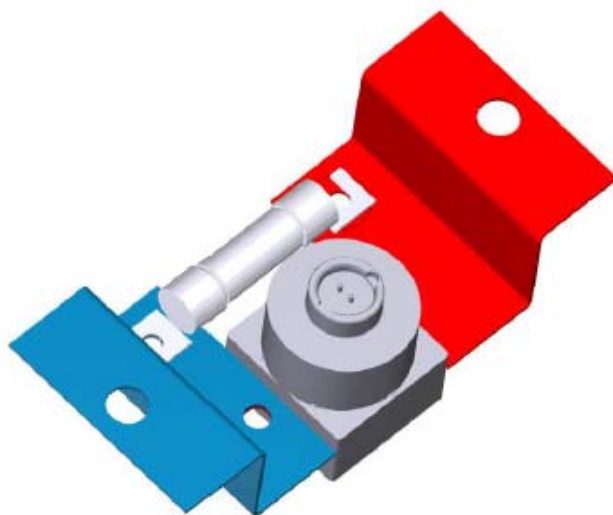


Рисунок 4: Новое гибридное решение защиты от сверхтоков, состоящее из пироэлектрического выключателя и предохранителя, работающих параллельно

На рисунке 5 представлена электрическая схема пироэлектрического предохранителя. На ней изображены предохранитель F1, пироэлектрический выключатель P1 и электронная срабатывающая система. В период эксплуатации все устройство замкнуто, и течет номинальный ток. Сопротивление P1 (медный стержень) ниже, чем сопротивление F1. Например, сопротивление пироэлектрического выключателя 400 А во включенном состоянии около 200 мкОм, а сопротивление предохранителя около 1-2 мОм. Таким образом, большая часть номинального тока (80 – 90 %) протекает через P1. Характеристики цикличности и срок эксплуатации повышены в сравнении с простым предохранителем. Более того, при очень низком сопротивлении всей системы (~200 мкОм) потери во включенном состоянии значительно ниже. Предохранитель F1 может характеризоваться низким калибром номинального тока (10 - 20% от $I_{ном}$), а, следовательно, и низкой стоимостью.



Рисунок 5: Электрическая схема пироэлектрического предохранителя

Давайте сосредоточимся на разрыве цепи. Когда ток аномально увеличивается из-за сбоя в определенной сфере применения постоянного тока, датчик (эффект Холла или шунт) определяет ток КЗ и отправляет срабатывающий сигнал на P1 с помощью щита управления. Как указывалось ранее, системы пироэлектрических выключателей претерпевают риск образования вредоносной дуги при разрыве цепи высоковольтной нагрузкой. Но в этом случае предохранитель F1

расположен параллельно и все еще замкнут. Таким образом, P1 разрезает медный стержень без какого-либо напряжения и ток КЗ течет через F1. Так как у этого предохранителя заниженные номинальные характеристики, он размыкает цепь за очень короткое время (менее 300 мс). Подведем итог, предохранитель рассчитан на номинальное напряжение и имеет заниженные номинальные характеристики тока. Такая новая защита делает возможным разрыв цепи при высоком напряжении (до 1 500 В) и сильном токе (400 – 800 А).

III. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В данной главе представлены функциональные характеристики новых приборов защиты от сверхтоков. В ней описаны характеристики во включенном состоянии (потери, температура) и поведение во время размыкания.

А. Нахождение под нормальной токовой нагрузкой

Для того, чтобы определить характеристики во включенном состоянии, система была протестирована при номинальном значении тока 400 А. Потери при номинальном значении тока 400 А составили между 20 Вт и 30 Вт при 25 °С. Данные значения были симитированы с помощью параллельной системы, состоящей из предохранителя с сопротивлением 1 мОм и пирозлектрического выключателя с сопротивлением 200 мкОм. Эти расчеты сопротивления соответствуют расчетам в предыдущем разделе и подтверждены нашими измерениями.

Систему поместили в печь, чтобы проконтролировать внешнюю температуру, соединив концевыми соединителями с площадью сечения 240 мм² (соответствует стандарту). Поскольку сопротивление очень низкое, рост температуры ограничен. На рисунке 6 изображена имитация роста температуры для $I_{ном}$ 400 А в ноже пирозлектрического выключателя, который является наиболее горячим местом в системе.

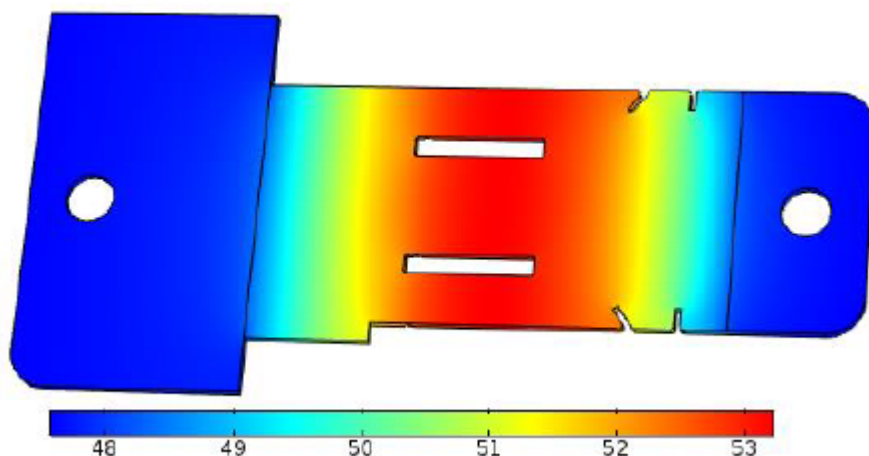


Рисунок 6: Имитация ножа в пирозлектрическом выключателе с $I_{ном}$ 400 А при 25 °С

В таблице 1 представлены результаты роста температуры, полученные в процессе имитации и испытаний. Значения температур системы одинаковые при 25 °С и немного разные для 60 °С и 90 °С. Причиной может быть фактический поток воздуха в печи в зависимости от условия коэффициента конвективной теплоотдачи в наших процессах имитации. Тем не менее, система имеет интересные функциональные характеристики в небольшими потерями во включенном состоянии.

Температура окружающей среды	Температура системы (имитация)	Температура системы (испытания)
------------------------------	--------------------------------	---------------------------------

25 °С	53 °С	55 °С
60 °С	87 °С	70 °С
90 °С	116 °С	99 °С

Таблица 1: Значения температур системы при 400 А (испытания и имитация) в зависимости от внешней температуры

В. Защита от токов КЗ

Компания «Mersen» имеет испытательный центр, который проводит низковольтные и высоковольтные электрические испытания: включение на короткое замыкание и устранение коротких замыканий, сопротивление току в переходном процессе и срабатывание при высоком значении тока в условиях роста. Все эти испытания могут проводиться как в цепи постоянного, так и переменного тока. Лаборатория высокоомощных испытаний имеет 3 различные испытательные ячейки для всех требуемых уровней напряжения, тока и питания:

- Испытательная ячейка 3 МВА: Напряжение регулируется до 800 В при значении тока короткого замыкания до 8 000 А (среднеквадратичное значение).
- Испытательная ячейка 20 МВА: Напряжение регулируется между 50 и 1 000 В при значении тока короткого замыкания до 35 000 А (среднеквадратичное значение).
- Испытательная ячейка 400 МВА: Ток дает турбогенератор, работающий от синхронного преобразователя 1 300 кВА. Напряжение регулируется от 100 В до 45 кВ при максимальном значении тока короткого замыкания 305 кА (среднеквадратичное значение).

В наших испытаниях при 500 – 1 000 В постоянного тока и значении тока КЗ 1 000 – 7 000 А использовалась испытательная ячейка 20 МВА. Для срабатывания пирозлектрического выключателя была создана специальная испытательная плата. Эта плата состояла из конденсаторов, которые давали заряд 8 А, и пускового устройства при команде открытия. При таком уровне тока пирозлектрический выключатель разрезал медный стержень за 300 мкс. На рисунке 7 изображены кривые тока и напряжения во время разрезания для тока КЗ 7 000 А при 1 000 В постоянного тока. Общее время отключения КЗ – 1,5 мс. В процессе размыкания можно наблюдать перенапряжение вследствие дуги в параллельном предохранителе. Такой выброс напряжения можно снизить, заменив предохранитель другим предохранителем с другим элементом (11). В данном испытании параллельный предохранитель имел диапазон 63 А, таким образом, минимальный ток КЗ, который система могла отключить за 50 мс, был 400 А. Общее время отключения КЗ состояло из трех этапов, как описано в (1):

Общее время отключения КЗ =

пирозапал + плавление плавкой вставки в предохранителе + образование дуги в предохранителе
(1)

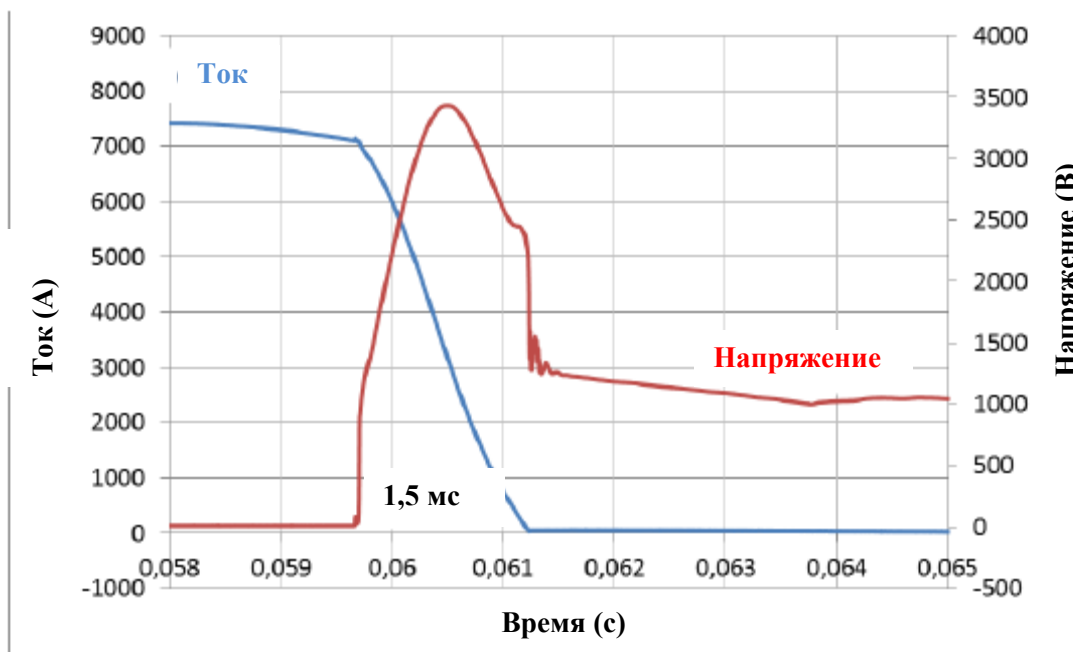


Рисунок 7: Кривые тока и напряжения для тока КЗ 7 000 А при 1 000 В постоянного тока

Как видно, общее время отключения КЗ можно рассчитать посредством сложения значений времени пирозапала (независимо от тока КЗ, но в зависимости от тока запала), времени плавления плавкой вставки предохранителя и времени образования дуги (зависит от тока КЗ). На рисунке 8 представлено общее время отключения КЗ в зависимости от среднеквадратичного значения тока и чрезмерной нагрузки, которую система может выдержать. Время отключения КЗ для пирозлектрического предохранителя выборочно, потому что оно почти не зависит от тока КЗ. На самом деле, при значении тока 400 А – 600 А устройство защищает область применения за менее чем 50 мс, а при значении тока выше 600 А – в пределах 3 мс. Более того, пирозлектрический предохранитель выдерживает чрезмерную нагрузку без ухудшения состояния (кривая AA'). Например, чрезмерная нагрузка 7 000 А может протекать через устройство в течение 100 мс. Такие характеристики делают пирозлектрический предохранитель облагаемым пошлиной продуктом с возможностью настройки кривой «время - ток», что нехарактерно для традиционного предохранителя.

В следующем разделе представлены все за и против пирозлектрического предохранителя в сравнении с традиционными предохранителями.

С. Сравнение между пирозлектрическими и традиционными предохранителями

Ввиду того, что сферы применения переменного тока продолжают расти умеренными шагами, компания «MERSEN» столкнулась с быстро растущим спросом на устройства защиты постоянного тока (12), имея дело с быстро развивающимися рынками, такими как электромобили/гибридные электромобили, сохранение энергии с использованием батарей, дата-центр, фотоэлектрические установки, электрическая тяга или воздушные суда с электрифицированным оборудованием. Чтобы ответить на спрос, компания «Mersen» разработала полный диапазон устройств защиты от сверхтоков. Среди них можно найти предохранители и пирозлектрические предохранители. В данной главе представлено сравнение между двумя данными технологиями.

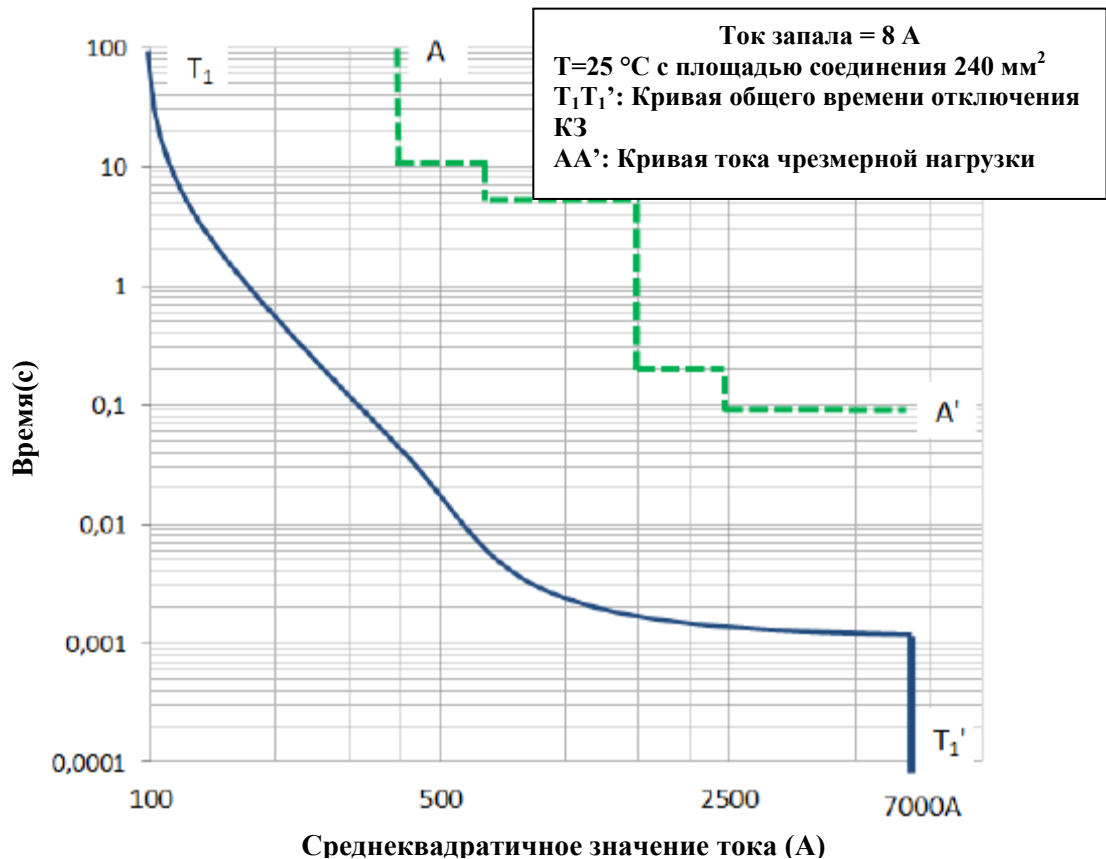


Рисунок 8: Общее время прерывания цепи и ток чрезмерной нагрузки

Сначала давайте сконцентрируемся на преимуществах данного решения. Сегодня предохранители постоянного тока – это ультрабыстродействующие предохранители, предназначенные для сильного тока КЗ с экономичной и проверенной технологией. Пирозлектрический предохранитель – это быстродействующая защита с экономичной технологией. Потери на диэлектрическую проводимость почти равны нулю, и система работает как для слабых, так и сильных токов КЗ (в максимальной конфигурации). В таблице 2 представлены функциональные характеристики различных технологий. Оба продукта не годятся для вторичного использования, так как они используются в качестве максимальной защиты. При использовании пирозлектрического предохранителя время отключения КЗ не зависит от тока, и кривая «время-ток» может полностью регулироваться, что не характерно для традиционного предохранителя. Новое решение имеет отличные показатели цикличности с низкими потерями на диэлектрическую проводимость.

Характеристика	Предохранитель постоянного тока	Пирозлектрический выключатель + предохранитель
Возможность вторичного использования	Нет	Нет
Время отключения сильного тока КЗ	Отлично, 10 мкс	Хорошо, 1 мс
Время отключения слабого тока КЗ	Медленное плавление	Отлично
Показатели цикличности	Ограниченно	Отлично
Потери на диэлектрическую проводимость	80 Вт (400 А)	20 Вт (400 А)
Настройка кривой «время-ток»	Ограничено	Да
Автономный источник энергии	Да	Возможно
Средняя рыночная цена	Низкая	Низкая

Таблица 2: Сравнительные показатели пирозлектрического и традиционных предохранителей

Новое устройство защиты от сверхтоков имеет много преимуществ, но главная проблема – это электронное управление. На самом деле, данное решение не имеет автономного источника энергии, как предохранитель, поэтому для него необходимо добавить датчик тока и электронную систему. В некоторых сферах применения невозможно установить такую электронную систему в требуемом объеме. По этим причинам был разработан самосрабатывающий пирозлектрический предохранитель. В следующей главе будут представлены принцип и характеристика максимальной защиты.

IV. МАКСИМАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

А. Принцип

Как было указано ранее, пирозлектрический предохранитель демонстрирует отличные функциональные характеристики (время разрыва цепи, объем, вес и стоимость). К сожалению, в некоторых сферах применения система управления током не является эффективной. Более того, чтобы гарантировать максимальную защиту электрической установки, многие устройства защиты должны быть самосрабатывающими. Все эти причины привели к развитию самосрабатывающего пирозлектрического предохранителя.

На рисунке 8 изображен запатентованный самосрабатывающий предохранитель (а) в номинальных условиях и (б) с током КЗ. Давайте сосредоточим внимание на номинальных условиях. На схеме изображен тот же самый пирозлектрический предохранитель (зеленым цветом) с пирозлектрическим выключателем PS1 и параллельным предохранителем (F1). PS1 разделен на две траектории: траектория запала, изображенная как резистор, и траектория питания, где номинальный ток протекает внутри. В предыдущей главе пользователь должен был добавить систему электронного управления, чтобы инициировать систему. В данном решении принцип заключается в том, чтобы добавить в серию предохранитель (F2), разработанный для номинального тока, но не для номинального напряжения. Данный предохранитель используется как датчик тока и энергоблок для устройства запуска пирозлектрического выключателя. В номинальных условиях ток протекает через F2 и PS1. Если образуется ток КЗ (Рисунок 6 (b)), между клеммами предохранителя F2 образуется и электрическая дуга. В этот момент ничего не может остановить образование дуги, потому что F2 не разработан для номинального напряжения. Такая дуга будет использована устройством запуска как источник напряжения. R1 определяет течение тока в запале PS1 и управляет скоростью открытия PS1. После того, как запал выполнен, принцип подобен традиционному пирозлектрическому предохранителю, описанному в предыдущей главе. Когда пирозлектрический предохранитель размыкает цепь, образуется дуга в F2, и вся система защищает сферу применения без внешней электронной системы.

Преимущество данной системы в том, что она обладает автономным источником энергии, как и традиционный предохранитель. Так как F2 не разработан для номинального напряжения, предохранитель имеет маленький размер и низкую потерю напряжения. Таким образом, суммарные потери ниже, чем у традиционного предохранителя.

Недостатком является отсутствие селективной способности кривой «время-ток», которая имеется в системе управления электроникой. Тем не менее, в низковольтном предохранителе селективную способность более легко настроить. В следующей главе представлены результаты испытаний.

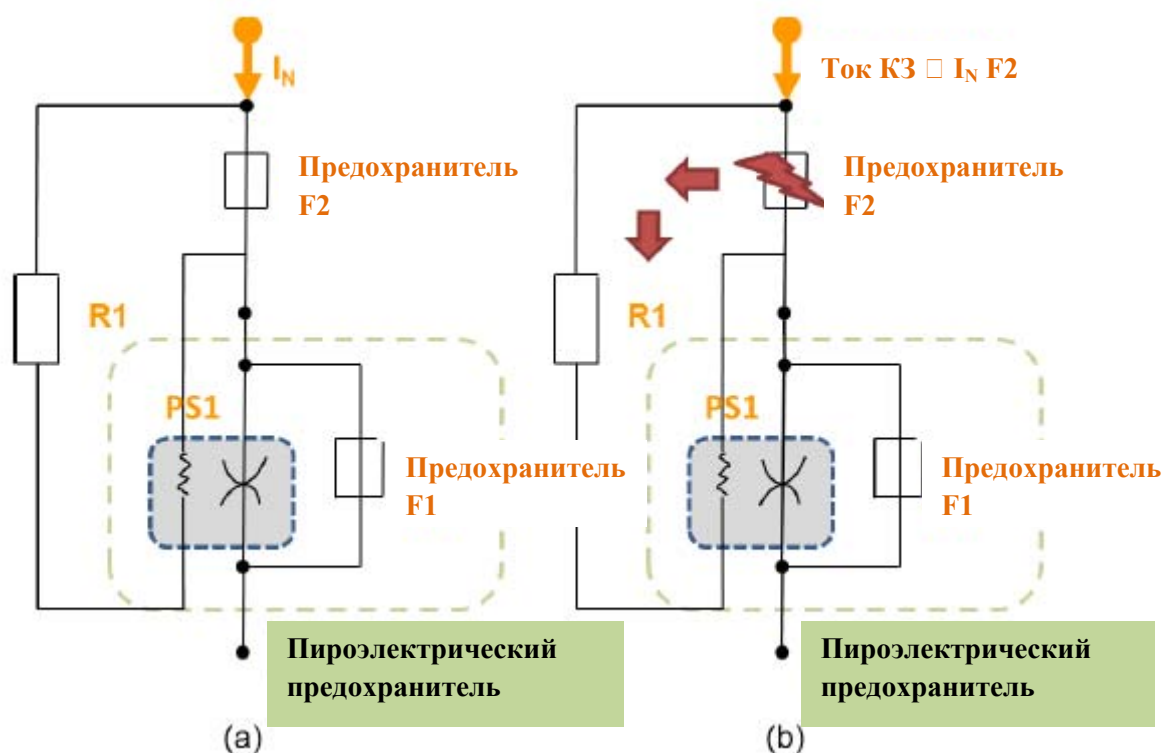


Рисунок 9: Схема самосрабатывающего предохранителя (а) в номинальных условиях и (б) с током КЗ.

В. Результаты испытаний

Чтобы обосновать принцип самосрабатывающего пирозлектрического предохранителя, в наших лабораториях было проведено несколько испытаний. Пирозлектрический предохранитель был протестирован при 500 В постоянного тока с током КЗ 11 кА. Результаты представлены на рисунке 10. Ток изображен синим цветом, а напряжение красным. Кривые можно разделить на 4 этапа. Этап 1 - это начало короткого замыкания с увеличением значения тока через предохранитель F2 и PS1. Когда ток достигает определенного значения, в F2 (этап 2) образуется дуга, которая способствует росту напряжения и предельных значений тока. В течение данного этапа энергия дуги перенаправляется в пирозлектрический выключатель. На этапе 3 PS1 срабатывает, и ток течет в F1. Данный предохранитель плавится, способствуя чрезмерному напряжению и падению значения тока. В данный момент дуга в F2 не имеет достаточно энергии для сохранения. На этапе 4 система защищает сферу применения при значении напряжения 500 В и отсутствии тока.

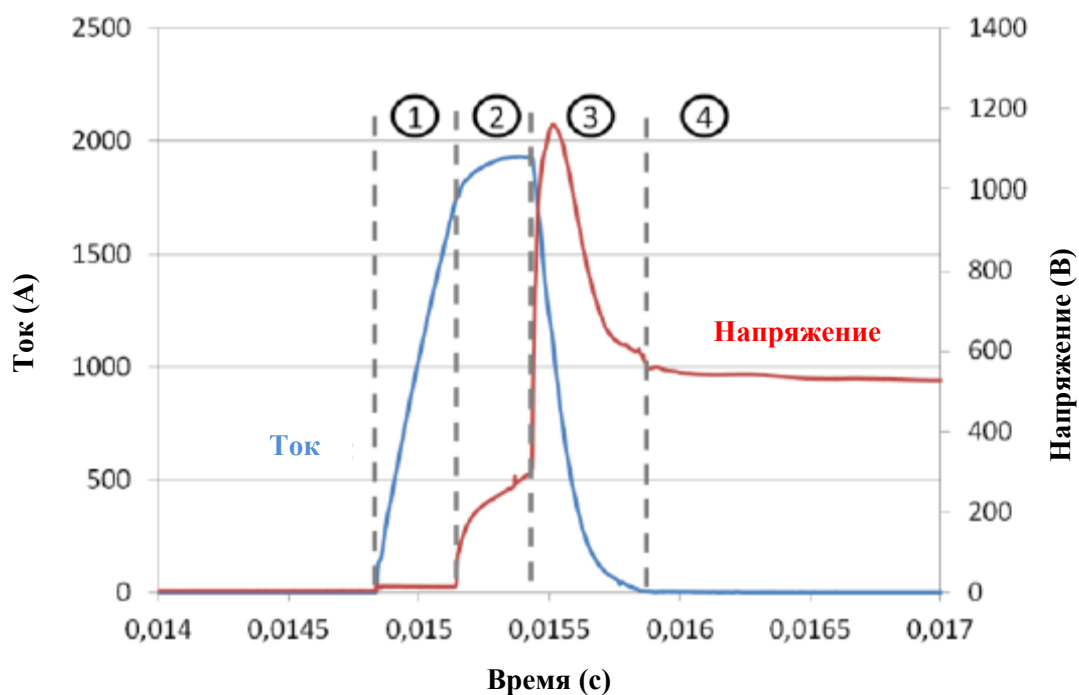


Рисунок 10: Кривые тока и напряжения во время отключения

Преимущество системы состоит в ограничении тока КЗ, который никогда не достигнет максимального значения. Более того, данное решение полностью автономно.



Рисунок 11: Самосрабатывающий пирозлектрический предохранитель – ХрST

На рисунке 11 представлен самосрабатывающий пирозлектрический предохранитель, который был разработан в компании «MERSEN». Высота системы всего 70 мм, длина – 135 мм, а ширина – 65 мм.

В автомобильной сфере применения пироэлектрический предохранитель и самосрабатывающий пироэлектрический предохранитель имеют много преимуществ:

- Соответствие требованиям систем транспортировки на постоянном токе
- Наиболее подходящее время отключения сильного тока и тока КЗ
- Отличные показатели цикличности: характеристики загрузки в ЭМ становятся более сложными. Показатели цикличности пироэлектрического предохранителя не зависят от характеристик загрузки, что упрощает конструкцию.
- Очень низкие потери на диэлектрическую проводимость
- Низкие среднерыночные цены

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном документе представлено новое устройство защиты от сверхтоков для сфер применения постоянного тока. Токопроводящий канал пироэлектрического выключателя и канал отключения КЗ предохранителя раскрывают лучшие характеристики в двух продуктах, то есть падение низкого напряжения, бросок сильного тока при включении, характеристики цикличности, быстрое перерезание шины. Более того, предохранитель демонстрирует отличную способность размыкать цепь сильного постоянного тока. Учитывая специфику последней сферы применения, эти два устройства демонстрируют наилучшие характеристики для сфер применения низковольтного постоянного тока до 1500 В постоянного тока, таких как энергосистема, электромобили, фотоэлектрические установки и системы распределения постоянного тока.

VI. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Hesla, E., Brusso, B., Downey, L., Giese, B., Parise, G., Valdes, M., ... & Sutherland, P. (2013, April). DC task team report. In *Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf (I&CPS), 2013 IEEE/IAS 49th* (pp. 1-9). IEEE
- [2] Greenberg, A., Hamilton, J., Maltz, D. A., & Patel, P. (2008). The cost of a cloud: research problems in data center networks. *ACM SIGCOMM computer communication review*, 39(1), 68-73.
- [3] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1045–1053, Jul. 2009.

- [4] Wunder, B., Ott, L., Szpek, M., Boeke, U., & Weis, R. (2014, September). Energy efficient DC-grids for commercial buildings. In *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014 IEEE 36th International* (pp. 1-8). IEEE.
- [5] Roboam, X. (2011, June). New trends and challenges of electrical networks embedded in “more electrical aircraft”. In *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on* (pp. 26-31). IEEE.
- [6] Ferraz NT Pyro 600 10/86
- [7] Banes, A. J. (1984). *U.S. Patent No. 4,479,105*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [8] Simonsen, B. P. (1980). *U.S. Patent No. 4,224,487*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [9] Krappel, A., Albiez, R., & Groebmair, M. (1999). *U.S. Patent No. 5,877,563*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [10] Dou, Z., Richardeau, F., Sarraute, E., Bley, V., Blaquiere, J. M., Vella, C., & Gonthier, G. (2012). PCB dual-switch fuse with energetic materials embedded: Application for new fail-safe and fault-tolerant converters. *Microelectronics Reliability*, 52(9), 2457-2464.
- [11] Gelet, J. L. (2007, September). To the origins of fuses. In *Electric Fuses and their Applications, 2007. ICEFA 2007. 8th International Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
- [12] Ouaida, R., Berthou, M., Tournier, D., & Depalma, J. F. (2015, June). State of art of current and future technologies in current limiting devices. In *DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on* (pp. 175-180). IEEE.