

Самовосстанавливающиеся предохранители ESE

Самовосстанавливающиеся предохранители являются популярным инструментом защиты от перегрузок по току. Однако при выборе подходящей модели следует учитывать специфику ее эксплуатации. В статье рассматриваются основные характеристики и особенности использования самовосстанавливающихся предохранителей на примере продукции компании ESE.

Вячеслав Гавриков

Самовосстанавливающиеся предохранители представляют собой элементы многофазового действия, предназначенные для защиты от перегрузок по току. В зарубежной литературе их называют resettable fuse, или PPTC (Polymeric positive temperature coefficient device), что буквально переводится как «полимерные устройства с положительным температурным коэффициентом». Это сложное название подчеркивает, что механизм работы самовосстанавливающихся предохранителей основан на применении сильной температурной зависимости.

В настоящий момент на рынке присутствует несколько крупных производителей самовосстанавливающихся предохранителей. При этом почти у каждого из них есть собственное запатентованное наименование: Polyfuse (Littelfuse), PolySwitch (TE Connectivity), Semifuse (ATC Semitec), Fuzetec (Fuzetec Technology), Multifuse (Bourns, Inc.). Впрочем, несмотря на звучные названия, принцип работы всех этих компонентов остается одинаковым.

В отличие от обычных плавких предохранителей PPTC способны восстанавливаться после возникновения КЗ и использоваться повторно. Вместе с тем из-за некоторых особенностей эксплуатации их нельзя назвать идеальным устройством защиты от перегрузок по току.

В статье описаны физические основы работы самовосстанавливающихся предохранителей, их основные характеристики и особенности эксплуатации. Для большей наглядности при анализе параметров PPTC приводятся конкретные примеры из номен-

клатуры компании ESE (рис. 1), а также выполняется сравнение с показателями обычных плавких предохранителей.

Устройство и принцип работы самовосстанавливающихся предохранителей

Рассмотрим упрощенную структуру самовосстанавливающегося предохранителя (рис. 2). Конструктивно PPTC состоит из двух электродов, между которыми помещен проводящий графитовый слой с вкраплениями гранул непроводящего полимерного материала. В качестве полимерного материала, как правило, используется полиэтилен.

При низких температурах полимер находится в компактном кристаллическом состоянии. Между электродами присутствуют сплошные графитовые проводящие каналы. В результате сопротивление самовосстанавливающегося предохранителя оказывается низким (рис. 2, точка 1).

При увеличении температуры, например вследствие нарастания тока через PPTC, наблюдается незначительный рост сопротивления, вызванный тепловыми процессами (рис. 2, точка 2).

При дальнейшем росте тока и разогреве структуры PPTC температура может подняться до граничного значения, при котором полимер начинает переходить из кристаллического состояния в аморфное. Этот переход сопровождается значительным расширением. В результате графитовые каналы разрываются, а сопротивление увеличивается (рис. 2, точка 3). Процесс имеет скачкообразный характер, то есть даже при незначительном превышении граничной температуры наблюдается резкое возрастание сопротивления самовосстанавливающегося предохранителя.

Рост сопротивления приводит к ограничению тока. При этом если аварийное воздействие не прекращается (на выводах сохраняется высокое напряжение), то PPTC продолжает рассеивать значительную мощность и остается в разогретом высокоомном состоянии (рис. 2, точка 4).

После устранения аварии PPTC остывает и возвращается в исходное проводящее состояние.

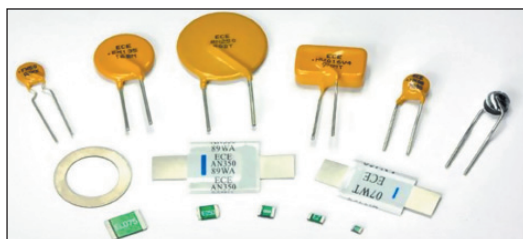


Рис. 1. Самовосстанавливающиеся предохранители от компании ESE [1]

Таким образом, самовосстанавливающиеся предохранители, по сути, срабатывают не из-за превышения тока, а из-за превышения температуры при саморазогреве. Эта важная особенность приводит к сильной зависимости времени и тока срабатывания от внешних условий. Данные вопросы будут рассмотрены отдельно.

Основные характеристики самовосстанавливающихся предохранителей

Рассмотрим основные характеристики самовосстанавливающихся предохранителей [1].

Ток удержания (Hold current, I_H) — максимальный ток, при котором PPTC гарантированно не переходит в высокоомное состояние при заданной температуре. Как правило, производители указывают значение тока удержания для конкретной температуры, обычно в диапазоне +23...+25 °C. В частности, в документации компании ESE ток удержания и другие параметры приведены для температуры +23 °C.

Ток срабатывания (Trip current, I_T) — максимальный ток, при котором PPTC гарантированно переходит в высокоомное состояние при заданной температуре окружающей среды.

Максимальное напряжение (Maximum voltage, V_{MAX}) — максимальное напряжение, которое способен выдерживать самовосстанавливающийся предохранитель при протекании максимального тока I_{MAX} .

Максимальный ток (Maximum fault current, I_{MAX}) — максимальный ток, который способен пропускать самовосстанавливающийся предохранитель без разрушения при приложении максимального напряжения.

Мощность рассеивания (P_d) — мощность, рассеиваемая предохранителем в высокоомном состоянии при заданной температуре окружающей среды.

Минимальное начальное сопротивление (R_{min}) — минимальное начальное сопротивление PPTC в проводящем состоянии при заданной температуре окружающей среды.

Максимальное сопротивление после восстановления ($R_{I_{max}}$) — максимальное сопротивление PPTC после восстановления в течение 1 ч при заданной температуре окружающего воздуха.

Максимальное время срабатывания (Maximum time to trip) — время от возникновения аварийной ситуации до момента перехода PPTC в высокоомное состояние. Данная характеристика сильно зависит от тока.

Выбор самовосстанавливающегося предохранителя также зависит от диапазона рабочих температур, типа монтажа и целевой области применения. Для большей ясности обратимся к конкретным примерам из номенклатуры компании ESE.

Обзор самовосстанавливающихся предохранителей от компании ESE

Для обзора параметров самовосстанавливающихся предохранителей была выбрана тайваньская компания ESE. Данный про-

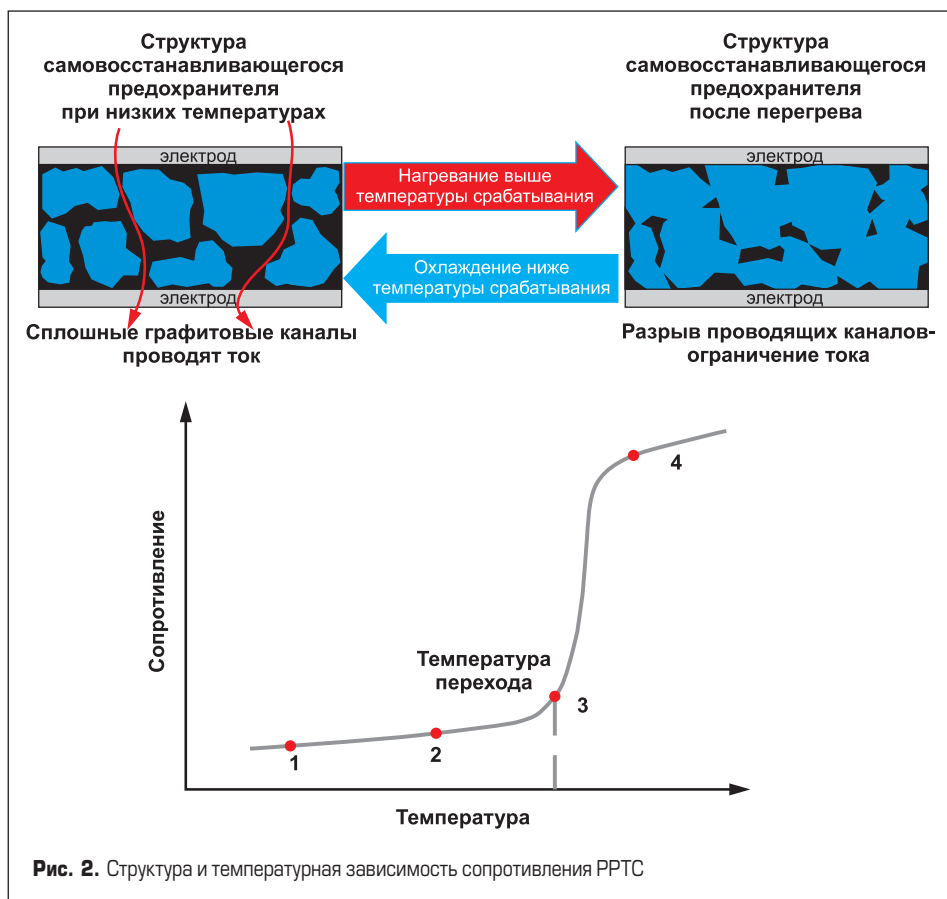


Рис. 2. Структура и температурная зависимость сопротивления PPTC

изводитель обеспечивает высокое качество продукции и в то же время предлагает более привлекательные цены по сравнению с раскрученными брендами. ESE специализируется на производстве электромеханических и электронных компонентов: выключателей, реле, разъемов, клеммников, индуктивностей и дросселей, самовосстанавливающихся предохранителей.

Номенклатура самовосстанавливающихся предохранителей от ESE содержит 31 серию (табл. 1):

- с различными корпусными исполнениями: с радиальными выводами, с аксиальными выводами для поверхностного SMD-монтажа;
- с рабочими напряжениями до 600 В (DC) и до 240 В (AC);

Таблица 1. Серии самовосстанавливающихся предохранителей от ESE

Серия	Тип корпуса	Рейтинг напряжения	Диапазон токов удержания, А		
ERFRA	С радиальными выводами	60 В DC	0,05–3,75		
ERFRN		90 В DC	0,1–3,75		
ERFRB		30 В DC	0,9–9		
ERFBX		16/30 В DC	0,75–2,5		
ERFBU		60/250/600 В DC	16 В DC	0,08–0,18	
ERFHX					
ERFHU					
ERFRG					
ERFFX					
ERFFU					
ERFFL					
ERFLU		240 В AC/DC	0,05–2		
ERFLX		С аксиальными выводами	120 В AC/DC	0,1–3,75	
ERFEX					
ERFEU					
ERFFT	36 В DC				0,5–2,5
ERFAN	15/30 В DC				1,2–4,2
ERFLN	15/20 В DC				1,9–7,3
ERFTN	24 В DC				0,7–3,4
ERFAD	по запросу				по запросу
ERFRLN	6 В DC				1,4–4,5
ERFSL	SMD 2920				6–60 В DC
ERFSD	SMD 1812	0,1–3			
ERFSM	SMD 1210	0,05–2			
ERFSN	SMD 1206	0,05–2			
ERFSR	SMD 0805	6–15 В DC	0,1–1		
ERFSS	SMD 0603	9–15 В DC	0,05–0,2		
ERFRSD	SMD 1812	6 В DC	1,4–3,7		
ERFRSM	SMD 1210		1,75–3,5		
ERFRSN	SMD 1206		0,5–2		
ERFRSR	SMD 0805		0,75–1,5		
ERFRSS	SMD 0603		6–9 В DC	0,25–0,75	

Таблица 2. Характеристики самовосстанавливающихся предохранителей ERFRA

Наименование	Ток удержания I_H , А	Ток срабатывания I_T , А	Максимальное время срабатывания при токе $5 \times I_H$, с	Максимальный ток $I_{МАХ}$, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная мощность (тип.), Вт	Сопротивление, Ом	
RA005-60	0,05	0,1	5	40	60	0,26	7,3	20
RA010-60	0,1	0,2	4			0,38	2,5	7,5
RA017-60	0,17	0,34	3			0,48	2	7
RA020-60	0,2	0,4	2,2			0,41	1,83	4,4
RA025-60	0,25	0,5	2,5			0,45	1,25	3
RA030-60	0,3	0,6	3			0,49	0,88	2,1
RA040-60	0,4	0,8	3,8			0,56	0,55	1,29
RA050-60	0,5	1	4			0,77	0,5	1,17
RA065-60	0,65	1,3	5,3			0,88	0,31	0,72
RA075-60	0,75	1,5	6,3			0,92	0,25	0,6
RA090-60	0,9	1,8	7,2			0,99	0,2	0,47
RA110-60	1,1	2,2	8,2			1,5	0,15	0,38
RA135-60	1,35	2,7	9,6			1,7	0,12	0,3
RA160-60	1,6	3,2	11,4			1,9	0,09	0,22
RA185-60	1,85	3,7	12,6			2,1	0,08	0,19
RA250-60	2,5	5	15,6			2,5	0,05	0,13
RA300-60	3	6	19,8			2,8	0,04	0,1
RA375-60	3,75	7,5	24			3,2	0,03	0,08

- с максимальным током срабатывания 50 мА — 15 А;
- со стандартным диапазоном рабочих температур $-40...+85$ °С.

Такое многообразие как нельзя лучше демонстрирует возможность современных PPTC. Рассмотрим подробнее некоторые популярные серии.

ERFRA — серия популярных самовосстанавливающихся предохранителей с радиальными выводами и рабочим напряжением 60 В, объединяет почти два десятка моделей с током срабатывания 0,05–3,75 А и максимальным током 40 А (табл. 2).

Целевыми приложениями для предохранителей ERFRA являются компьютеры и оргтехника, системы сигнализации, громкоговорители, автомобильные приложения и многое другое.

ERFRB — еще одна серия предохранителей с радиальными выводами. В отличие от серии ERFRA данные PPTC имеют вдвое меньшее

напряжение (30 В), зато обладают увеличенным током срабатывания до 9 А. В остальном характеристики и области применения серий схожи между собой.

ERFHU — серия PPTC с радиальными выводами и рекордным значением рабочего напряжения до 600 В DC. Эти предохранители находят применение в высоковольтном оборудовании, спутниковых приемниках, телекоммуникационных системах.

ERFSD — серия популярных самовосстанавливающихся предохранителей для поверхностного монтажа на печатную плату. Все представители серии имеют одинаковое корпусное исполнение 1812 (4,5×3,2 мм) и отличаются рабочим напряжением 6–60 В. Ток срабатывания для них составляет 0,1–3,0 А. Стоит отметить, что практически все модели PPTC серии ERFSD способны выдерживать импульсы тока до 100 А. Это огромное преимущество, например, для автомобильных приложений.

Самовосстанавливающиеся предохранители ERFSD также предназначены для широкого спектра приложений, начиная от компьютеров и заканчивая бытовой техникой.

ERFSM — еще одна серия самовосстанавливающихся предохранителей для поверхностного монтажа. Компактные габариты 3,2×2,6 мм, позволяют применять их даже при высокой плотности расположения компонентов и минимальном свободном месте на ПП. Расплатой за малые размеры становится снижение токов срабатывания по сравнению с серией ERFSD. Впрочем, области применения обеих серий совпадают.

Серия ERFSD объединяет 11 моделей с током ограничения 0,05–2 А и рабочими напряжениями до 60 В (табл. 3).

Как видно из обзора номенклатуры компании ECE, в настоящий момент к услугам разработчиков внушительный арсенал защитных элементов с широким диапазоном токов, напряжений и корпусных ис-

Таблица 3. Характеристики самовосстанавливающихся предохранителей ERFSD

Наименование	Ток удержания I_H , А	Ток срабатывания I_T , А	Время срабатывания, с	Максимальный ток $I_{МАХ}$, А	Рейтинг напряжения, В	Максимальная мощность (тип.), Вт	Сопротивление, Ом	
SM005-60	0,05	0,15	1,5 (0,25 А)	10	60	0,6	3,6	50
SM010-60	0,1	0,25	1,5 (0,5 А)		30		1,6	15
SM020-30	0,2	0,4	0,02 (8 А)		16		0,8	5
SM035-16	0,35	0,7	0,2 (8 А)	40	8		0,32	1,3
SM050-16	0,5	1	0,1 (8 А)		24		0,25	0,9
SM075-08	0,75	1,5			0,13		0,4	
SM110-06	1,1	2,2	0,3 (8 А)	100	6	0,8	0,06	0,21
SM150-06	1,5	3	0,5 (8 А)				0,04	0,11
SM175-06	1,75	4	0,6 (8 А)				0,02	0,08
SM200-06	2		1 (8 А)				0,015	0,007

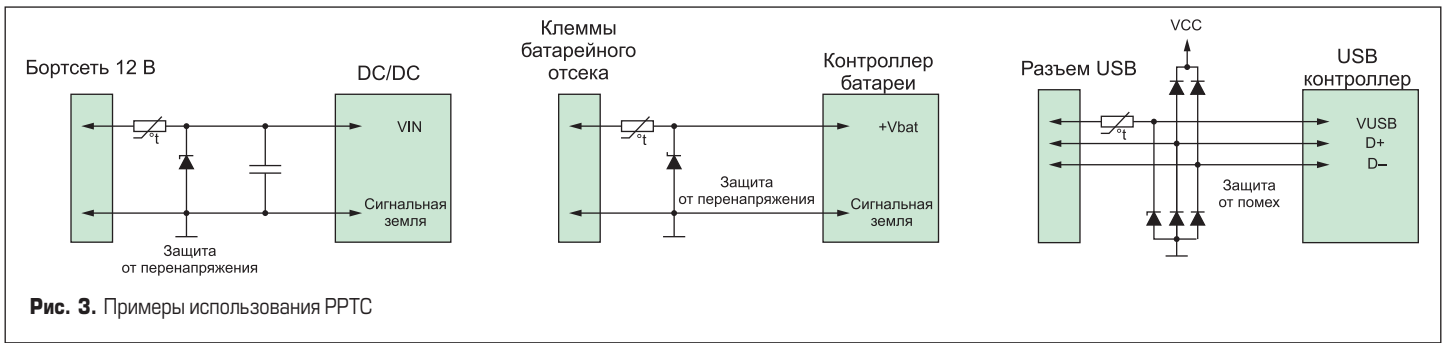


Рис. 3. Примеры использования PPTC

полнений. Вместе с тем PPTC не способны полностью вытеснить обычные плавкие предохранители. Причины кроются в принципиальных отличиях между этими компонентами.

Отличия между PPTC и плавкими предохранителями. Области применения PPTC

Обычные плавкие предохранители являются защитными элементами одноразового действия, в то время как PPTC могут использоваться многократно. Впрочем, это лишь одно из нескольких принципиальных различий (табл. 4).

После срабатывания плавкий предохранитель должен быть заменен. С одной стороны, это недостаток, так как для замены требуется человек. А с другой — защищаемая цепь надежно изолируется от источника аварии. В то же время PPTC после срабатывания не требует замены и сам восстанавливается после устранения аварии и остывания. Однако нужно понимать, что цепь не изолируется от источника аварии полностью и это может привести к негативным последствиям. Например, если в момент нахождения PPTC в высокоомном состоянии в цепи происходит мощный выброс напряжения, то пробой PPTC оставит цепь без защиты от КЗ.

Говоря о пробое, следует отметить относительно низкое рабочее напряжение самовосстанавливающихся предохранителей, в то время как для обычных плавких предохранителей рейтинг напряжения может быть очень высоким.

Так как при срабатывании самовосстанавливающегося предохранителя цепь физически не разрывается, а сопротивление PPTC является конечным, это приводит к возникновению токов утечки, что также не всегда допустимо.

Диапазон рабочих токов для плавких предохранителей оказывается очень широким и достигает сотен ампер, в то время как PPTC работают с меньшей нагрузкой от десятков миллиампер до единиц ампер.

Диапазон рабочих температур для PPTC, как правило, составляет $-40...+85^{\circ}\text{C}$. Это ограничивает их применение в различных автомобильных и промышленных приложениях.

Еще одним большим недостатком PPTC считается сильная температурная зависимость основных характеристик (токов и времени срабатывания). Подробнее эта особенность будет описана в следующем разделе.

Таким образом, PPTC не всегда способны заменить плавкие предохранители. Поэтому и те и другие остаются в арсенале разработчиков электроники. Плавкие предохранители обычно применяются в случаях, когда требуется гарантированный разрыв электрической цепи при возникновении КЗ в широком диапазоне температур. PPTC предпочтительны в устройствах, в которых большое значение имеют габариты и возможность многократного использования без необходимости ремонта.

PPTC применяют в цепях питания электронной аппаратуры, для защиты аккумуляторов и батарей, для защиты стандартных интерфейсов (Ethernet, USB1.1 и USB2.0, IEEE 1394 FireWire), в автомобильных приложениях и т. д. (рис. 3).

Особенности применения PPTC

При использовании PPTC необходимо помнить о некоторых особенностях их эксплуатации.

Зависимость тока срабатывания от температуры окружающей среды

Как уже отмечалось выше, PPTC, как и обычные плавкие предохранители, на самом деле срабатывают не из-за перегрузки по току, а из-за перегрева, вызванного увеличением рассеиваемой мощности. Таким образом, температура окружающей среды и качество теплоотвода оказывают сильное влияние на характеристики PPTC.

При увеличении температуры окружающей среды потребуется меньшая мощность для разогрева непроводящего полимера PPTC

до температуры перехода. То есть с ростом температуры ток срабатывания быстро уменьшается.

Обычные плавкие предохранители также страдают от этого недостатка, но у PPTC зависимость оказывается значительно сильнее. На рис. 4 приведены температурные зависимости номинального тока срабатывания для популярных серий самовосстанавливающихся предохранителей ESE. На этом же графике изображена температурная зависимость стандартных автомобильных предохранителей АТО от компании Littelfuse. Как говорится, разница налицо. Если для плавких предохранителей уменьшение тока срабатывания в диапазоне $-40...+85^{\circ}\text{C}$ составляет около 20%, то для PPTC оно может достигать 130%!

Зависимость времени срабатывания от тока

Разогрев структуры самовосстанавливающегося предохранителя имеет инерционный характер и зависит от величины протекающего тока. Чем выше ток, тем быстрее срабатывает PPTC.

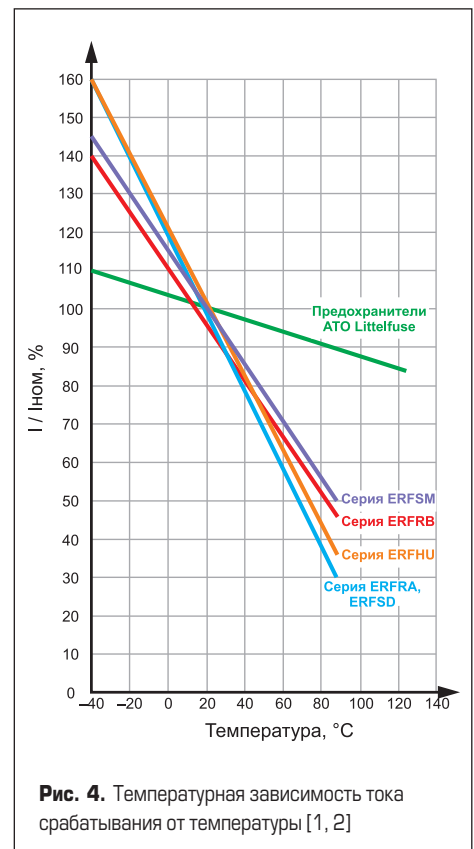


Рис. 4. Температурная зависимость тока срабатывания от температуры [1, 2]

Таблица 4. Качественное сравнение плавких предохранителей и PPTC

Параметр	Плавкий предохранитель	Самовосстанавливающийся предохранитель
Число использований	однократное	многократное
Принцип защиты	полный разрыв цепи	ограничение тока
Токи утечки после срабатывания	отсутствуют	до сотен мА
Ток срабатывания	единицы — десятки ампер	десятки миллиампер — единицы ампер
Максимальное напряжение	тысячи вольт	сотни вольт
Максимальная рабочая температура, °C	до +125	до +85
Температурная зависимость	слабая	сильная

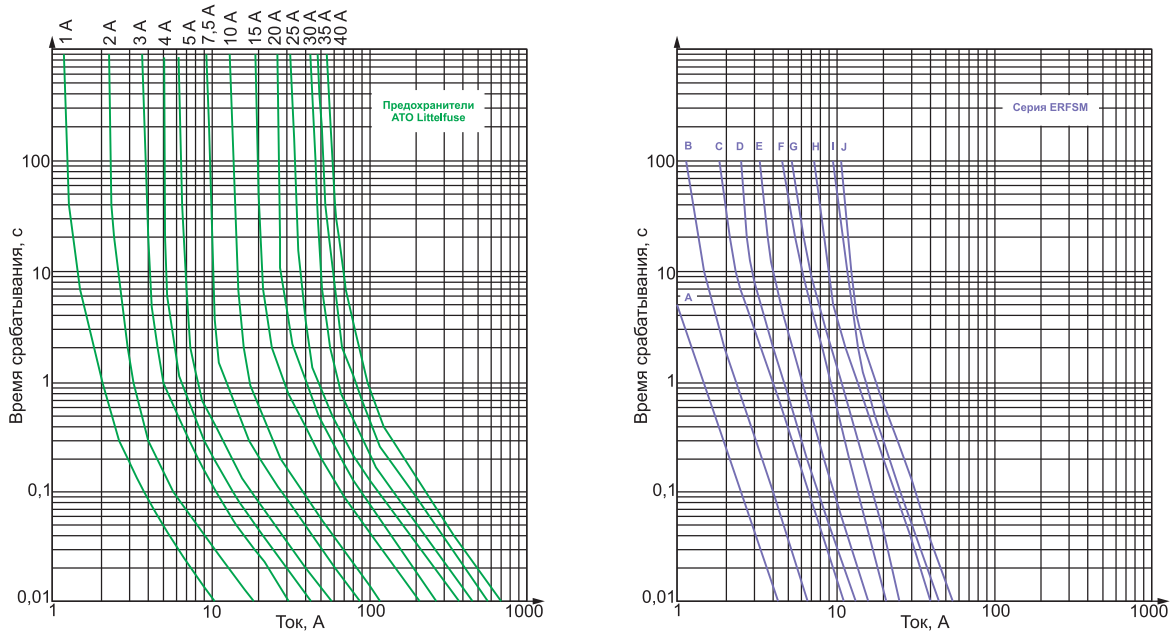


Рис. 5. Температурная зависимость времени срабатывания от тока [1, 2]

Здесь опять стоит отметить, что обычные предохранители также страдают от этого эффекта. Для сравнения на рис. 5 приведены зависимости для серии ERFSM и стандартных автомобильных предохранителей ATO от компании Littelfuse.

Зависимость тока срабатывания от качества теплоотвода

Как правило, плавкие предохранители устанавливаются в держатели, тем самым получая дополнительную теплоизоляцию. Напротив, PPTC расплавляются на печатной плате, которая становится своего рода радиатором. Это особенно критично для самовосстанавливающихся предохранителей для поверхностного монтажа. Плата с массивными медными полигонами способна значительно повлиять на величину тока срабатывания и на скорость срабатывания PPTC. Эту особенность также следует учитывать.

PPTC могут требовать внешней защиты от перенапряжений и КЗ

Несмотря на то, что самовосстанавливающиеся предохранители используются для защиты от перегрузки по току, им самим может потребоваться защита от КЗ. Как было сказано выше, одним из параметров PPTC является максимальный ток I_{MAX} . При его превышении предохранитель попросту разрушается вследствие необратимых термических процессов.

Эта проблема не критична, если источник тока (например, батарейка) не способен выдать ток более I_{MAX} . В противном случае для защиты следует выбрать другую модель PPTC или использовать дополнительный системный плавкий предохранитель.

Также самовосстанавливающиеся предохранители имеют вполне конкретные ограничения по уровню рабочего напряжения. Если существует угроза перенапряжений, обычно

устанавливают дополнительные шунтирующие или TVS-диоды (рис. 3).

Деградация

При рассмотрении основных параметров PPTC были приведены два значения сопротивлений: R_{min} и R_{1max} . При этом R_{1max} всегда оказывается больше. Это неспроста. Дело в том, что после остывания PPTC его сопротивление никогда не возвращается к исходному значению R_{min} , даже если время восстановления достигает нескольких дней или месяцев (рис. 6).

Это явление напоминает деградацию — необратимое ухудшение характеристик после срабатывания. В итоге, хотя PPTC и является инструментом защиты многократного использования, качество его работы ухудшается с течением времени. Об этом нужно помнить.

Заключение

Самовосстанавливающиеся предохранители, или PPTC, являются привлекательной альтернативой обычным плавким предохранителям в широком спектре приложений. Вместе с тем при использовании PPTC следует учитывать их невысокую температурную стабильность, чувствительность к перенапряжениям и деградацию свойств при срабатываниях.

Компания ECE предлагает богатый выбор недорогих самовосстанавливающихся предохранителей, которые могут применяться в промышленном и лабораторном оборудовании, в устройствах с аккумуляторным питанием, компьютерной оргтехнике, стандартных интерфейсах (Ethernet, USB1.1 и USB2.0, IEEE 1394 FireWire), в автомобильных приложениях и других областях.

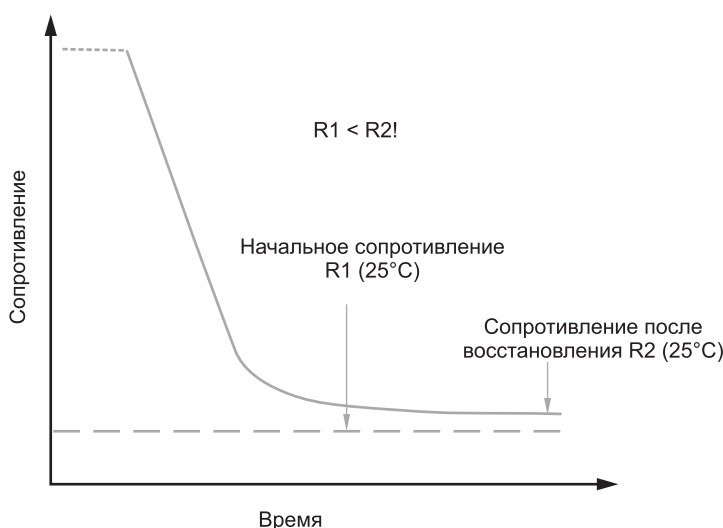


Рис. 6. Изменение сопротивления PPTC при остывании

Литература

1. www.ece.com.tw
2. www.littelfuse.com