

Окончание. Начало в № 4' 2007

# Быстродействующие предохранители Siba:

## безотказная защита преобразователей

Дмитрий Андронников

adv@west-l.ru

### Практические аспекты применения предохранителей в силовых электронных устройствах

#### Определение параметров предохранителей в выпрямительных схемах

В таблице 1 представлены параметры предохранителей для основных видов выпрямительных схем. Она позволяет определить следующие параметры предохранителей в питающих линиях и ветвях схем выпрямителей:

$I_{ph}/I_{dc}$  — отношение номинального тока предохранителя в линии к постоянному току в нагрузке;  
 $I_{br}/I_{dc}$  — отношение номинального тока предохранителя в ветви к постоянному току в нагрузке;  
 $U_{ac}/U_2$  — отношение максимального напряжения, приложенного к полупроводниковому прибору, к среднеквадратическому напряжению на входе схемы;  
 $U_{fu}/U_{dc}$  — отношение рабочего напряжения предохранителя (среднеквадратического) к постоянному напряжению холостого хода на выходе схемы.

Таблица 1. Сводная таблица определения параметров предохранителей в выпрямительных схемах

Упрощенная схема цепи	Тип устройства	Предохранитель в линии: FU-C		Предохранитель в ветви: FU-B	
		$I_{ph}/I_{dc}$	$I_{br}/I_{dc}$	$U_{ac}/U_2$	$U_{fu}/U_{dc}$
	Однофазный двухполупериодный фазовый регулятор	1,0	0,5	1,41	-
	Однофазный однополупериодный регулируемый выпрямитель	1,57	1,57	1,41	2,22
	Однофазный двухполупериодный выпрямитель	0,71	0,71	2,83	2,22
	Шестифазный однополупериодный выпрямитель	0,41	0,41	2,5	1,48
	Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель	1,0	0,71	1,83	1,11
	Трехфазный двухполупериодный выпрямитель	0,82	0,58	2,5	0,74
Схемы аналогичны однофазному двухполупериодному выпрямителю за исключением числа фазных ветвей	Шестифазный двухполупериодный выпрямитель	0,29	0,29	2,5	1,48
	Двенадцати фазный двухполупериодный выпрямитель	0,14	0,14	2,5	1,48

**Применение предохранителей в преобразователях**

На современном этапе схемы преобразователей частоты чаще всего строятся на основе быстродействующих IGBT. Сложная структура кристаллов IGBT определяет существенно меньшие значения защитного показателя по сравнению с таковым для тиристора с аналогичным номинальным током. Низкие величины защитных показателей IGBT практически исключают возможность их эффективной защиты даже с помощью самых быстродействующих предохранителей, которые не успевают ограничить быстро нарастающий ток коллекторной цепи IGBT, развивающийся в аварийной ситуации. Несмотря на то, что многие IGBT-модули снабжены системами контроля токовых и температурных нагрузок, они не могут полностью исключить возможности выхода из строя модулей при коротких замыканиях или отказе системы контроля. Обычно такие аварии завершаются разрушением модуля или взрывом конденсаторов в цепи.

Несмотря на то, что предохранители не в состоянии предотвратить электрический выход из строя отдельных IGBT и коммутируемых конденсаторов, они, тем не менее, успешно выполняют задачу защиты от лавинообразного развития аварийного процесса, ограничивая выделяющуюся в аварийной цепи энергию.

При выборе предохранителей аварийной защиты IGBT-преобразователей следует руководствоваться следующими критериями:

1. Время плавления перемычки у применяемых предохранителей при аварийном токе должно быть меньше, чем 1/6 периода частоты преобразования. Это время может быть определено исходя из скорости нарастания тока и защитного показателя плавления предохранителя.
2. Предохранитель должен быть рассчитан на разрыв цепи с напряжением, равным полному напряжению на входном конденсаторе в момент, предшествующий аварии.
3. Защитный показатель предохранителя (при максимальном напряжении) должен быть меньше, чем величина взрывающей энергии IGBT-модуля.
4. Коммутационное перенапряжение при гашении дуги в предохранителе должно быть меньше напряжения электрического пробоя защищаемых IGBT в закрытом состоянии.
5. Собственная индуктивность предохранителей должна быть по возможности минимальной.

На последний пункт следует обратить особое внимание. Из-за больших величин скорости нарастания тока в силовых цепях IGBT-преобразователей реактивности силовых цепей оказывают существенное влияние как на параметры преобразователя, его экономичность и надежность, так и на процесс развития аварийных ситуаций. В производственной программе SIBA есть специальная линейка предохранителей (серия URF), конструкция которых оптимизирована для получения очень низких значений собственной индуктивности. В частности, если средняя величина индуктивности стандартного предохранителя находится в районе 150–200 нГн, то для приборов серии URF индуктивность не превышает 10–15 нГн, что само по себе уже существенно ниже индуктивности токоведущих шин стандартных конструктивных решений преобразователей. Кроме того, оптимизация конструкции перемычки и выводов этой серии предохранителей значительно снизила их нагрев при токах, близких к номинальным. Предохранители этой серии могут работать в цепях как переменного, так и постоянного тока.

**Влияние температуры на свойства предохранителей**

Как уже было отмечено ранее, температура окружающей среды оказывает влияние на свойства предохранителей из-за изменения термодинамических условий работы плавкой перемычки. Влияние температуры окружающей среды на величину номинального тока обычно обозначают коэффициентом  $A_1$ , который рассчитывается по формуле:

$$A_1 = \sqrt{((a - t_{окр}) \div (a - 30))}, \quad (2)$$

где  $t_{окр}$  — температура окружающей среды, °C;  $a$  — максимально допустимая температура корпуса предохранителя, °C.

Если применяется принудительное охлаждение предохранителей, то возможно увеличение номинального тока в соответствии с коэффициентом, обозначаемым  $B_1$ :

$$B_1 = 1 + 0,05 \times VL, \quad (3)$$

где  $VL$  — скорость охлаждающего предохранитель воздуха, м/с.

Номинальный ток предохранителя в заданных условиях можно определить как:

$$I_F = I_L \div (A_1 \times B_1), \quad (4)$$

где  $I_F$  — номинальный ток предохранителя, А;  $I_L$  — максимальный рабочий ток в цепи, А.

**Работа предохранителей с изменяющейся нагрузкой**

Во многих случаях среднеквадратичный ток в цепи, защищаемой предохранителем, не постоянен и испытывает существенные изменения во времени. Возможна работа предохранителей в импульсных режимах при отсутствии или наличии предварительной нагрузки. Для формализации расчетов номинального тока предохранителя используют обобщенные временные диаграммы различных видов нагрузок, для которых по справочным материалам на конкретный тип предохранителя определяют два поправочных коэффициента —  $A_2$  и  $B_2$ . Первый коэффициент служит для расчета номинального тока предохранителя исходя из среднеквадратичного тока при циклической нагрузке, определяемого интегрированием на периоде цикла (или приближенным расчетам по прогнозируемому эпюрам тока в цепи).

Представление о возможном характере изменения тока в нагрузке дают эпюры огибающих циклического и непериодического токов, приведенные на рис. 17.

Минимально допустимое значение номинального тока предохранителя определяется как:

$$I_F = I_{RMS} \div A_2, \quad (5)$$

где  $I_{RMS}$  — среднеквадратичный ток в цепи за период цикла нагрузки, А.

Если нагрузка в цепи не обладает циклическим характером потребления, то необходимо проверить, каково значение условного максимального тока предохранителя в режиме случайной нагрузки, определяемое по формуле:

$$I_{FC1} = I_{LX} \div B_2, \quad (6)$$

где  $I_{LX}$  — максимальная величина импульса рабочего тока цепи, А.  $I_{LX}$  не выходит за пределы контрольной точки на времятоковой характеристике предохранителя выбранного типа при длительности, равной максимальному ожидаемому времени этого импульса.

**Работа предохранителей в условиях однократных рабочих перегрузок**

Время от времени в цепях могут возникать импульсные токи значительной величины, не являющиеся аварийными, как, например, пусковые токи трансформаторов, зарядные

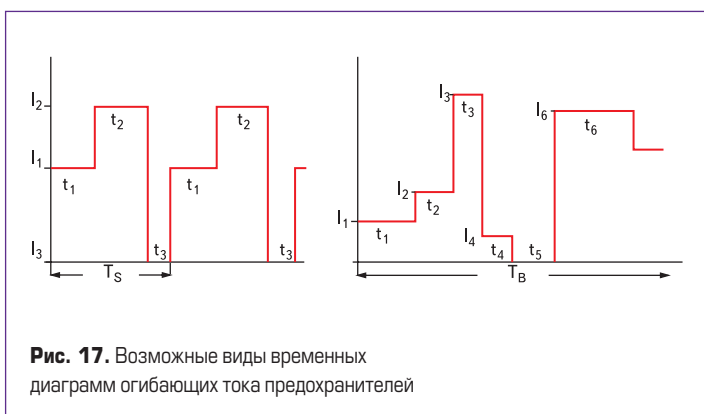


Рис. 17. Возможные виды временных диаграмм огибающих тока предохранителей

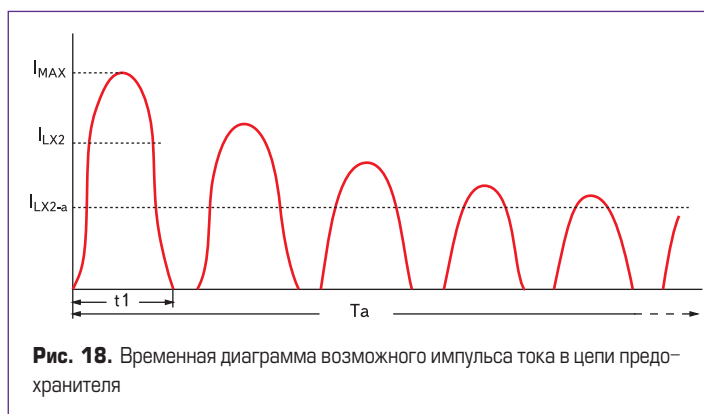


Рис. 18. Временная диаграмма возможного импульса тока в цепи предохранителя

токи конденсаторов фильтров выпрямителей и т. п. Предохранители не должны срабатывать при протекании в цепи таких токов. Эпюра возможного импульсного рабочего тока в цепи приведена на рис. 18.

В подобных случаях необходимо проверять, что ток предохранителя, рассчитанный по формуле:

$$I_{FC2} = I_{LX2} \div C\beta, \quad (7)$$

где  $C\beta$  — импульсный коэффициент, приводимый в справочных материалах;  $I_{LX2}$  — максимальная величина среднеквадратического тока для импульса рабочего тока цепи, А, не выходит за пределы времятоковой характеристики выбранного типа предохранителя для импульса заданной длительности, определенной из эпюры тока цепи.

### Работа предохранителей в цепях постоянного тока

В общем случае любые предохранители допускают работу в цепях как переменного, так и постоянного тока. Но обычно для предохранителей указывают рабочее напряжение именно при работе на переменном токе. В цепях постоянного тока, из-за большей скорости протекания процессов и отсутствия нулевых переходов тока цепи, на работу предохранителя в существенной мере оказывают влияние реактивные параметры цепи. Обычно параметры предохранителей на постоянном токе определяют экспериментально, в частности, для серий, специально разработанных для применения в цепях постоянного тока (серия URDC фирмы SIBA), такие параметры приводятся в справочных материалах.

Для оценки применимости произвольно взятого предохранителя для работы в цепях постоянного тока необходимо знать величину напряжения в цепи, то есть то напряжение, которое будет приложено к предохранителю после его срабатывания, и постоянную времени цепи. По-разному будут вести себя предохранители, защищающие цепи с низким внутренним сопротивлением источника (напряжение цепи практически постоянно в процессе срабатывания предохранителя) и цепи с емкостным характером импеданса источника (напряжение максимально в первый момент и далее снижается).

Реальные защищаемые цепи обладают заметной индуктивной составляющей, которая влияет на время плавления перемычки и на время горения дуги. Вместе с активным сопротивлением цепи эта индуктивность может создавать апериодические системы с собственными постоянными времени ( $\tau = L \div R$ ), величину которых удобно использовать в качестве параметра, определяющего поведение предохранителя.

В международных стандартах в качестве наиболее типичных величин постоянных времени цепей постоянного тока принимают 10 и 20 мс. Для реальных цепей постоянного тока характерны следующие постоянные времени:

- Аккумуляторные батареи — менее 2 мс.

- Инверторы, источники питания — менее 5 мс.
- Приводы постоянного тока, контактная сеть — 30–100 мс.
- Цепи с большой индуктивностью (трансформаторы) — до единиц секунд.

Чем выше постоянная времени цепи, тем ниже максимально допустимое постоянное напряжение цепи, в которой установлен предохранитель. Для цепи с постоянной времени 100 мс допустимая величина постоянного напряжения составляет порядка 50% от рабочего напряжения предохранителя на переменном токе.

При этом для ряда случаев применения предохранителей (например, в мощных преобразователях, из-за наличия колебательных процессов в защищаемых цепях) необходимо, чтобы величина допустимого постоянного рабочего напряжения была выше, чем величина переменной составляющей.

График снижения допустимой величины постоянного рабочего напряжения по отношению к нормируемому переменному в зависимости от постоянной времени цепи приведен на рис. 19.

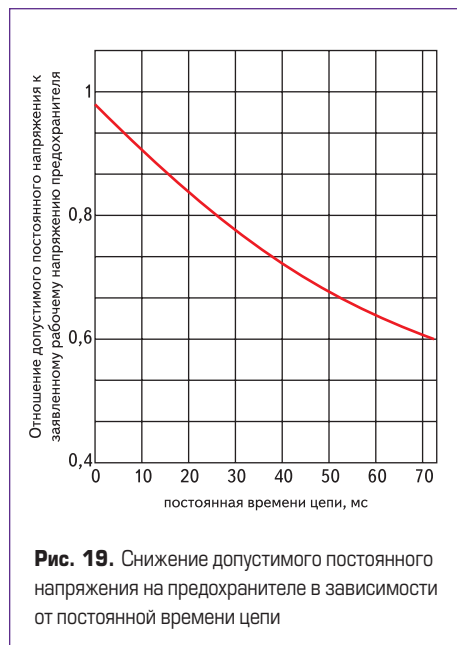


Рис. 19. Снижение допустимого постоянного напряжения на предохранителе в зависимости от постоянной времени цепи

Следует учитывать, что времятоковые характеристики предохранителей при работе на постоянном токе сохраняют свой вид до тех пор, пока постоянная времени цепи как минимум в 20 раз меньше, чем время плавления перемычки. При больших величинах постоянной времени возрастает величина защитного показателя по отношению к типовому значению. При менее чем пятикратном соотношении необходимо уменьшать величину рабочего тока предохранителя. При больших постоянных времени цепи желательно проверять величину защитного показателя плавления, определяя его из времятоковых характеристик.

Характеристики разрывного тока, приводимые в справочных данных, использовать для выбора предохранителей для цепей постоянного тока нежелательно, поскольку они измерялись на переменном токе частотой 50–60 Гц и будут существенно отличаться для постоянного тока. Разрывную характеристику можно приблизительно оценить исходя

из постоянной времени цепи, тока короткого замыкания цепи и защитного показателя плавления.

В общем случае, при отсутствии других исходных данных, считается, что ток короткого замыкания в цепи постоянного тока должен быть как минимум в 8 раз выше номинального тока предохранителя, чтобы обеспечивать надежное и быстрое срабатывание. Защиту от токов перегрузки тогда лучше осуществлять иными способами, в частности, по цепям управления полупроводниковых ключей, используя датчики тока (которыми могут быть и сами предохранители, как это рассматривалось ранее).

Если нет каких-либо принципиальных ограничений, то в цепях постоянного тока следует применять специально разработанные для этого предохранители, либо те, в справочных материалах которых особо отговаривается возможность работы на постоянном токе.

### Общие особенности выбора и эксплуатации предохранителей

Кратко подытожим рассмотренные особенности выбора и эксплуатации предохранителей:

1. Электрические:

- $I_B < I_N$ : продолжительный ток нагрузки всегда должен быть меньше номинального тока предохранителя. При этом необходимо обязательно учитывать все коэффициенты снижения номинального тока в зависимости от температуры, циклов нагрузки и т. д.
- $U_B < U_N$ : напряжение на предохранителе после срабатывания должно быть меньше, чем рабочее напряжение предохранителя, с учетом всех факторов, понижающих его рабочее напряжение.
- $I t_A < I t_{TSM}$ : защитный показатель предохранителя должен быть меньше защитного показателя полупроводникового прибора. При отсутствии справочных данных защитный показатель полупроводникового прибора может быть определен из величины ударного неповторяющегося тока  $I_{TSM}$  и времени его воздействия  $t$  по формуле:

$$I t = (I_{TSM} \div 1,41)^2 \times t$$

- $U_L < U_{RRM} / D_{RM}$ : коммутационное перенапряжение при горении дуги в предохранителе не должно превышать максимально допустимого прямого напряжения в закрытом состоянии и максимально допустимого обратного напряжения защищаемого полупроводникового прибора.
- $I K^{\alpha} < I K_{max}$ : в любом случае применения, максимальный ток в защищаемой цепи, в том числе и возникающий за счет ее реактивных свойств, не должен превышать значение разрывной способности предохранителя. Только в этом случае можно гарантировать надежную защиту в аварийной ситуации.

2. Механические, климатические и установочные:

- а) температура в месте установки предохранителя не должна превышать допустимого по ТУ рабочего диапазона температур прибора;
- б) при установке предохранителей желательно использовать штатные держатели и зажимы, поставляемые производителями предохранителей;
- в) для упрощения контроля за состоянием систем защиты следует пользоваться штатными средствами контроля, предусмотренными конструкцией предохранителей, в частности, контрольными микропереключателями;
- г) механические воздействия, в том числе вибрации и ударные нагрузки, следует по возможности минимизировать, и в любом случае они не должны превышать величин, нормируемых в справочных материалах. При использовании предохранителей на подвижных объектах, в частности, на электротранспорте, необходимо выби-

рвать приборы, спроектированные согласно IEC 61 373.

Конструктивные, электрические и другие параметры предохранителей нормируются следующими международными стандартами:

IEC 60269 — общий стандарт на приборы плавкой защиты;

IEC 60077 — стандарт на предохранители для электрического подвижного состава;

IEC 60127 — стандарт на малогабаритные предохранители;

IEC/TR2 60146-6 — руководство по защите полупроводниковых преобразователей с помощью плавких предохранителей.

В заключение хотелось бы выразить признательность компании SIBA, лично господам Михаэлю Шроеру (Michael Schroer, Unit Manager Miniature/sub-miniature Fuses) и Линасу Алишкевичюсу (представителю компании SIBA в России) за любезно предоставленную информационно-техническую поддержку и образцы продукции.

#### Литература

1. Официальный сайт компании SIBA: [www.siba.de](http://www.siba.de)
2. IEC 60 269 — 1 Low voltage fuses. Part 1. General requirements.
3. IEC 60 269 — 4 Low voltage fuses. Part 4. Supplementary requirements for fuse-links for the protection of semiconductor devices.
4. IEC 60 269 — 4-1 Low voltage fuses. Part 4-1. Examples of types of standardized fuse-links.
5. IEC 60 077 — 5 Railway applications. Electric equipment for rolling stock. Part 5. Electrotechnical components — Rules for HV Fuses.
6. IEC 60 127 — 1 Miniature fuses. Part 1. Definitions for miniature fuses and general requirements for miniature fuse-links.
7. IEC/TR2 60 146 — 6 Semiconductor converters. Part 6. Application guide for the protection of semiconductor converters against over-current by fuses.
8. The Fuse Manual. Ultra-rapid Fuses. SIBA GmbH & Co. KG, 2006
9. Чебовский О. Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы: справочник. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.