

Самовосстанавливающиеся предохранители PolySwitch

от Littelfuse: простое и надежное решение сложных проблем

Предохранители — это незаменимые компоненты самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), которые, принимая удар на себя и порой жертвуя собой, спасают ее от бросков напряжения и сопровождающего их резкого увеличения тока. Предохранитель в виде плавкой вставки был запатентован Томасом Эдисоном в 1890 году как часть его системы распределения электроэнергии и долгое время был единственным. Интересующие нас в рамках настоящей статьи полимерные самовосстанавливающиеся предохранители появились только 1980-х годах. Их преимущество следует уже из самого названия — после срабатывания при устранении перегрузки в цепи они возвращаются в исходное «незаметное» состояние. Не заменяя плавких предохранителей, самовосстанавливающиеся предохранители решают свой комплекс задач.

Владимир Рентюк

Rvk.modul@gmail.com

Сергей Плишкин

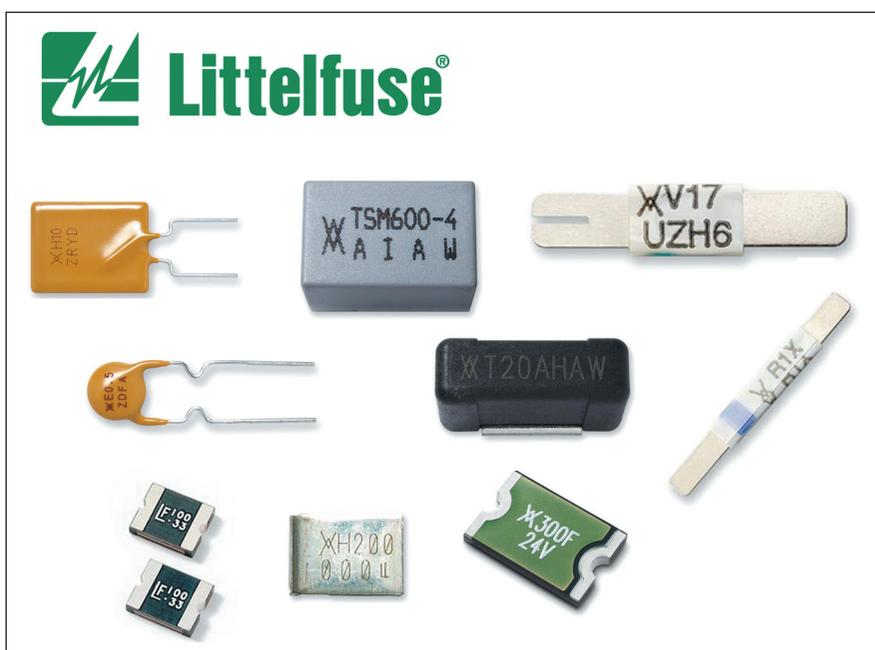
sergey.plishkin@eltech.spb.ru

Введение, немного истории

Если верить источникам в Интернете, в том числе и «Википедии», то самый первый полимерный самовосстанавливающийся предохранитель PolySwitch был изобретен специалистами компании Raychem Corporation в 1979 году и представлен на рынок в начале 1980-х. Однако все это неверно: полимерный самовосстанавливающийся предохранитель был впервые создан Джеральдом Пирсоном (Gerald L. Pearson) еще в 1939 году в Bell Labs (патент США US2258958A)

и с тех пор его много раз изобретали заново. Для того чтобы понять, что именно патентовали изобретатели, обратимся к цитате из патента: «Нерегулируемые резисторы в виде одного или нескольких слоев, или покрытий. Нерегулируемые резисторы из порошкового проводящего материала или порошкового полупроводящего материала с изоляционным материалом с положительным температурным коэффициентом или без него, состоящие из проводящего или полупроводящего материала, диспергированного в непроводящем органическом материале» [1].

То, что, по версии «Википедии» (и англоязычной тоже), изобрели в 1979-м специалисты компании Raychem Corporation и представили миру в своем патенте как PolySwitch, был не предохранитель, а именно полимерный выключатель (отсюда и Poly — полимерный, и Switch — выключатель), который к тому времени уже продавался ими на рынке и предназначался он не для защиты от бросков тока, а для регулирования температуры нагревателя. Так что же именно запатентовали Lee M. Middleman, Roger S. Goodrich из компании Raychem Corporation? Приведем цитату из патента US4276466A (приоритет от 1979-05-11): «Наиболее предпочтительным устройством защиты цепи является устройство ограничения температуры PolySwitch модели № TLD-01-AA150W, продаваемое Raychem Corporation из г. Менло-Парк, Калифорния. Такое устройство демонстрирует резкое увеличение dR/dT (изменение сопротивления при изменении температуры) примерно от +75 °C. Сопротивление устройства TLD-01-AA150W при +50 °C составляет примерно 0,2 Ом, при +75 °C — около 1 Ом, при +100 °C — около 15 Ом, а при +125 °C — около 200 000 Ом» [2].



И еще долго PolySwitch, формально выпущенный из лаборатории компании Bell в далеком 1939 году, выполнял роль не предохранителя, интересующего нас в рамках данной статьи, а регулятора температуры от Raychem Corporation. Кроме того, владельцем упомянутого патента является не только компания Raychem Corporation, но и фирма Littelfuse, которой с 1979 года (это дата первого применения) принадлежит еще и торговая марка POLYSWITCH, а с 2005-го — и POLYFUSE тоже.

Для того чтобы поставить точки на «i» в этом историческом казусе, на рис. 1 представлены страницы из упомянутых патентов. Поиск автора первого полимерного именно предохранителя оставим за кадром и перейдем к основной теме статьи.

Сегодня самовосстанавливающиеся предохранители представлены разными компаниями под различными торговыми марками, а под маркой PolySwitch эти устройства предлагаются и компанией Littelfuse и TE Connectivity, нынешним владельцем Raychem Corporation и всего ее наследства.

Что же представляют собой полимерные самовосстанавливающиеся предохранители?

PolySwitch (далее будем называть их так) хотя и предохранитель, но не совсем тот, который нам привычен как предохранитель. В технической литературе и Интернете полимерные предохранители этого типа иногда представляют как термисторы, что некорректно. В термисторах имеются полупроводники и, для того чтобы варьировать их сопротивление, используется эффект изменения подвижности носителей заряда. PolySwitch (Polyfuse и т. п.) — это в значительной степени механическое устройство, и о его тонкостях мы и поговорим ниже.

Интересующие нас устройства представляют собой полимерный резистор с положительным температурным коэффициентом, отсюда и еще одно их название — Polymeric Positive Temperature Coefficient (PPTC). Назначение этих устройств — защита РЭА от опасного повышения тока (втекающего и вытекающего) и, как следствие, от перегрева тех или иных ее каскадов и выхода из строя элементов, о чем мы кратко поговорим в отдельном разделе.

PolySwitch, как Resettable fuse — это предохранитель (fuse) в общем понимании, но его особенность отражена уже в самом названии типа устройства — «самовосстанавливающийся» (Resettable — буквально «с перезапуском»). Именно эта способность восстанавливаться после устранения неисправности или при отключении питания от схемы и является его фишкой. Использование такого неперегорающего устройства помогает облегчить настройку изделия на заводе-изготовителе, где случайное замыкание цепи становится довольно частым явлением, а также снизить затраты на гарантийное обслуживание, обслуживание и ремонт конечного продукта при случайных

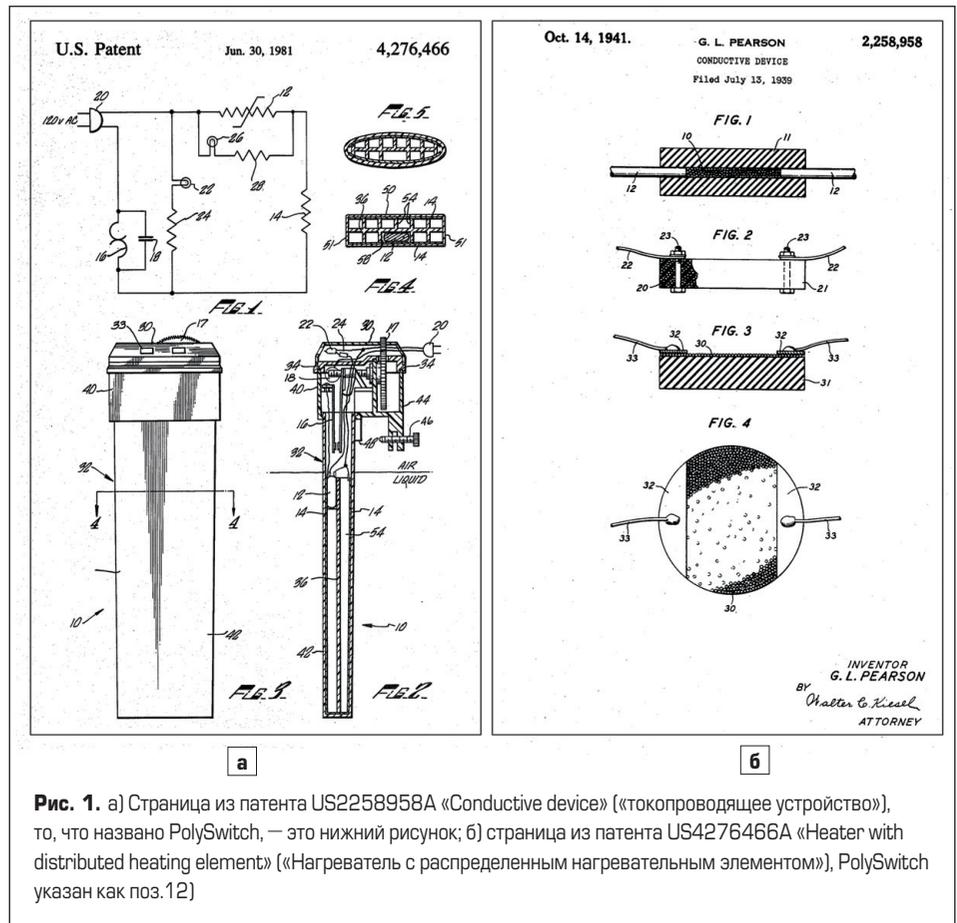


Рис. 1. а) Страница из патента US2258958A «Conductive device» («токопроводящее устройство»), то, что названо PolySwitch, — это нижний рисунок; б) страница из патента US4276466A «Heater with distributed heating element» («Нагреватель с распределенным нагревательным элементом»), PolySwitch указан как поз. 12]

бросках напряжения или совокупности событий, которая хотя и маловероятна, но является критической.

Что же такое предохранители PolySwitch? Они, как и было написано еще в патенте от Bell, изготовлены из композита в виде полукристаллического, не проводящего ток полимера, смешанного с техническим углеродом, который представляет собой высокодисперсный аморфный продукт с характерным фиксированным набором свойств. Принцип действия данного устройства показан на рис. 2 [3].

При нормальной температуре частицы углерода образуют в полимере цепи с низким сопротивлением, но при увеличении тока картина меняется и поведение цепи становится тесно связанным с ее нагревом. Согласно закону Джоуля — Ленца, который в интегральной форме для тонких проводников звучит следующим образом: количество теплоты Q , которое выделяется в единицу времени t в рассматриваемом участке цепи, определяется как произведение квадрата силы тока I на сопротивление участка R , то есть $Q = I^2 R t$. Соответственно, увеличение тока приводит к повышению температуры цепи, имеющей сопротивление. Если температура композитной структуры предохранителя поднимается выше температуры переключения T_{sw} , то кристаллиты в полимере плавятся и переходят в аморфное состояние. Увеличение объема во время плавления кристаллической фазы разделяет токопроводящие частицы, что приводит к значительному нелинейному, почти скачкообразному увеличению сопротивления устройства.

Предохранитель включается последовательно между источником напряжения и нагрузкой и при нормальной работе имеет сопротивление намного ниже, чем остальная часть цепи (нагрузка). В ответ на перегрузку по току сопротивление устройства увеличивается («срабатывает»), снижая ток в цепи до значения, которое выбирается так, чтобы он не вывел из строя элементы схемы и сам предохранитель.

С точки зрения физики работа устройства PolySwitch основана на общем балансе энергии (именно поэтому в патенте от Raychem Corporation оно использовалось для регулирования температуры) и основана не только на классическом $I^2 R$, а на общем энергетическом балансе, описываемом следующим уравнением [4], о чем некоторые разработчики РЭА забывают, а зря:

$$m C_p (\Delta T, \Delta t) = I^2 R - U(T - T_A), \quad (1)$$

где:

- I — ток, протекающий через устройство;
- R — сопротивление устройства;
- Δt — изменение во времени;
- m — масса устройства;
- C_p — теплоемкость устройства;
- ΔT — изменение температуры устройства;
- T — температура устройства;
- T_A — температура окружающей среды;
- U — общий коэффициент теплопроводности.

В этом уравнении ток, протекающий через устройство, выделяет тепло, равное $I^2 R$. Все или часть этого тепла рассеивается

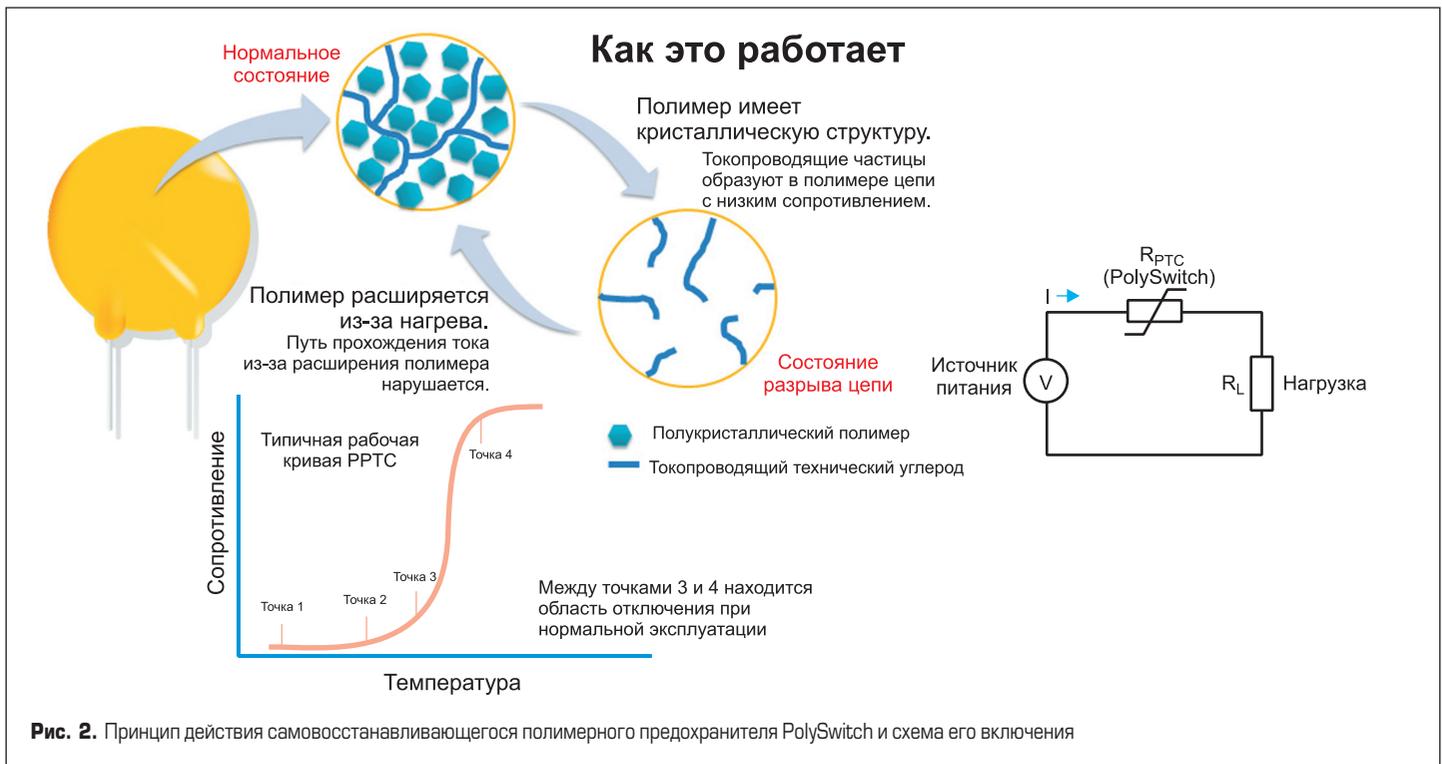


Рис. 2. Принцип действия самовосстанавливающегося полимерного предохранителя PolySwitch и схема его включения

в окружающую среду со скоростью, описываемой выражением $U(T - T_A)$. Любое тепло, не передаваемое в окружающую среду, идет на повышение температуры устройства со скоростью, описываемой выражением: $mC_p(\Delta T/\Delta t)$.

Для того чтобы максимально упростить уравнение (1), предполагается, что внутри устройства равномерная температура. Если тепло, вырабатываемое устройством, и тепло, теряемое для баланса окружающей среды ($\Delta T/\Delta t$), стремится к нулю, то уравнение (1) можно записать как:

$$PR = U(T - T_A). \quad (2)$$

В нормальных условиях эксплуатации тепло, выделяемое устройством, и тепло, теряемое устройством в окружающую среду, нахо-

дятся в равновесии при относительно низкой температуре, например в точке 1 на рис. 2.

Если ток через устройство увеличивается, а температура окружающей среды остается постоянной, тепло, выделяемое устройством, увеличивается, и температура устройства также повышается. Однако если увеличение тока не слишком велико, все выделяемое тепло может быть потеряно в окружающую среду и устройство стабилизируется в соответствии с уравнением (2) при более высокой температуре, такой как точка 2 на рис. 2. Эта точка также может быть достигнута увеличением тока и повышением температуры окружающей среды.

Дальнейшее увеличение тока, температуры окружающей среды или того и другого приведет к тому, что устройство достигнет температуры, при которой его сопротивление

резко увеличится, как это показано в точке 3 на рис. 2.

Любое дальнейшее увеличение тока или температуры окружающей среды вызовет выделение тепла из устройства со скоростью большей, чем скорость рассеивания тепла, что приводит к быстрому нагреву устройства. На этом этапе между точками 3 и 4 на рис. 2 происходит резкое увеличение сопротивления даже при очень небольшом изменении температуры (на графике рис. 2 показано в логарифмическом масштабе). Это нормальная рабочая область для устройства в состоянии разрыва цепи. Такое изменение сопротивления вызывает соответствующее уменьшение тока, протекающего в цепи. Данное соотношение сохраняется до тех пор, пока сопротивление устройства не достигнет верхнего изгиба кривой — точки 4. Пока приложенное напряжение остается на этом уровне, устройство будет находиться в отключенном состоянии.

Поскольку изменение температуры между точками 3 и 4 невелико, член $(T - T_A)$ в уравнении (2) может быть заменен константой $(T_O - T_A)$, где T_O — рабочая температура устройства. Тогда уравнение (1) будет выглядеть так:

$$PR = V^2/R = U(T_O - T_A). \quad (3)$$

Поскольку U , и $(T_O - T_A)$ теперь являются константами, уравнение (3) сводится к $PR = const$, то есть теперь устройство работает в режиме постоянной мощности. Выражение этой постоянной мощности как V^2/R подчеркивает, что в отключенном состоянии сопротивление устройства пропорционально квадрату приложенного напряжения. Это соотношение сохраняется до тех пор, пока сопротивление устройства не достигнет верхнего изгиба кривой — точки 4 на рис. 2.

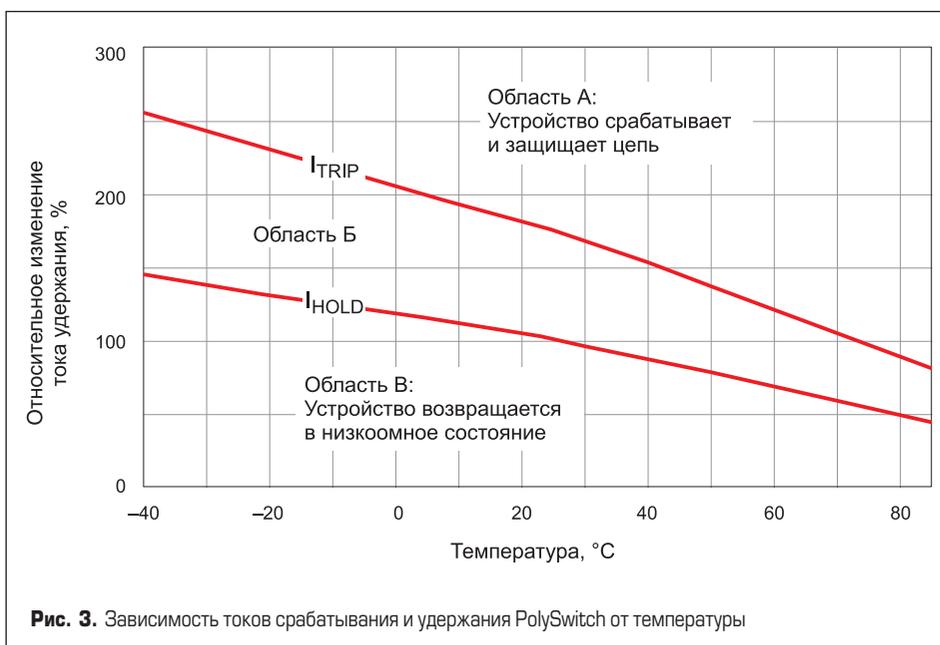


Рис. 3. Зависимость токов срабатывания и удержания PolySwitch от температуры

Для устройства, которое отключилось, пока приложенное напряжение достаточно высоко для результирующей мощности V^2/R настолько, чтобы компенсировать потерю тепла $U(T_O - T_A)$, устройство останется в отключенном состоянии (то есть зафиксированным в защитном состоянии). Когда напряжение понижается до точки, при которой потеря тепла $U(T_O - T_A)$ больше не может поддерживаться, проводимость устройства восстанавливается.

Выбор устройства основывается на требуемом токе удержания и срабатывания. На рис. 3 [4] показана зависимость тока срабатывания и удержания устройств PolySwitch от температуры.

Область А описывает комбинации тока и температуры, при которых устройство PolySwitch сработает (перейдет в состояние высокого сопротивления) и защитит цепь. Область Б описывает комбинации тока и температуры, при которых устройство PolySwitch обеспечивает нормальную работу цепи. В области В устройство может отключиться или оставаться в состоянии низкого сопротивления (в зависимости от сопротивления отдельного устройства). Это же справедливо и в случае повышения температуры окружающей среды выше температуры срабатывания.

Поскольку устройства PolySwitch активируются термически, любое изменение температуры вокруг устройства повлияет на его производительность. По мере увеличения температуры вокруг устройства для отключения требуется меньше энергии, и, следовательно, ток удержания уменьшается. Вот почему кривая I_{TRIP} и кривая I_{HOLD} имеют отрицательный наклон на рис. 3. Кривые температурного снижения характеристик и таблицы зависимости I_{HOLD} от температуры прилагаются к каждому семейству продуктов, чтобы помочь с выбором при проектировании РЭА, работающей в широком диапазоне температур.

И это далеко не все. При выборе PolySwitch необходимо учитывать, что основными эксплуатационными характеристиками полимерных предохранителей являются электрические и временные параметры, а также температурные зависимости. Соответственно, необходимо учитывать не только токи срабатывания и удержания, которые в большинстве случаев оказываются основными, но и температуру среды, ток утечки, максимальный ток, выдерживаемый устройством без разрушения, максимальное напряжение при протекании максимального тока (при этом следует учитывать не только номинальные значения напряжений, но и возможность возникновения помех), мощность рассеивания при переходе в непроводящее состояние при заданной температуре окружающей среды.

Необходимо принимать во внимание, что при восстановлении устройства его сопротивление не принимает исходное зна-

чение, а оказывается выше, кроме того, его сопротивление до монтажа, после монтажа и после восстановления будет различаться. В документации приводится несколько различных параметров сопротивления — это минимальное начальное сопротивление в проводящем состоянии до монтажа на плату, максимальное сопротивление после 1 ч восстановления при заданной температуре окружающей среды. Важной характеристикой является и время срабатывания, то есть время перехода в непроводящее состояние при протекании тока, которое имеет сильную зависимость от величины тока и температуры окружающей среды. Чем больше ток и температура, тем быстрее происходит переход.

Есть еще целый ряд факторов — влияние условий пайки, компоновка устройства на печатной плате (влияние длины выводов и дорожек подключения) и т. д. Важно учитывать, что после срабатывания сопротивление PolySwitch не восстанавливается до прежнего значения, а указанное в спецификации время восстановления подразумевает период, за который сопротивление предохранителя достигнет 80% от указанного максимального значения $R1_{max}$. Полное восстановление может занять даже не десятки секунд, а часы (рис. 3). Эти тонкости выходят за рамки обзорной статьи и доступны в специализированных документах, например в [4].

Как можно видеть, не все здесь так просто, как кажется, и использовать устройство, подобные PolySwitch, несмотря на их внешнюю простоту, нужно с умом и отказываться от них не стоит — замены-то им нет. В чем-то эти устройства по сравнению с плавкими предохранителями проигрывают (самовосстановление, отсутствие проблем с заменой, возможность организовать защиту на малых токах, удобство применения, в ряде случаев — габариты), в чем-то проигрывают (большие токи утечки, более высокое сопротивление, меньшее рабочее напряжение, сильная температурная зависимость, цена). Здесь на помощь приходит незаменимый функционально-

стоимостный анализ (ФСА). Автор статьи неоднократно использовал эти устройства, но большей частью для защиты от случайных отказов и аварийных ситуаций внутренних узлов РЭА, в цепях с токами, не превышающими нескольких ампер.

Поскольку функционирование устройства основано на температуре, то PolySwitch может использоваться в качестве предохранителя комплексного действия и отключать цепь РЭА при недопустимом повышении тока в цепи и ее внутренней температуры или температуры критически важного для этой аппаратуры компонента. Например, контролировать заряд аккумулятора и защищать электродвигатель. Но основным применением является именно защита цепей питания от короткого замыкания, а также интерфейсов от бросков напряжения и переходных процессов.

Примеры типичных цепей, в которых для обеспечения комплексного решения защиты используются полимерные предохранители компании Littelfuse в сочетании с другими устройствами защиты, приведены в [5].

Предложения компании Littelfuse

Ввиду их популярности на рынке продукты этого типа выпускаются под разными торговыми марками целым рядом компаний, в том числе такими известными брендами, как TE Connectivity (ранее Tyco Electronics), Bourns, Fuzetec Technology Co., Ltd. и Littelfuse. Далее будут рассмотрены коммерчески доступные полимерные самовосстанавливающиеся предохранители, предлагаемые известной компанией, специалистом по предохранителям — Littelfuse, под уже, можно сказать, ставшей классической торговой маркой PolySwitch.

Компания Littelfuse [11] имеет давнюю и необычную историю, а само ее название вызвало спор с правительством США. Когда правительство США отказало Эдварду В. Сандту (Edward V. Sundt) в патенте на устройство Little fuse (буквально — «маленький предохранитель») на том основа-

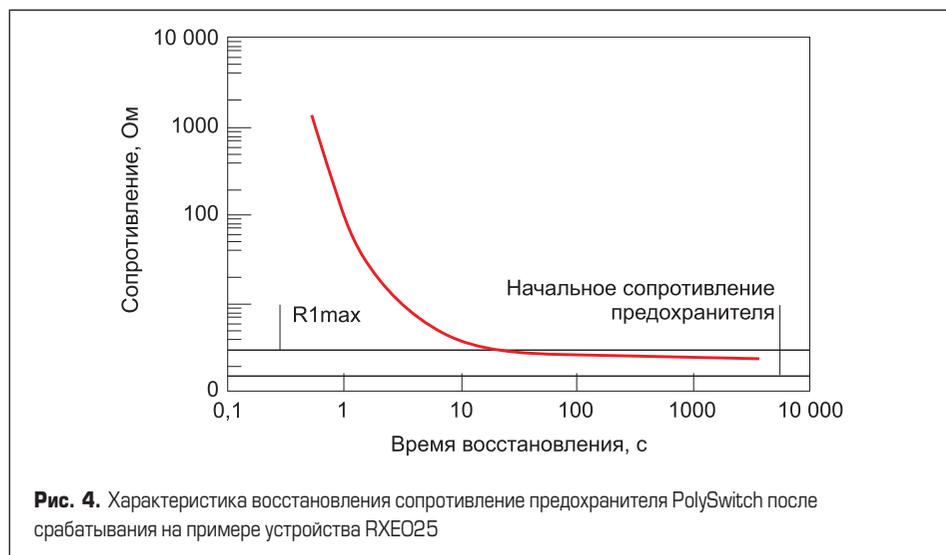


Таблица 1. Предохранители PolySwitch для поверхностного монтажа компании Littelfuse

Серия	Внешний вид	Основные характеристики		
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	
0402L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,2; 0,35; 0,5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3; 0,5; 0,7; 1
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6
0603L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,04; 0,1; 0,2; 0,25; 0,35; 0,5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,12; 0,3; 0,5; 0,55; 0,75; 1
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 9; 15; 24
0805L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,1
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,3; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 1,95; 2
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 9; 15; 24; 30
1206L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1; 1,5; 1,75; 2
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,3; 0,4; 0,7; 1; 1,5; 2,2; 3; 3,5; 4
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 12; 13,2; 16; 24; 30
1210L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1; 1,5; 1,75; 2
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,3; 0,4; 0,7; 1; 1,5; 2,2; 3; 3,5; 4
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 12; 13,2; 16; 24; 30
1812L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,14; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1; 1,25; 1,5; 1,6 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3; 0,34; 0,4; 0,75; 1; 1,5; 1,95; 2,2; 2,5; 2,8 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 8; 12; 13,2; 15; 16; 24; 30; 33; 60
2016L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,3; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2; 2,6; 3; 5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,6; 1,1; 1,5; 2,2; 3; 4,2; 5; 10
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 15; 16; 24; 33; 60
2920L		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,3; 0,5; 0,75; 1,1; 1,25; 1,5; 1,85; 2; 2,5; 2,6 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,6; 1; 1,5; 2,2; 2,5; 3; 3,7; 4; 5,5 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 12; 15; 16; 24; 30; 33; 60
femtoASMD* (0603)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,08; 0,1
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,2; 0,3
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	12; 15
femtoSMDC (0603)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,08; 0,1; 0,12; 0,16; 0,2; 0,35
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,45; 0,7
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 9; 12; 15
picoASMD* (0805)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,12
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	15
picoSMDC (0805)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,12; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3; 0,47; 0,75; 1; 1,5; 2,2
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 9; 15
nanoSMD (1206)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,12; 0,16; 0,2; 0,25; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1; 1,5 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,25; 0,35; 0,39; 0,42; 0,45; 0,58; 0,75; 1,1; 1,5; 2 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 13,2; 16; 24; 30; 48; 60
nanoASMD* (1206)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,12; 0,16; 0,2; 0,25; 0,35; 0,5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,25; 0,39; 0,42; 0,45; 0,58; 0,75; 1,1
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	13,2; 16; 24; 48; 60
microSMD (1210)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,35; 0,5; 0,75; 1,1; 1,5; 1,75; 2
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,25; 0,35; 0,75; 1; 1,5; 2,2; 3; 3,5; 4
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 13,2; 30
microASMD* (1210)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,25; 1
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	13,2; 30
miniSMD (1812)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,14; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,1; 1,25; 1,5; 1,6 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,28; 0,3; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 1,6; 2,2; 2,5; 2,8 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 8; 9; 12; 13,2; 16; 24; 30; 33; 60
miniASMD* (1812)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,14; 0,2; 0,3; 0,5; 0,75; 1,1; 1,25; 1,5; 2 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,28; 0,3; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 1,6; 2,2; 2,5; 2,8 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	12; 13,2; 16; 24; 30; 33; 60
decaSMD (2018)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,55
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1,1
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	60
SMDC (2920)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,3; 0,5; 0,75; 1,25; 1,85; 3; 3,1
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,6; 1; 1,5; 2,5; 3,7; 6
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	18; 24; 33; 60
ASMDC* (2920)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,3; 0,5; 0,75; 1,25; 1,85; 3
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,6; 1; 1,5; 2,5; 3,7; 6
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	24; 33; 60
SMD (2920, 3425, 2018)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,3; 0,5; 0,75; 1,1; 1,2; 1,25; 1,5; 1,6; 1,85; 2 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,6; 0,8; 1; 1,5; 2,2; 2,3; 2,5; 3; 3,2; 3,6 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 15; 16; 24; 30; 33; 60
ASMD* (2920, 3425)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,23; 0,37; 0,6; 0,9; 1,04; 1,2; 1,27; 1,73; 1,85; 1,97
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,59; 0,94; 1,48; 2,16; 2,46; 2,88; 2,95; 3,7; 3,93; 5
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16; 30; 33; 60
AHS* (высокотемп.)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,8; 1,2; 1,6; 2; 3
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	2; 2,3; 3,2; 4; 6
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
Low Rho SMD (0402–2920)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,1; 1,5; 1,75; 1,9 и более
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 1,8; 2; 2,2; 3; 3,5 и более
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 12; 24
250S		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,26
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	250
zeptoSMDC (0201)		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,011; 0,015
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,082; 0,2
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	13
Automotive High Temperature*		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,10; 0,16; 0,2; 0,35; 0,5
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,18; 0,60; 0,7; 0,8; 0,95; 1,6; 1,75; 2,5
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16; 24; 30

Примечание. *С квалификацией AEC-Q200 для применения в автомобильной промышленности [16].

нии, что слова были слишком распространены, основатель компании пошел на компромисс, поменяв местами буквы «l» и «e», в результате получилось Littelfuse. Почему настолько важно было слово «маленький»? Это тоже имеет свою историю.

Компания Littelfuse была, как сейчас мы сказали бы, типичным стартапом амбициозного молодого человека — двадцатипятилетнего инженера Эдварда В. Сандта, ранее работавшего в General Electric. Там ему неоднократно приходилось сталкиваться с выходом из строя чувствительного диагностического оборудования из-за бросков тока и напряжения. Для решения этой проблемы он в 1927 году основал свою Littelfuse Laboratories и, чтобы создать начальный оборотный капитал, даже пожертвовал своим автомобилем. Уже в 1928 году Сандт запатентовал свой первый маленький (Little) быстродействующий предохранитель, предназначенный для предотвращения перегорания измерительных приборов. Первый заказ по объявлению, которое он разместил в журнале Radio News Magazine, принес ему и первый доход — \$1,1, а 2016 год принес компании уже \$1,7 млрд.

По состоянию на сентябрь 2017 года в Littelfuse работало 12 тыс. сотрудников, а офисы продаж и заводы компании действуют по всему миру. О качестве и надежности продуктов компании говорит хотя бы тот факт, что уже в 1964 году две линейки ее сверхминиатюрных предохранителей были включены в программу космических полетов человека Gemini (этапы пути компании в [5]).

В настоящее время Littelfuse предлагает такие компоненты, как предохранители, защитные диоды и сборки, защитные и переключающие тиристоры, IGBT-модули, варисторы, устройства защиты светодиодов и модули светодиодного освещения, герконы и датчики Холла, устройства мониторинга электроцепей, защиты от разряда молний и статического электричества, а также ряд других продуктов [12].

В части PolySwitch компания Littelfuse предлагает:

1. Устройства для поверхностного монтажа, которые обеспечивают защиту от перегрузки по току для приложений с ограниченным пространством. Типоразмер корпуса этого варианта исполнения предохранителей варьируется в пределах 0402–3425, а ток удержания составляет 50 мА...7 А (табл. 1).
2. Устройства с выводами для монтажа в отверстия, предназначены для обеспечения максимальной токовой защиты для приложений, где свободное пространство не является проблемой, а предпочтительной считается именно устойчивая защита (табл. 2, кроме телекоммуникационных).
3. Устройства, используемые в качестве предохранителей с установкой на батарею, обеспечивают надежную защиту от перезарядки и короткого замыкания



Рис. 5. Автомобильные серии предохранителей PolySwitch: сверху – серия TD; внизу – серия Chip

перезаряжаемых аккумуляторных элементов (табл. 3) [13].

4. Устройства, адаптированные к требованиям телекоммуникационного оборудования и предназначенные для защиты от кратковременных токов высокого напряжения (перекрестное напряжение или импульс мощности), которые обычно встречаются в телекоммуникационных и сетевых приложениях (табл. 4) [14].

Кроме уже указанных предохранителей, в портфеле компании Littelfuse имеются устройства PolySwitch серий TD (Terminal Devices) и Chip [15], предназначенные для использования в автомобилях для защиты цепей управления электрическими стеклоподъемниками, двигателями дверных замков и т. д. Эти устройства помогают устранить проблемы, вызванные нестабильным функционированием или неправильным использованием, например стопорением ротора двигателя или коротким замыканием. Устройства серий TD и Chip обычно изготавливаются по индивидуальному заказу для размещения в корпусе двигателя. Также для автомобилей предлагаются предохранители с обычными для этой отрасли плоскими ножевыми терминалами (табл. 5).

В таблицах 1–5 приведены типовые характеристики при температуре +25 °С или при условиях, указанных в спецификациях на конкретную серию предохранителей. Полная информация по данной продукции доступна на сайте по ссылке [7], а ее последний каталог можно загрузить по ссылке [9]. Обратите также внимание, что ссылка [16], указанная на сайте компании как каталог автомобильных предохранителей PolySwitch с ножевыми терминалами, не соответствует действительности. На самом деле там представлены только предохранители для поверхностного монтажа.

Из новинок компании Littelfuse следует обратить внимание на новые восстанавливаемые Littelfuse серии Low Rho (табл. 1), которые отличает сверхнизкое нормальное рабочее сопротивление, при этом сохраняются те же характеристики, что и у других продуктов Littelfuse PolySwitch, доступных в сериях для поверхностного монтажа.

Таблица 2. Предохранители PolySwitch компании Littelfuse с выводами для монтажа в отверстия

Серия	Внешний вид	Основные характеристики		
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11 и более
RGEF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	4,7; 5,1; 6,8; 8,5; 10,2; 11,9; 13,6; 15,3; 17; 18,7 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14
AGRF*		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	7,6; 9,4; 10,7; 13,2; 15; 16,5; 18,5; 20,3; 22,1; 27,3
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,5; 0,7; 1; 2; 3; 4; 4,5; 5,5; 6; 6,5 и более
RHEF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,9; 1,4; 1,8; 3,8; 6; 7,5; 7,8; 10; 10,8; 12 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40; 100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16; 30
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,5; 0,7; 1; 3; 5; 7,5; 10
AHEF*		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1; 1,4; 1,9; 6; 10; 15; 20
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	32
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,5; 0,7; 1; 2; 3; 4; 4,5; 5,5; 6; 6,5 и более
AHRF*		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1; 1,4; 1,9; 3,8; 6,5; 7,4; 8,7; 10; 12; 13,1 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40; 100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16; 30
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,9; 1,1; 1,35; 1,6; 1,85; 2,5; 3; 4; 5; 6 и более
RUEF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1,8; 2,2; 2,7; 3,2; 3,7; 4,9; 5; 6; 8; 10 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	30
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,5; 0,65; 0,75; 0,9; 1,1; 1,35; 1,6; 1,85; 2,5; 3 и более
RKEF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1; 1,3; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,2; 3,7; 5; 6 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	60
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,05; 0,1; 0,17; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65; 0,75 и более
RXEF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,1; 0,2; 0,34; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,3; 1,5 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	60; 72
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,75; 0,9; 1,1; 1,2; 1,35; 1,55; 1,6; 1,85; 2,5
RUSBF		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1,3; 1,8; 2; 2,2; 2,65; 2,7; 3,2; 3,7; 5
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 16
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,75; 0,9; 1,1; 1,2; 1,35; 1,55; 1,6; 1,85; 2,5
USBR		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	1,3; 1,8; 2; 2,2; 2,7; 3,2; 3,7; 5
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6; 16
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11 и более
16R		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	4,7; 5,1; 6,8; 8,5; 10,2; 11,9; 13,6; 15,3; 17; 18,7 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,1; 0,17; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65; 0,75; 0,9 и более
60R		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,2; 0,34; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	60
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65; 0,75; 0,9; 1,1; 1,35 и более
72R		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7 и более
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	72
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65; 0,75; 0,9; 1,1; 1,35 и более

Примечание. *С квалификацией AEC-Q200 для применения в автомобильной промышленности.

Таблица 3. Предохранители PolySwitch компании Littelfuse с установкой на батареи

Серия	Внешний вид	Основные характеристики		
		Температура активации, °С		85
VLR		Ток удержания, А	I_{HOLD}	1,7; 1,75; 2,3
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	4,1; 4,2; 5
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	12
VLP		Температура активации, °С		90
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	1,2; 1,75; 2,2; 2,7
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	3,6; 3,9; 5,3; 6,5
		Макс. ток, А	I_{MAX}	60
VTP		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
		Температура активации, °С		90
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	1,1; 1,7; 1,75; 2,1
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	2,7; 3,4; 3,6; 4,7
MXP		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	16
		Температура активации, °С		120
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	1,8; 1,9; 2,5; 2,7; 3,7
LR4		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	4,9; 5,2; 6,2; 9
		Макс. ток, А	I_{MAX}	50
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6
		Температура активации, °С		125
RSD		Ток удержания, А	I_{HOLD}	1,9; 2,6; 3,8; 4,5; 5,5; 6; 7,3; 9; 13
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	3,9; 5,8; 8,3; 8,9; 10,5; 11,7; 14,1; 16,7; 21,2
		Макс. ток, А	I_{MAX}	100
		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	15; 20
RSD		Температура активации, °С		125
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	3,1; 3,7; 4,2
		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	11; 13
		Макс. ток, А	I_{MAX}	50
RSD		Макс. напряжение, В	V_{MAX}	6

Таблица 4. Предохранители PolySwitch компании Littelfuse для телекоммуникационной аппаратуры

Серия	Внешний вид	Основные характеристики		
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	
TCF250		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,09; 0,12; 0,145; 0,18
		Макс. ток, А	I_{MAX}	0,15; 0,24; 0,29; 0,38
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
TSM250		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,26
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,055; 0,08; 0,11; 0,12; 0,13; 0,145; 0,18; 0,183; 0,184
TRF250		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,16; 0,17; 0,22; 0,24; 0,26; 0,29; 0,65; 0,685; 1
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,08; 0,13
TSL250		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,24; 0,26
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60; 80
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
TS250		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,26
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
TSV250 ¹		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,26
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
250S		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,26
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,13
TRF600		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15; 0,16; 0,25; 0,4
		Макс. ток, А	I_{MAX}	0,3; 0,32; 0,85; 1
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	3
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	60; 250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	600
TR600		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,15
		Макс. ток, А	I_{MAX}	0,3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	600
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,17; 0,2; 0,4
TS600		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,4; 1
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	600
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,25; 0,4
TSM600		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,86; 1
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	250
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	600
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,08; 0,12; 0,145; 0,18
250R		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,16; 0,24; 0,29; 0,65
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	250
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	0,15; 0,16
600R		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	0,3; 0,32
		Макс. ток, А	I_{MAX}	3
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	60
		Макс. напряжение, В	V_{IN}	600
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	21

Примечание: ¹. Вариант исполнения TSV250-184F-2 100 В/0,69 А снят с производства с 27.03.2017.

Таблица 5. Предохранители PolySwitch компании Littelfuse с ножевыми терминалами для защиты автомобильного оборудования

Серия	Внешний вид	Основные характеристики		
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	
BD280 (высокотемп.)		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	8; 12; 16; 20; 21
		Макс. ток, А	I_{MAX}	13; 20; 26; 32; 38
		Мин. сопротивление, Ом	R_{MIN}	100
		Макс. сопротивление, Ом	R_{IMAX}	0,0021; 0,0024; 0,0028; 0,005; 0,0095
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	0,0042; 0,0043; 0,0064; 0,01; 0,0185
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	14
BD540 (высокотемп.)		Ток срабатывания, А	I_{TRIP}	21
		Макс. ток, А	I_{MAX}	40
		Мин. сопротивление, Ом	R_{MIN}	100
		Макс. сопротивление, Ом	R_{IMAX}	0,0016
		Рабочее напряжение, В	V_{OP}	0,0044
		Ток удержания, А	I_{HOLD}	16

Примеры применения предохранителей PolySwitch компании Littelfuse

Для защиты цепей питания предохранители PolySwitch используются с точки зрения схемотехники как обычные устройства и включаются в цепь питания последовательно (рис. 2). В ряде случаев рекомендуется после предохранителя устанавливать стабилизатор или специальный TVS-диод с напряжением пробоя, превышающим максимально допустимое рабочее напряжение для данной схемы, и током, превышающим ток срабатывания предохранителя. Это позволит защитить схему от перенапряжения и переходных процессов по цепям питания. Такое решение полезно при наличии индуктивных нагрузок, недостаточно демпфированных LC-фильтров, длинных линий подключения, в том числе и для грозозащиты, когда применение варисторов неэффективно.

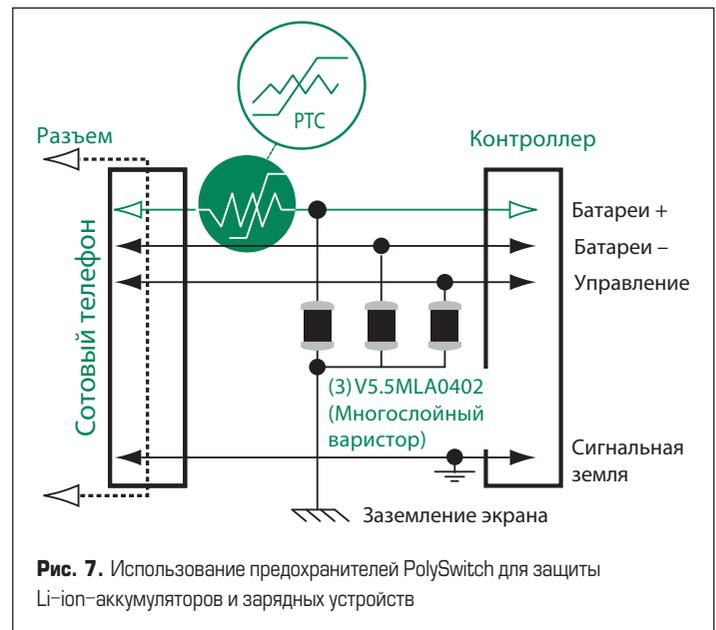
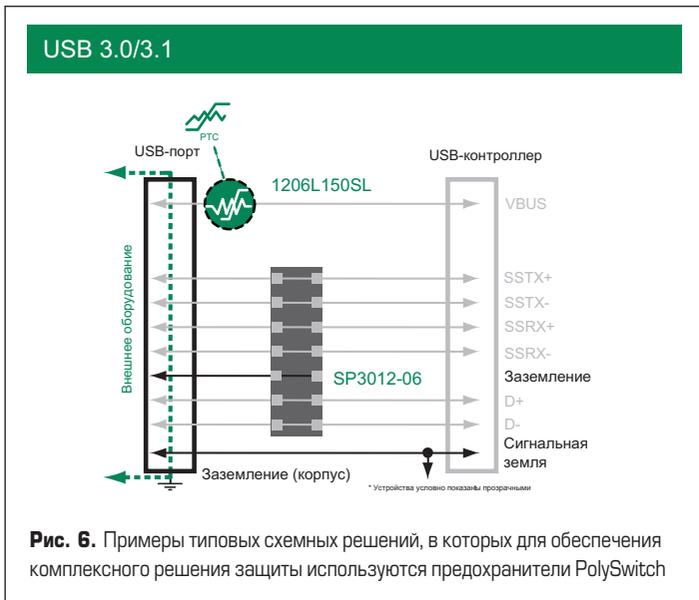
На рис. 6 приведены типовые примеры схемных решений, в которых для обеспечения комплексной защиты предохранители PolySwitch используются в сочетании с другими устройствами защиты цепей от компании Littelfuse. А на рис. 7 показано применение предохранителей PolySwitch (табл. 3) для защиты Li-ion-аккумуляторов и зарядных устройств [17].

Закключение

Предохранители — это незаменимые компоненты самой разнообразной радиоэлектронной аппаратуры, они принимают удар на себя и спасают ее от бросков напряжения и сопровождающего их резкого увеличения тока. Здесь предпочтительны именно самовосстанавливающиеся устройства, которые не перегорают и не требуют замены. Самый широкий выбор таких компонентов для различных приложений вы найдете у старейшего изготовителя компонентов защиты РЭА — компании Littelfuse.

Не заменяя собой плавких предохранителей, предлагаемые компанией Littelfuse самовосстанавливающиеся предохранители PolySwitch обеспечат простое решение сложных проблем по защите РЭА самого широкого профиля. Но только при их грамотном применении. Поэтому, прежде чем приступить к выбору, изучите это непростое устройство и особенности его применения и учтите его поведение в конкретном конечном приложении, в конкретной ситуации. Это касается не только токов и напряжений, но и условий окружающей их среды, в первую очередь — температуры. Всегда тщательно проверяйте и испытывайте конечные решения. И не забывайте, что, учитывая особую значимость защитных устройств, приобретать такие компоненты необходимо только у авторизованных реселлеров.

Компания «Элтх» является официальным дистрибьютором Littelfuse на территории России, Белоруссии и Казахстана и предлагает полный комплекс компонентов защиты от Littelfuse.



При необходимости эксперты по применению компании «Элтех» окажут вам всю необходимую помощь в выборе лучшего варианта защиты от Littelfuse, в том числе и обеспечат бесплатными образцами нужного вам для проверки того или иного решения предохранителя. Руководство по выбору элементов защиты цепей доступно по ссылке [6]. Много полезной для проектирования РЭА с использованием предохранителей PolySwitch информации доступно по ссылкам [9, 10].

Литература

1. Conductive device US2258958A, United States. www.patentimages.storage.googleapis.com/ca/ff/23/667cd1e8bd7cb6/US2258958.pdf
2. Heater with distributed heating element US4276466A, United States. www.patents.google.com/patent/US4276466A/en?q=PolySwitch&oq=PolySwitch&sort=old
3. PPTC Fundamentals. www.fuzetec.com/technology.php?gid=1
4. Fundamentals of PolySwitch Overcurrent and Overtemperature Devices. www.electrokit.com/uploads/productfile/41012/circuit-protection-psw-fundamentals.pdf
5. The Story of Our Name. www.littelfuse.com/about-us/history-and-culture/history.aspx
6. Circuit Protection Products Selection Guide. 2020 Littelfuse, Inc. EC102Nv0420. www.littelfuse.com/~media/electronics/product_catalogs/littelfuse_product_selection_guide.pdf.pdf
7. www.littelfuse.com/PTCs

8. Product Catalog & Design Guide. Positive Temperature Coefficient (PTC) Thermistor Products. 2017 Littelfuse, Inc. Revised: 03/22/17. www.electronicscatalogs.littelfuse.com/ptc/
9. www.littelfuse.com/designcenter
10. www.littelfuse.com/technical-resources.aspx
11. Корпоративный сайт. www.littelfuse.com/
12. www.littelfuse.com/products.aspx
13. Polyswitch Resettable Devices. Strap Battery Devices. 2016 Littelfuse, Inc. www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_strapbattery_catalog_datasheet.pdf.pdf
14. Polyswitch Resettable Devices. Telecommunications and Networking Devices. 2018 Littelfuse, Inc. www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_telenetwork_catalog_datasheet.pdf.pdf
15. TD and Chip Resettable PTCs. www.littelfuse.com/products/polyswitch-resettable-ptcs/td-and-chip-resettable-ptcs.aspx
16. Polyswitch Resettable Devices. Automotive Devices. 2017 Littelfuse, Inc. www.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_bladed_device_catalog_datasheet.pdf.pdf
17. Use of Low Resistivity Surface Mount PPTC in Li-ion Polymer Battery Packs. Application Note. 2012 Littelfuse, Inc. www.littelfuse.com/~media/electronics_technical/application_notes/resettable_ptcs/littelfuse_use_of_low_resistivity_surface_mount_pttc_application_note.pdf