

РОМАНС О ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯХ



SONG OF FUSE

В статье рассматриваются характеристики плавких предохранителей, выпускаемых компанией Littelfuse.

В. Охрименко

Abstract The purpose of this article is to promote a better understanding of both fuses and common application details within circuit design.

V. Okhrimenko

ВВЕДЕНИЕ

Компания Littelfuse – ведущий мировой производитель пассивных электронных компонентов для “защиты” разного рода электротехнических устройств. Одно из важных направлений – производство предохранителей, основное назначение которых – защита от избыточного тока при возникновении аварийных ситуаций в системе. Предохранители устанавливаются не только в силовой цепи электропитания приборов, но и в непосредственной близости от “защищаемых” интегральных схем и электронных узлов, а также в цепях межплатных электрических связей разных интерфейсов. Чтобы должным образом обеспечить требования безопасности и надежности системы, необходимо учитывать множество параметров при выборе типа предохранителя [1-4].

Кроме классических предохранителей цилиндрической формы размерами 5×25, 5×30 и 6.3×32 мм в настоящее время выпускаются предохранители и других типоразмеров. Это предохранители с выводами для монтажа в отверстия, малогабаритные и SMD-предохранители. По времени срабатывания их характеристики простираются от сверхбыстродействующих, ориентированных на защиту полупроводниковых или измерительных приборов, до инерционных, предназначенных для работы в цепях с большими пусковыми токами. Предохранители рассчитаны для работы, как при минимальных напряжениях, так и при напряжениях, превышающих 1000 В.

В статье рассматриваются стандарты, параметры и особенности выбора плавких предохранителей и плавких вставок, выпускаемых компанией Littelfuse.

Терминология, параметры и характеристики, а также методы испытаний приведены в соответствующих стандартах (IEC 60127, IEC 60269) международной электротехнической комиссии (International Electrotechnical Commission – IEC), а также в пакете стандартов ДСТУ EN 60127 и ДСТУ IEC 60269. К примеру, ДСТУ EN 60127-1 “Миниатюрные плавкие предохранители. Часть 1. Терминология для миниатюрных плавких предохранителей и общие требования к миниатюрным плавким вставкам” или ДСТУ IEC 60269-1 “Предохранители низковольтные плавкие. Часть 1. Общие требования”.

В стандартах регламентируются характеристики плавких предохранителей и их составных частей (оснований, держателей плавких вставок и пр.) для возможности их замены другими плавкими предохранителями или их частями с аналогичными характеристиками, конечно, при условии их взаимозаменяемости.

По сути, предохранители – коммутационные электротехнические компоненты, предназначенные для защиты электрических цепей в аварийных режимах работы, защиты электрических сетей и разного рода электротехнического оборудования от токов перегрузки и коротких замыканий. Плавкие предохранители отключают защищаемую цепь посредством разрушения специально предусмотренных для этого встроенных токоведущих элементов при воздействии протекающего тока, превышающего заданное значение.

В плавких предохранителях увеличение протекающего тока приводит к расплавлению защитного токопроводящего элемента и соответственно к размыканию цепи. Перегрузка по току может быть вызвана изменением нагрузки, при котором протекающий в цепи ток пре-

вышает ее "пропускную способность", кратковременным выбросом тока или коротким замыканием нагрузки и т.п.

Основное назначение предохранителей – защита электронных компонентов от перегрузок по току, предохранение оборудования и людей от возникновения пожара и возможного риска электрического удара, а также для изолирования дефектных блоков и узлов от основной системы еще до момента возникновения более неблагоприятных последствий. Независимо от типа перегрузки характеристики предохранителей рассчитываются таким образом, чтобы они были самым "уязвимым звеном" в цепи электропитания.

Плавкий предохранитель (fuse) – устройство, которое за счет расплавления одного или нескольких своих элементов, имеющих специальную конструкцию и размеры, размыкает цепь, в которую он включен. Т.е. при превышении определенного значения тока размыкается цепь его протекания, однако это происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. В состав плавкого предохранителя входят все элементы, образующие законченное устройство.

Держатель плавкого предохранителя (fuse holder) – узел, состоящий из основания плавкого предохранителя и держателя плавкой вставки.

Основной недостаток плавких предохранителей – необходимость замены перегоревших, что, безусловно, снижает уровень автоматизации работ при обслуживании оборудования. Альтернатива им – автоматические выключатели, которые гарантируют многократные операции по размыканию цепи, а также возможность дистанционного управления, что позволяет выполнять включение и выключение приборов в нормальных режимах работы.

К плавким предохранителям, предназначенным для защиты полупроводниковых приборов и электронных устройств, предъявляются особые требования: быстродействие; минимальные потери мощности при номинальном токе; стабильные характеристики при длительной эксплуатации в режиме номинального тока; минимальное напряжение дуги, возникающей при срабатывании предохранителя, которое не должно приводить к пробоем полупроводниковых приборов; удобная конструк-

ция и способ крепления для оптимальной компоновки на печатной плате.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

В статье рассматриваются основные электрические характеристики плавких предохранителей, критерии их выбора для различных приложений и их особенности. Едва ли можно правильно выбрать предохранитель без учета всех его многочисленных параметров.

При выборе предохранителя необходимо принимать во внимание его основные характеристики:

- номинальные значения напряжения и тока
- сопротивление
- падение напряжения
- мощность потерь
- изменение параметров в рабочем диапазоне температур
- времятоковую характеристику
- соответствие стандартам
- интеграл плавления (I^2t)
- габаритные размеры.

Номинальное напряжение (voltage rating) предохранителя – максимальное напряжение, при котором предохранитель будет соответствовать своим параметрам, в первую очередь, характеристике плавления, что обеспечивает надежное срабатывание предохранителя. Номинальное напряжение предохранителя не должно быть меньше, чем рабочее напряжение питания устройства. Номинальное напряжение – один из определяющих параметров при выборе типа предохранителя. При переменном токе синусоидальной формы номинальное напряжение определяется его действующим значением, при постоянном токе в случае наличия пульсаций, – средним значением. Номинальное напряжение предохранителя – это наименьшее значение из номинальных напряжений его составных частей: держателя предохранителя и плавкой вставки.

Номинальный ток (current rating) определяет нагрузочную способность предохранителя. Его конкретное значение зависит от стандарта, в соответствии с которым выполнена данная серия предохранителей. Это основной параметр, значение которого, как правило, указывается на корпусе предохранителя.

По сути, номинальные значения тока и напряжения, это те значения, при которых плавкий предохранитель может длительно проводить ток в определенных условиях без отказов и разрушений.

Как регламентируется соответствующими стандартами, номинальное значение (rating) – это общий термин, обозначающий значения параметров, которые в совокупности определяют рабочие условия, при которых эксплуатируются предохранители и проводятся их испытания. Для низковольтных плавких предохранителей обычно указывают номинальные значения напряжения, тока, энергии плавления, мощности потерь и пр.

Для переменного тока (AC) номинальные напряжение и ток задают в виде действующих значений, для постоянного (DC) – при наличии пульсации номинальное напряжение задают в виде среднего значения, а номинальный ток – в виде действующего значения. Это относится ко всем значениям напряжения и тока, если не оговорено иначе.

Разрывающая способность, по сути, это параметры разрываемой цепи (interrupting rating). Эти значения параметров, часто во много раз превышающие номинальные, определяют максимальные величины тока и напряжения для безопасного разрыва цепи при протекании аварийного тока или в случае короткого замыкания с гарантированным отсутствием взрыва либо возникновения пламени. Значения этих параметров зависят от конструктивных особенностей предохранителя, напряжения и пр. и отличаются для цепей постоянного и переменного тока. Например, для предохранителей серии 437 типоразмера 1206 (Fast-Acting Fuse) эти значения параметров составляют 125 В /35 А при номинальных значениях напряжения и тока 63 В и 0.125 мА, а для предохранителей серии 313/315 (Slo-Blo Fuse), рассчитанных на применение в цепях переменного тока, – 35 А / 250 В или 10 кА/125 В, при номинальном напряжении 250 В и токе 0.1 мА [1,2].

Сопротивление предохранителя, как правило, составляет лишь малую долю полного сопротивления цепи, в которую он включен. Сопротивление предохранителя зависит, в первую очередь, от номинального тока. Например, сопротивление предохранителей серии

438 (Fast-Acting Fuse) типоразмера 0603 – 0.0087 (6 А) или 2.024 Ом (0.25 А). Тем не менее, это сопротивление в ряде случаев следует учитывать. Большинство предохранителей изготавливаются из материалов с положительным температурным коэффициентом сопротивления и, как правило, в документации сопротивление предохранителей указывается в "холодном состоянии", т.е. при токе не более 0.1 номинального значения. Сопротивление при номинальном значении тока вычисляется по падению напряжения на предохранителе.

Номинальное падение напряжения (voltage drop). Независимо от конструкции и устройства плавкого предохранителя он, как и любой другой проводник, характеризуется таким параметром, как падение напряжения при номинальном токе. Падение напряжения измеряется при установившейся температуре.

Потери мощности (power dissipation) при номинальном токе, определяемые произведением падения напряжения на величину протекающего тока.

Принцип действия плавких предохранителей весьма простой. При протекании тока через предохранитель он нагревается. Чем больше протекающий ток, тем больше нагревается плавкий элемент предохранителя. Нагревание происходит пока не будет достигнут ток плавления, и температура плавкого элемента повысится до такой величины, что он расплавится и разорвет цепь протекания тока. Вследствие этого многие параметры плавких предохранителей зависят от температуры окружающей среды.

Чтобы гарантировать защиту электронных узлов от повреждений только в случае отказа или короткого замыкания, и не провоцировать нежелательные простои оборудования при длительном протекании расчетного рабочего тока, и тем самым обеспечить спокойную жизнь обслуживающему персоналу, следует простым рекомендациям при выборе типа предохранителя.

Номинальный ток предохранителя выбирается на 25-30% больше, чем расчетный рабочий ток устройства. Если предохранитель эксплуатируется при температуре отличной от нормальной (25 °С), следует учитывать зависимость его характеристик от температуры. В документации номинальные значения парамет-

ров, как правило, приводятся при температуре окружающей среды 25 или 23 °С. Зависимость номинального тока от температуры для SMD-предохранителей типоразмера 1206 серии 437 (Fast-Acting Fuse) приведена на рис. 1.

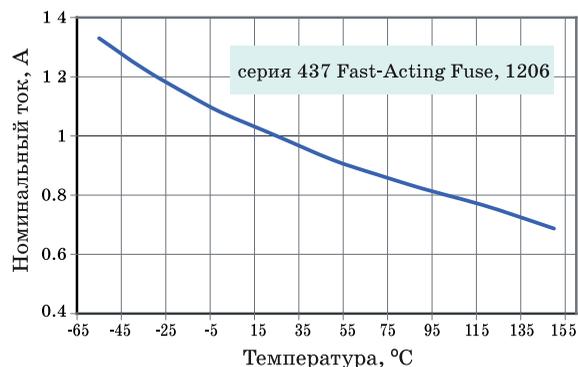


Рис. 1. Зависимость номинального тока от температуры предохранителей типоразмера 1206 серии 437 (Fast-Acting Fuse)

Времятоковая или ампер-секундная характеристика отключения предохранителя – зависимость времени "перегорания" от протекающего тока. Это, по сути, время отключения как функция тока. Времятоковые характеристики отключения предохранителей серии 437 (Fast-Acting Fuse) типоразмера 1206 приведены на рис. 2. Использование времятоковой характеристики весьма полезно и позволяет достаточно просто выбрать тип предохранителя. Зачастую причиной непредвиденных срабатываний плавких предохранителей являются токи включения (пусковые токи), превышающие расчетный рабочий ток предохранителя. Чтобы определить, способен ли предохранитель выдержать импульс тока с известной длительностью, можно воспользоваться времятоковой характеристикой. В документации приводятся усредненные графики зависимостей, которые могут отличаться для разных экземпляров даже из одной партии, и, как правило, эти характеристики не рассматриваются как часть технических спецификаций предохранителей.

В спецификациях компании Littelfuse указывается время срабатывания при токе через предохранитель равный 135 и 200% номинального значения (кроме этих используются и другие значения в зависимости от стандартных характеристик предохранителей). В табл. 1

приведено время срабатывания плавких предохранителей в соответствии с рекомендациями разных стандартов. В табл. 2, 3 – параметры некоторых типов плавких предохранителей, выпускаемых компанией Littelfuse.

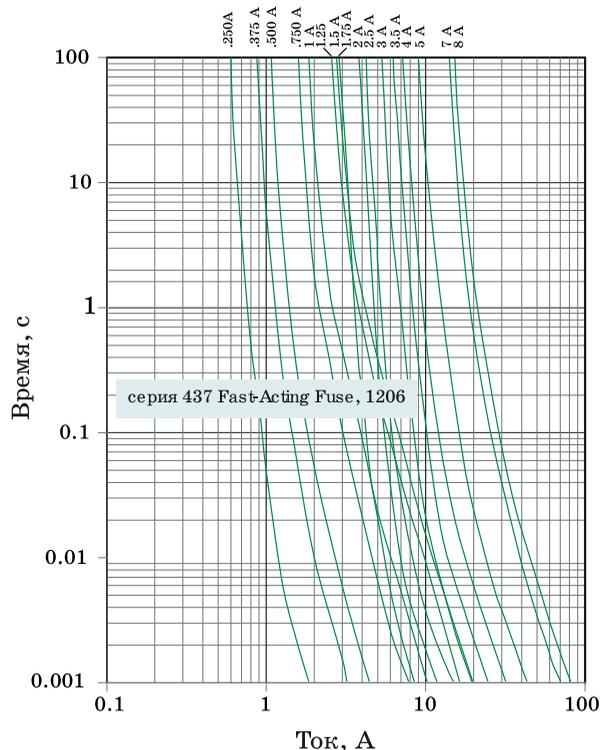


Рис. 2. Времятоковые характеристики отключения предохранителей серии 437 (Fast-Acting Fuse)

Как следует из данных, приведенных в табл. 1, рекомендации североамериканских стандартов UL (Underwriters Laboratories, США) и CSA (Canadian Standards Association, Канада), а также рекомендации международной электротехнической комиссии и японских стандартов METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) отличаются друг от друга в определении времени срабатывания плавкого элемента в зависимости от протекающего тока. Это одно из основных несоответствий, которое исключает полную взаимозаменяемость предохранителей, изготовленных согласно требованиям разных стандартов. В рекомендациях стандартов UL/CSA оговаривается, что предохранители должны срабатывать при токе, равном 135% номинального значения, в рекомендациях IEC – 150%.

Сертификацией предохранителей на соот-

Таблица 1. Время срабатывания плавких предохранителей в соответствии с рекомендациями разных стандартов

Ток, % $I_{ном.}$	UL/CSA STD 248-14	IEC Type F Sheet 1	IEC Type F Sheet 2	IEC Type T Sheet 3	IEC Type T Sheet 5	МЕТІ/МІТІ
110	4 ч (мин.)	—				
130	—	—				1 ч (мин.)
135	60 мин (макс.)	—				
150	—	60 мин (мин.)				—
160	—	—				1 ч (макс.)
200	2 мин (макс.)	—				2 мин (макс.)
210	—	30 мин (макс.)	—	2 мин (макс.)	30 мин (макс.)	—

Таблица 2. Параметры некоторых типов плавких предохранителей

Ток, % $I_{ном.}$	Диапазон токов, А	Время срабатывания
437 Series – 1206 Fast-Acting Fuse		
100	0.25...8	4 ч (мин.)
250	0.75...8	5 с (макс.)
350	0.25...0.5	5 с (макс.)
350	0.75...8	1 с (макс.)
438 Series – 0603 Fast-Acting Fuse		
100	0.25...6	4 ч (мин.)
250	0.25...6	5 с (макс.)
251/253 Series, PICO II, Very Fast-Acting Fuse		
100	0.065...15	4 ч (мин.)
200	0.062...7	1 с (макс.)
275	0.05...10	300 мс (макс.)
400		30 мс (макс.)
1000		4 мс (макс.)

Таблица 3. Время срабатывания некоторых типов плавких предохранителей в зависимости от величины протекающего тока

Ток, % $I_{ном.}$	Время срабатывания
461E Series Enhanced TeleLink Fuse	
100	4 ч (мин.)
176	300 с (макс.)
200	1 с (мин.); 60 с (макс.)
460 Series PICO Slo-Blo Surface Mount Fuse	
100	4 ч (мин.)
200	1 с (мин.); 120 с (макс.)
300	0.2 с (мин.); 3 с (макс.)
800	0.02 с (мин.); 0.1 с (макс.)
Series TR5, Fast-Acting Fuse	
150	1 ч (мин.)
210	30 мин (макс.)
275	10 мс (мин.); 3 с (макс.)
400	3 мс (мин.); 300 мс (макс.)
1000	20 мс (макс.)

ветствие стандартам IEC занимаются такие организации, как SEMKO (Svenska Elektriska Materielkontrollanstalten), BSI (British Standards Institute) и VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik).

В стандарте IEC60127-4 Universal Modular Fuse-Links (UMF) предпринята попытка объединить требования стандартов IEC и UL. В нем регламентируются параметры как

плавких предохранителей для поверхностного монтажа, так и для монтажа в отверстия. Номинальные напряжения – 32, 63, 125 и 250 В. В спецификациях IEC60127-4 (UMF) используются отличные от рекомендуемых в IEC 60127-2 соотношения величины тока и времени срабатывания. При превышении номинального тока на 25% предохранитель не должен срабатывать минимум на протяжении одного часа, при превышении тока на 100% время

срабатывания – не более двух минут. В зависимости от быстродействия при десятикратной перегрузке по току, предохранители в спецификациях IEC60127-4 (UMF) разделяются на категории (F, FF, T, TT и M). Соответствие категории времени срабатывания, а также параметры некоторых типов предохранителей компании Littelfuse приведены в табл. 4. Предохранители серий 461, 464, 465 (Littelfuse) соответствуют рекомендациям спецификаций IEC60127-4 (UMF). В табл. 5 приведены их основные характеристики.

Таблица 4. Категории предохранителей и параметры некоторых типов предохранителей компании Littelfuse

Категория предохранителя	Время срабатывания, с	Тип предохранителя Littelfuse
FF	<0.001	–
F	0.001...0.01	464
T	0.01... 0.1	462, 465
TT	0.1...1.00	–

Казалось бы, все достаточно просто, если исходить только из предпосылок, что постоянный по величине ток длительное время протекает через предохранитель и при этом обеспечивается беспрепятственный отвод тепла. Однако в действительности во многих случаях, наблюдается иная картина. Большую роль играют импульсные токи, которые могут превышать в несколько раз номинальный ток предохранителя. В таком случае при выборе типа предохранителя следует учитывать и другие его характеристики, в первую очередь, энергию плавления.

Энергия плавления, по сути, интеграл Джоуля (Joule integral, I^2t) – это основной параметр плавкого предохранителя. Энергия плавления – количество тепловой энергии, необходимой для расплавления плавкого элемента предохранителя. При небольшой длительности интервала плавления (1...10 мс) эта энергия пропорциональна квадрату тока и времени его протекания.

$$I^2 \cdot t_{\text{пл}} = \int_0^{t_{\text{пл}}} i^2(t) dt,$$

где, $t_{\text{пл}}$ – время плавления (melting), $i(t)$ – функция изменения тока, протекающего через предохранитель.

Прежде, чем происходит полное расплавление плавкого элемента, образуется электрическая дуга. По аналогии энергия в период горения дуги характеризуется интегралом дуги ($I^2t_{\text{д}}$), где, $t_{\text{д}}$ – время горения дуги. Быстродействующие плавкие предохранители рассчитываются с учетом полной энергии ($I^2t_{\text{пл}} + I^2t_{\text{д}}$) и обычно предназначены для защиты от токов при коротком замыкании, а не токов перегрузки. В спецификациях компании Littelfuse, указывается значение энергии плавления (A^2c), которое определяется в процессе проведении лабораторных тестов при величине аварийного тока, превышающей номинальное значение в десять раз.

Максимальные пусковые токи разного рода электротехнических устройств, как правило, значительно превышают ток в установившемся режиме. Энергия периодических импульсов тока может оказаться достаточно большой, чтобы разогреть плавкую вставку. И хотя этой энергии недостаточно, чтобы ее расплавить эти токи оказывают периодическое тепловое воздействие на плавкий элемент и, как следствие, вызывают его старение, что может являться причиной преждевременного отказа. Поэтому при выборе предохранителя необходимо учитывать суммарную величину энергии плавления (I^2t), выделяемую в разных режимах работы на протяжении всего предполагаемого срока службы плавкого предохранителя. Номинальное значение I^2t зависит от материала, из которого он изготовлен, его конструкции, площади поперечного сечения и других характеристик. Энергия импульса пускового тока не должна превышать энергию плавления, в таком случае предохранитель не сработает в течение переходного процесса.

Как правило, номинальная энергия плавления принимается во внимание при выборе предохранителей для приложений, в которых предохранитель подвержен многократному воздействию импульсов большой амплитуды и сравнительно короткой длительности. Наличие таких токов характерно для многих электронных устройств и присуще разным приложениям, поэтому анализ суммарной энергии импульсов имеет решающее значение при вы-

Таблица 5. Основные характеристики некоторых предохранителей

Номинальный		Разрывающая способность, А (В)	Сопротивление, Ом	Энергия плавления, (А ² с)	Падение напряжения, мВ	Мощность рассеивания, мВт
Ток, А	Напряжение, В					
Surface mount Fuses NANO. 250V UMFTime Lag 465 Series						
1	250	100 (250)	0.1070	2.8	—	—
1.25			0.0830	5.6		
3.15			0.0210	31.7		
4			0.0160	48.4		
Surface mount Fuses NANO. 250V UMF, Fast-Acting 464 Series						
0.5	250	100 (250)	0.2373	0.22	600	—
0.8			0.1159	0.96	400	
1.25			0.0580	0.98	300	
2.5			0.0288	3.99		
6.3			0.0093	53.33		
Surface mount Fuses NANO. 250/350V, Time Lag 462 Series						
0.63	250	100 (350)/ 150(250)	0.1570	0.8	160	200
0.8			0.130	1.4	160	250
1.6			0.0443	9.7	130	280
2.0			0.0335	5.44	120	300
4.0			0.0158	21.0	110	800
5.0			0.0124	40.0	110	1000

боре предохранителя. Для надежной работы устройства, подверженного воздействию заданного числа импульсов, приведенная в документации номинальная энергия плавления предохранителя должна быть больше, чем вычисленное значение из следующего выражения:

$$I^2t_{(ЭКВ)} = k \cdot I^2t_{(ИМПУЛЬСА)},$$

где, $I^2t_{(ЭКВ)}$ – эквивалентное значение энергии за счет многократного воздействия заданного числа импульсов; $I^2t_{(ИМПУЛЬСА)}$ – энергия одиночного импульса тока; k – поправочный коэффициент, зависящий от числа импульсов (в общем случае k зависит от конструкции плавкого элемента и ряда других характеристик).

На рис. 3 приведены параметры некоторых импульсов и формулы для вычисления энергии (I^2t) одиночного импульса, на рис. 4 – зависимость от числа импульсов поправочного коэффициента (k), учитываемого при определении эквивалентного значения энергии плав-

ления $I^2t_{(ЭКВ)}$. Подразумевается, что интервал между импульсами не менее 10 с, поэтому тепло, выделяемое от предыдущих импульсов, не принимается во внимание. Естественно, если не учитывать охлаждение плавкого элемента в промежутках между импульсами, то значение коэффициента будет значительно больше. Как следует из графика (рис. 4), учитывается только небольшая часть общей энергии, обусловленной наличием импульсов тока в цепи предохранителя.

Пример. При воздействии импульсов с параметрами (рис. 5), которым соответствуют импульсы типа Е (рис. 3), энергия одиночного импульса вычисляется по формуле $iPt/5$.

Подставляя соответствующие значения, получаем $(1/5) \cdot 82 \cdot 0.004 = 0.0512 \text{ А}^2\text{с}$. С учетом числа импульсов (100 тыс.) следует определить эквивалентное значение энергии плавления: $0.0512 \cdot 4.5454 = 0.2327 \text{ А}^2\text{с}$. Для рассматриваемого примера при рабочем токе 0.75 А можно выбрать предохранитель серии PICO с номиналь-

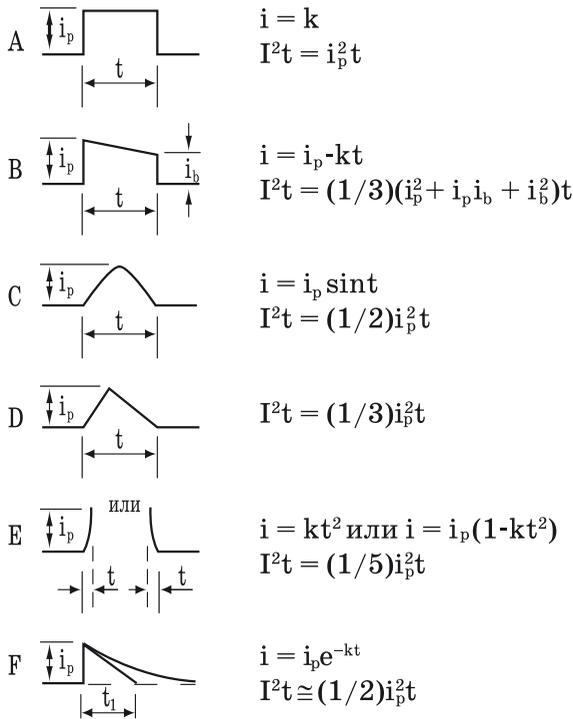


Рис. 3. Параметры некоторых импульсов и формулы для вычисления энергии одиночного импульса

Число импульсов	Поправочный коэффициент
100 000	4.5454
10 000	3.4482
1 000	2.6315
100	2.0833

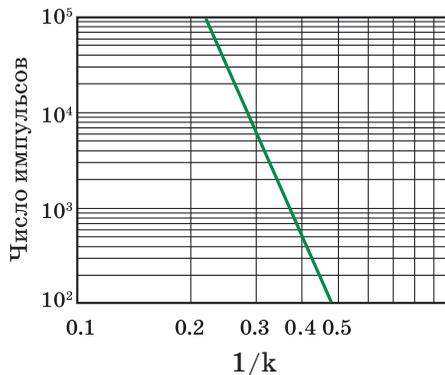


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента (k) от числа импульсов

ным током 1 А и энергией плавления не менее, чем 0.2327 А²с (например Р1СО 251001 с энергией плавления 0.256 А²с). Т.е. приведенная в спецификации номинальная энергия плавления предохранителя должна быть больше, чем рассчитанная эквивалентная энергия плавления.

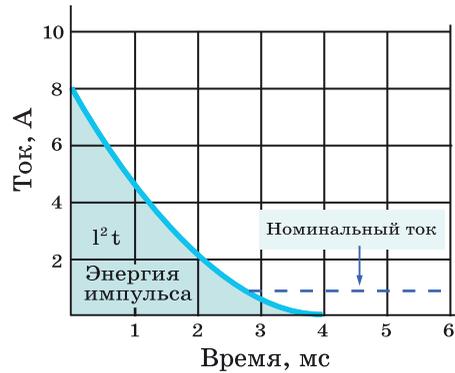


Рис. 5. Параметры входного импульса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор предохранителя далеко нетривиальная задача, как может показаться с первого взгляда. При его выборе необходимо учитывать много факторов. Плавкий предохранитель должен перегорать и защищать устройства в системе от повреждений только в случае их отказа, а не приводить к нежелательным простоям из-за того, что при выборе предохранителя не были учтены все его характеристики или были учтены неправильно.

На веб-сайте компании Littelfuse можно найти сервисную программу Littelfuse iDesign tool, использование которой позволяет упростить и ускорить выбор типа предохранителя для разных приложений. Работа с программой происходит в интерактивном режиме и позволяет "на лету" изменять некоторые наиболее важные характеристики, используемые при выборе типа предохранителя.

Более полную информацию о предохранителях компании Littelfuse можно найти в [1-4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Fuseology. Selection Guide. Fuse characteristic, terms and consideration factors. – Littelfuse
2. Product Catalog&Design Guide. Fuse. Circuit Protection product. – Littelfuse.
3. ДСТУ EN 60127-1 "Миниатюрные плавкие предохранители. Часть 1. Терминология для миниатюрных плавких предохранителей и общие требования к миниатюрным плавким вставкам"
4. www.littelfuse.com.