

Модули SEMISTART

для устройств плавного пуска

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором получили широкое распространение благодаря надежной конструкции, простоте технического обслуживания и дешевизне. Однако пусковые токи, возникающие при прямом включении асинхронных машин средней и большой мощности, приводят к значительным перегрузкам сети. Резкое сопутствующее возрастание момента при наличии люфтов и зазоров создает динамические удары в трансмиссии привода. Самым простым решением проблемы является использование тиристорных устройств плавного пуска (УПП) или «софт-стартеров».

Андрей КОЛПАКОВ

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В 2004 году по заказу Siemens — одного из крупнейших европейских производителей УПП — компания SEMIKRON разработала серию специализированных тиристорных модулей. С 2007 года компоненты серии SEMISTART [1–4], прошедшие серьезную проверку, стали доступны на широком рынке. Основное отличие новых силовых ключей — сверхнизкое значение внутреннего теплового сопротивления, достигнутое за счет применения конструктива, обеспечивающего прямое двустороннее охлаждение кристаллов. При проектировании модулей использовалась технология прижимного контакта (pressure-contact technology), разработанная SEMIKRON в начале 1990-х годов и предназначенная для повышения стойкости к термоциклированию.

Особенности конструкции SEMISTART

В стандартных изолированных модулях соединение чипов с керамической DCB-платой и платы с медным основанием производится с помощью пайки. Такие ключи допускают только односторонний способ охлаждения: тепло, выделяемое силовыми чипами, отводится на радиатор через изолирующую керамическую подложку и медную базовую плату. Подобная конструкция имеет невысокую стойкость к термоциклированию из-за различия коэффициентов теплового расширения (КТР) сопрягаемых элементов: медного основания и керамической подложки, керамики и кремниевых чипов, кристаллов и алюминиевых выводов. В условиях циклического изменения температуры в паяных и сварных соединениях накапливается усталость, при длительной эксплуатации это приводит к разрушению структуры соединительных слоев, резкому увеличению теплового сопротивления, перегреву кристаллов и выходу их из строя.

Устройство модуля SEMISTART показано на рис. 1. Два тиристорных чипа (Silicon Controlled Rectifier, SCR), включенных встречно-параллельно, расположены между теплоотводами, одновременно являющимися силовыми терминалами анода и катода. Все внутренние соединения SEMISTART осуществляются только за счет прижима без применения пайки или сварки. Сочленение радиаторов производится с помощью крепежных винтов специальной формы и тарельчатых шайб, что позволяет поддерживать необходимую величину сжимающего усилия в течение всего срока службы.

Для лучшего согласования коэффициентов теплового расширения в условиях пиковых перегрузок между чипами и радиаторами устанавливаются молибденовые пластины, КТР которых имеет промежуточное значение между кремнием и алюминием. На верхнем теплостоке имеется поперечный разрез, увеличивающий гибкость конструкции и способствующий снижению взаимного теплового

влияния кристаллов. Затворы тиристорных подключены к выводам управления с помощью пружинных контактов. Такая конструкция позволяет повысить стойкость модулей к термоциклированию, вибрационным нагрузкам и обеспечить большой срок службы при использовании в многократных пусковых режимах.

Тепловое сопротивление

Как и для всех электронных элементов, статическое тепловое сопротивление R_{th} модулей SEMISTART определяется разностью температур, возникающей при рассеянии мощности P_v в установившемся состоянии:

$$R_{th(1-2)} = \Delta T / P_v = (T_1 - T_2) / P_v.$$

Поскольку у компонентов данного типа отсутствует корпус в его классическом понимании, в документации дается измеренное значение теплового сопротивления

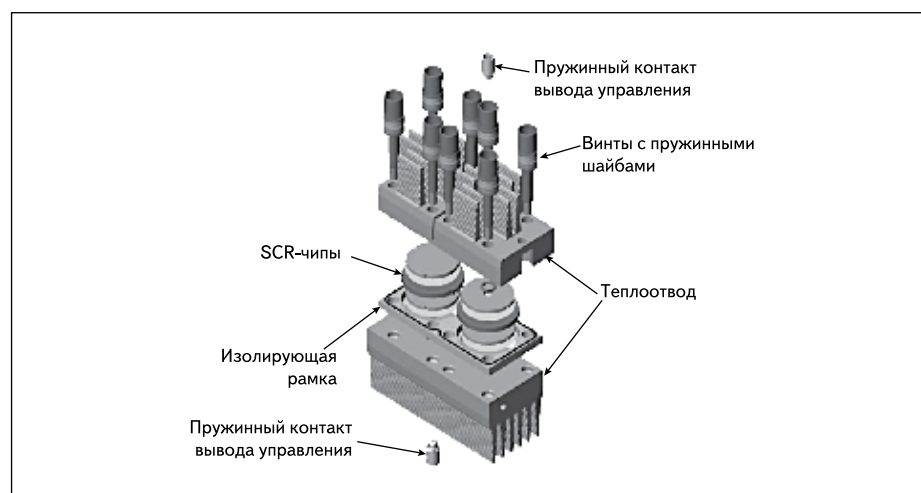


Рис. 1. Особенности конструкции модулей SEMISTART

«кристалл – радиатор» $R_{th(j-s)}$. Как видно из приведенного выше выражения, R_{th} зависит от градиента температуры в 2 точках, поэтому их положение играет важную роль для нормирования этого параметра [5]. Для модулей семейства SEMISTART перегрев кристаллов T_j определяется относительно точки, расположенной на боковой поверхности радиатора рядом с отверстием, в котором размещается термодатчик. Данная зона, где производится измерение величины T_s , видна на проекции «View B» чертежа, приводимого в технических характеристиках.

При увеличении размера модуля контрольная точка удаляется от чипа, соответственно тепловое сопротивление растет, поэтому значение R_{th} может быть использовано для оценки перегрева чипа, но не для задания величины предельного тока. Модули SEMISTART не предназначены для работы в условиях постоянной длительной нагрузки, поэтому величина теплового сопротивления для них более важна. Благодаря мощной базе радиаторы SEMISTART способны кратковременно концентрировать большое количество тепла, которое рассеивается в течение определенного времени после замыкания тиристора байпасным ключом.

При включении «холодного» модуля его тепловое сопротивление оказывается меньше статического значения, приведенного в спецификации, что объясняется большой внутренней теплоемкостью корпуса. Выражаясь терминами эквивалентной электрической схемы, эта емкость «заряжается» тепловой энергией, генерируемой при работе силового ключа. При этом величина параметра R_{th} непрерывно увеличивается, и до наступления насыщения процесс ее нарастания отображает график динамического теплового импеданса Z_{th} . После того как внутренняя теплоемкость оказывается полностью заряженной, начинается излучение тепла в окружающую среду. При этом Z_{th} достигает своего максимального значения, равного статическому значению R_{th} . Таким образом, величина динамического теплового импеданса позволяет определить стойкость силового ключа к кратковременным перегрузкам.

Основные технические характеристики

С точки зрения конструкции модули SEMISTART являются нестандартными, поскольку они не имеют корпуса, а теплосток, между которыми зажаты силовые чипы, используются как силовые терминалы. Компоненты серии предназначены для работы в условиях кратковременных перегрузок, поэтому радиаторы SEMISTART имеют массивную базу и небольшие ребра. Этим они отличаются от классических радиаторов с тонким основанием и высокой эффективной площадью охлаждения, предназначенных для постоянного отвода тепла.

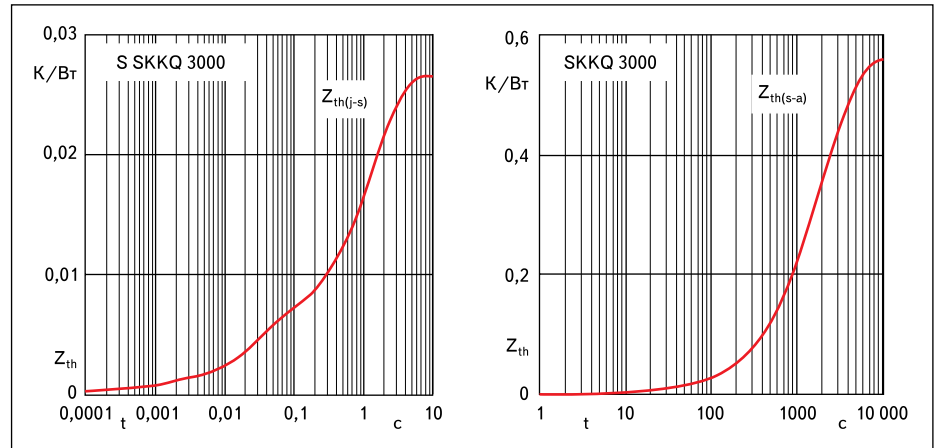


Рис. 2. Графики динамического теплового импеданса для SKKQ 3000

Параметры SEMISTART нормированы для режима кратковременного пуска при естественной конвекции с учетом того, что охлаждение до начальной температуры происходит в течение бестоковой паузы. Поэтому имеет смысл уточнить значение основных технических характеристик, приводимых в документации на компоненты этого семейства. Приведенные ниже пояснения будут полезны всем специалистам, работающим с тиристорными модулями.

- $I_{overload}$ — среднеквадратичное значение (rms) тока перегрузки. Для SEMISTART величина $I_{overload}$ нормируется при условии протекания тока в течение не более 20 с, температура кристаллов за это время не должна превысить 150 °С.
- I_{TSM} — ударный ток тиристора в открытом состоянии. Это пиковое значение для одиночного полусинусоидального импульса длительностью 10 мс (50 Гц). После воздействия импульса тока I_{TSM} различной длительности тиристор должен выдерживать обратное напряжение, величина которого задается на графике 7 технических характеристик.
- I^2t — интегральный показатель токовой защиты. Параметр определяется при 2 значениях температуры кристалла: 25 и 125 °С. Эта величина позволяет корректно выбрать предохранитель, предназначенный для защиты тиристора при коротком замыкании цепи. Значение I^2t предохранителя для конкретного входного напряжения должно быть меньше чем для тиристора при $t = 10$ мс. При увеличении рабочей температуры I^2t предохранителя падает быстрее, чем у силового ключа. Как правило, при выборе достаточно сравнить величину этого параметра для тиристора и ненагруженного предохранителя при 25 °С.
- V_{RSM} — пиковое значение неповторяющегося обратного напряжения в динамическом режиме.
- V_{RRM} — пиковое значение повторяющегося обратного напряжения в динамическом режиме.

- V_{DSM} — максимальное значение обратного напряжения в закрытом состоянии.
- $V_{T(To)}$ — пороговое напряжение прямой характеристики, r_t — резистор, задающий коэффициент наклона прямой характеристики. Эти два параметра определяют верхние граничные значения кривой зависимости прямого напряжения от тока $V_T = f(I_T)$, с их помощью рассчитывается мгновенное значение мощности рассеяния P_T или среднего значения потерь проводимости P_{TAV} :

$$P_T = V_{T(To)} \times I_T + r_t \times I_T^2,$$

$$P_{TAV} = V_{T(To)} \times I_{TAV} + r_t \times I_{TRMS}^2$$

где Θ — угол отсечки тока; I_T — мгновенное значение прямого тока; I_{RMS} — среднеквадратичное значение прямого тока; I_{TAV} — среднее значение прямого тока; для прямоугольных импульсов — $I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 = 360^\circ / \Theta$; для полусинусоидальных импульсов — $I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 = 2,5$ или $I_{TRMS}^2 / I_{TAV}^2 = (\pi/2) \times 2 \times 180^\circ / \Theta$.

- I_{DD} — прямой ток в выключенном состоянии. Это значение нормируется при максимальном обратном напряжении и фиксированной температуре. С ростом температуры I_{DD} увеличивается экспоненциально.

На рис. 3 представлены временные диаграммы управляющего сигнала V_G и напряжения «анод – катод» V_{AK} поясняющие процесс запуска тиристора.

На рисунке использованы следующие обозначения:

- t_{gd} — время задержки включения. Интервал времени между подачей импульса включения и моментом, когда напряжение V_{AK} падает на 90% от начального значения. В документации указывается типовое значение для следующих условий:
 - прямоугольный импульс управления длительностью 100 мкс;
 - начальное значение V_{AK} равно половине V_{DRM} ;
 - прямой ток достиг величины $0,1 I_{TAV}$ (нормируемого при 85 °С);

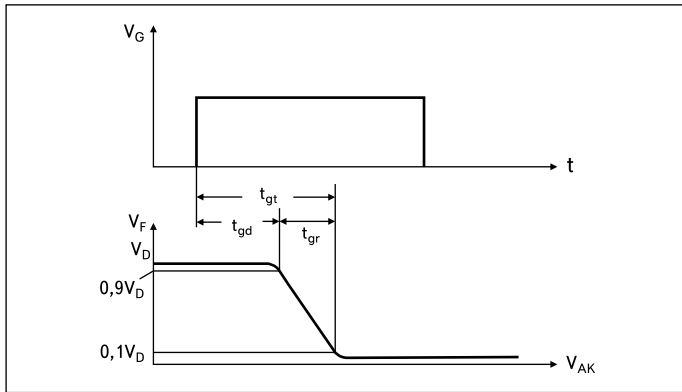


Рис. 3. Временные диаграммы включения тиристора

– температура кристалла при включении — примерно 25 °С.

- t_{gr} — время включения. Интервал времени, в течение которого напряжение V_{AK} падает с 90% до 10% от начального значения при запуске тиристора.
- t_{gd} — длительность протекания тока управления затвором. Сумма t_{gd} и t_{gr} .
- $(di/dt)_{cr}$ — критическая скорость нарастания напряжения при выключении. Параметр нормирован для случая экспоненциального нарастания напряжения «катод – анод» до уровня $0,66 V_{DRM}$. При превышении этого значения может произойти самопроизвольное отпирание и пробой тиристора.
- $(di/dt)_{cr}$ — критическая скорость нарастания тока при включении. В начале процесса включения только часть чипа тиристора проводит электрический ток, это и является причиной того, что скорость его нарастания должна быть ограничена. В документации указывается типовое значение для следующих условий:
 - Частота изменения тока нагрузки 50–60 Гц.
 - Пиковое значение тока не превышает максимально допустимое значение для синусоидального импульса.
 - Ток затвора равен пятикратному номинальному значению при скорости нарастания не менее 1 А/мкс.

Величина критического значения di/dt падает с увеличением частоты и растет при уменьшении пикового значения прямого тока. По этой причине на частотах более 60 Гц и при высокой скорости нарастания тока управления допустимое значение пикового прямого тока должно быть снижено относительно справочного значения.

- i_H — ток удержания. Минимальная величина анодного тока, при которой тиристор остается в открытом состоянии при температуре 25 °С, при снижении температуры значение i_H может превысить справочное значение.
- I_L — ток срабатывания. Минимальная величина анодного тока, при которой тиристор переходит в открытое состояние по окончании импульса управления длительностью

10 мкс. Условия нормирования этого параметра такие же, как для критической скорости нарастания тока включения.

- V_{GT} , I_{GT} — напряжение и ток включения затвора. Минимальные значения напряжения/тока прямоугольного импульса управления длительностью более 100 мкс, они могут возрасти при уменьшении длительности импульса t_p . Например, при $t_p = 10$ мкс значение I_{GT} увеличивается в 1,4–2 раза. Схема управления затвором должна проектироваться таким образом, чтобы обеспечивать ток затвора, в 4–5 раз превышающий номинальное значение. Когда к тиристорам прикладывается обратное напряжение, сигнал на затворе должен отсутствовать. Это позволяет исключить недопустимое возрастание обратных коммутационных потерь и образование локальных зон перегрева на кристаллах.
- V_{GD} , I_{GD} — максимальное напряжение и ток сигнала помехи. Максимальные уровни индукционных и емкостных помех, не приводящие к включению тиристора в диапазоне рабочих температур.
- $R_{th(x-y)}$, $Z_{th(x-y)}$ — тепловое сопротивление и динамический тепловой импеданс. У компонентов SEMISTART данные параметры определяются для кристалла (j), радиатора (s), окружающей среды (a). Динамические кривые $Z_{th(j-s)}$ и $Z_{th(s-a)}$ в функции вре-

мени приводятся на рис. 3 и 4 спецификации модуля (рис. 2). При $t > 1$ для вычисления теплового сопротивления величина $Z_{th(s-a)}$ должна добавляться к $Z_{th(j-s)}$.

Программа испытаний

Как и вся продукция, выпускаемая компанией SEMIKRON, модули SEMISTART подвергаются 100%-ному контролю параметров. Состав и условия проведения квалификационных испытаний приведены в таблице 1. При проведении тестов ставятся следующие задачи:

- подтверждение качества и надежности компонентов;
- определение предельных режимов работы модуля в различных условиях эксплуатации;
- обеспечение согласованности и повторяемости производственного процесса;
- оценка существующих технологий производства и их модификация, направленная на повышение надежности.

На рис. 4 приведены относительные значения пикового тока перегрузки $I_{F(OV)}$, приведенные к величине максимального прямого тока I_{FSM} в функции длительности режима аварии t . Семейство графиков нормируется в зависимости от пикового обратного напряжения V_{RRM} , воздействующего на ключ

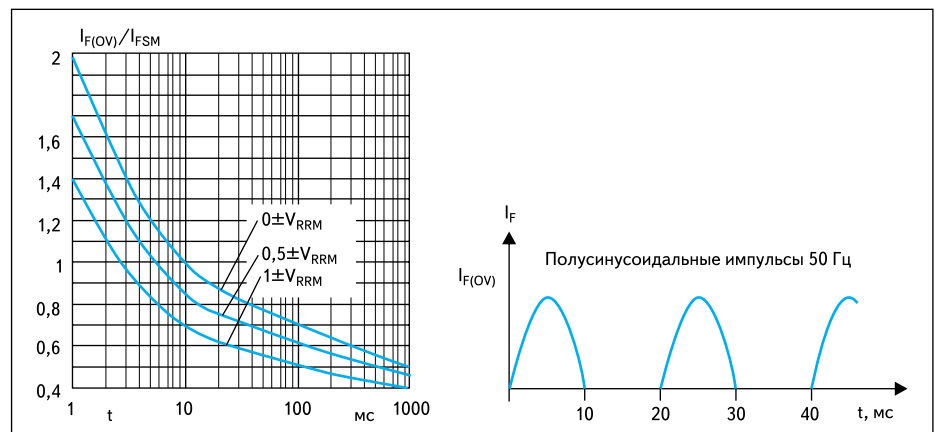


Рис. 4. Временные диаграммы тока перегрузки

сразу после прерывания аварийного тока. Если перегрузка продолжается более 10 мс, предполагается, что форма тока представляет собой серию полусинусоидальных импульсов с периодом повторения 20 мс. На рисунке представлены кривые для трех аварийных ситуаций:

- $0 \times V_{RRM}$ — обратное напряжение не прикладывается.
- $0,5 \times V_{RRM}$ — приложенное обратное напряжение равно половине максимально допустимого значения.
- $1 \times V_{RRM}$ — приложенное обратное напряжение равно максимально допустимому значению.

Двусторонний алюминиевый радиатор охлаждения SEMISTART имеет существенно больший коэффициент теплового расширения (КТР или СТЕ, Coefficients of thermal expansion), чем кремниевые кристаллы. Испытания подобной конструкции на стойкость к термоциклированию чрезвычайно важны для оценки ее надежности, поскольку SEMISTART работает в условиях циклических нагрузок. Основными параметрами, контролируемыми в ходе данных тестов, являются тепловое сопротивление, а также прямая и обратная характеристики. Стабильность этих показателей позволяет оценить способность модулей противостоять воздействию термомеханических стрессов.

Условия проведения испытаний на пассивное термоциклирование, когда компоненты перемещаются между камерами с минимальной и максимальной температурой и равномерно остывают и прогреваются, отличаются от реальных режимов работы. Подобное состояние в большей степени имитирует изменение температуры окружающей среды, которое также воздействует на структуру модуля. Однако в реальности основные градиенты создаются между кремниевыми чипами и окружающей средой за счет потерь мощности. Именно поэтому производители силовой элементной базы проводят испытания на активное термоциклирование, когда нагрев кристаллов создается протекающим током. При этом время цикла может быть достаточно коротким, а их количество — очень большим, аппроксимированным со сроком службы. Имитируемые в таких условиях термомеханические стрессы оказываются по своему действию очень близки к реальным воздействиям.

При испытаниях на активное термоциклирование силовой модуль размещается на жидкостном радиаторе, при этом система охлаждения поддерживает стабильную температуру корпуса. С заданной периодичностью чипы разогреваются до предельной температуры T_{jmax} с помощью коротких импульсов тока и далее охлаждаются до уровня T_{jmin} . Таким образом создается термоцикл. Соответствующая кривая изменения температуры относительно среднего значения T_{jm} показана на рис. 5.

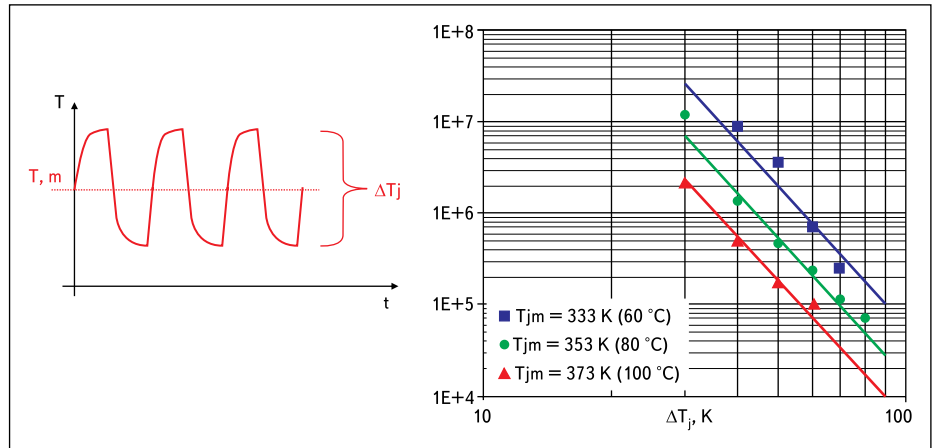


Рис. 5. Кривая термоциклирования, зависимость количества циклов до отказа N_f от градиента температуры кристалла ΔT_j и ее среднего значения T_{jm} (жирные точки — экспериментальные результаты тестов LESIT, линии — расчетные значения в соответствии с выражением для N_f)

Термомеханические напряжения, воздействующие на конструкцию стандартных силовых ключей вследствие циклического изменения температуры, приводят к накоплению усталости и постепенному разрушению паяных и сварных соединений. Повреждение начинается с небольших трещин, возникающих на краях контактной зоны и постепенно проникающих в ее центр. Причина возникновения стрессов — в разнице коэффициентов теплового расширения сопрягающихся материалов: меди (базовая плата), керамики (подложка) и кремния (чипы). Типичным следствием воздействия множественных термоциклов является, например, отрыв алюминиевых выводов чипов от металлизации подложки вследствие разницы КТР алюминия и меди. Основное преимущество конструкции модулей прижимного типа, к которым относится SEMISTART, — это отсутствие жестких сварных и паяных соединений.

Чем выше градиент ΔT , тем больше термомеханическое напряжение, а при увеличении среднего значения температуры T_m возрастает так называемая энергия активации, ускоряющая старение и образование трещин. Срок службы силового ключа, работающего в режиме циклической нагрузки, можно определить как функцию параметров цикла. Интенсивное изучение этого вопроса проводилось в 1990-х годах в рамках европейского проекта, известного как LESIT. Одним из основных результатов исследований LESIT стало формирование аналитического выражения, описывающего зависимость количества циклов до отказа N_f от градиента ΔT_j и среднего значения температуры кристалла T_{jm} :

$$N_f = A \times \Delta T_j^\alpha \times \exp\left(\frac{Q}{R \times T_{jm}}\right),$$

где $A = 640$; $\alpha = -5$; $Q = 7,8 \times 10^{-4}$ Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/моль·К.

Все приведенные выше соображения и формула LESIT применимы и к модулям

SEMISTART. Однако, поскольку их конструкция является прижимной, выражение для N_f и семейство графиков, приведенных на рис. 5, следует использовать для анализа «наихудшего случая».

Защита от перегрузок

Чипы диодов и тиристоров, как и любые полупроводниковые структуры, чувствительны к перегрузке по напряжению. Любое превышение нормированного предельного значения V_{RRM} , V_{DRM} может привести к повреждению кристалла. Для ограничения переходных коммутационных перенапряжений существует ряд проверенных решений, к которым относятся:

- RC-снабберные цепи;
- варисторы и полупроводниковые ограничители (transient voltage suppressors, TVS).

RC-снаббер совместно с индуктивностью цепи образует последовательный колебательный контур, который демпфирует острые пики переходных сигналов и трансформирует их в синусоидальные колебания меньшей амплитуды. Энергия короткого переходного импульса высокой амплитуды преобразуется в энергию малого, протяженного во времени сигнала.

Варисторы и TVS имеют нелинейную характеристику, их динамическое сопротивление падает при увеличении прикладываемого напряжения. Вместе с сопротивлениями и индуктивностями схемы полупроводниковый ограничитель образует нелинейный делитель напряжения, снижающий амплитуду переходного выброса до определенного уровня. В этом случае энергия сигнала по мехи распределяется на больший период времени и почти полностью поглощается структурой TVS. Полупроводниковые ограничители могут быть установлены между входами цепи питания, параллельно DC-шине или параллельно силовым ключам преобразователя.

Таблица 2. Основные технические характеристики SEMISTART (рабочее напряжение для всех типов $V_{RRM} = 1800$ В)

	SKKQ 560	SKKQ 800	SKKQ 1200	SKKQ 1500	SKKQ 3000
I_{ovt} , А (20 с)	560	800	1225	1500	3080
I_{TSM} , А	5700	5700	9500	17000	30000
$R_{th(j-c)}$, °С/Вт	0,106	0,106	0,066	0,037	0,026

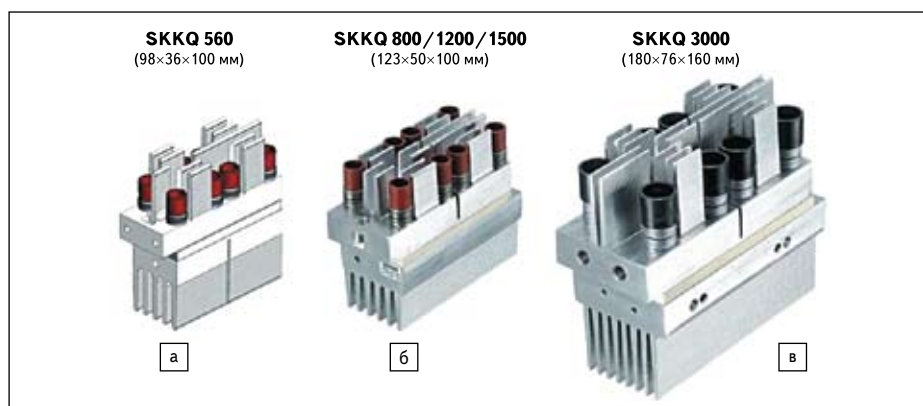


Рис. 6. Типы модулей и корпусов SEMISTART:

а) SKKQ 560 (98×36×100 мм); б) SKKQ 800/1200/1500 (123×50×100 мм); в) SKKQ 3000 (180×76×160 мм)

Каждый из указанных методов имеет свои преимущества и недостатки, выбор должен делаться для конкретного применения. RC-снабберы, как правило, устанавливаются параллельно тиристорам для защиты от коммутационных перенапряжений. Они создаются самими ключами, имеют известную скорость нарастания, поэтому нормирование элементов снаббера не представляет особой сложности. Полупроводниковые ограничители способны защитить элементы схемы не только от динамических выбросов, но и от помех со стороны питающей сети.

Защита тиристоров от короткого замыкания в сети производится с помощью быстрых полупроводниковых предохранителей, выбор которых необходимо производить на основании параметра I^2t . Предохранители исполь-

зуются и в цепях параллельно включенных тиристоров, что позволяет исключить аварийный элемент из параллельной цепи. Для защиты от длительных токовых перегрузок также применяются электромагнитные и тепловые защитные устройства, недостатком которых является отсутствие реакции на кратковременные всплески тока. Поэтому термодатчики, как правило, применяются для мониторинга перегрева в случае отключения вентилятора в системах с принудительным воздушным охлаждением.

Расчет допустимого значения прямого тока в кратковременном режиме или на частотах ниже 40 Гц следует проводить на основе графика динамического теплового импеданса. При этом используется методика, аналогичная анализу работы схемы в импульсном режи-

ме. При правильном выборе режима работы и способа охлаждения температура кристалла T_j ни при каких условиях не должна превышать заданных допустимых значений.

Номенклатура SEMISTART

Модули SEMISTART выпускаются в трех типах корпусов, они предназначены для работы в диапазоне стартовых токов I_{ovt} 500–3000 А при нормированном времени пуска 20 с. Типы корпусов и названия компонентов семейства показаны на рис. 6, а основные технические характеристики приведены в таблице 2.

Как уже было сказано, параметры компонентов серии SEMISTART нормированы для режима пуска асинхронного двигателя (время выхода на рабочий режим — 20 с) при естественном охлаждении. Для определения рабочих характеристик в условиях, отличающихся от номинальных, следует воспользоваться графиками, которые приводятся в технической документации. Модули SEMISTART могут быть использованы и в режиме принудительного воздушного охлаждения, что позволяет сократить допустимое время между пусками.

Литература

- Schäfer N., Herrmann R. Soft-Start Control of Electric Motors. Power Electronics Europe, Issue 1, 2007.
- Schäfer N., Gill M. SEMISTART — modules for soft start applications. SEMIKRON International, 2007.
- Gill M. SEMISTART products. Technical explanations. SEMIKRON International, 2009.
- Колпаков А. SEMISTART — модуль софт-стартера // Силовая электроника. 2007. № 3.
- Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк // Электронные компоненты. 2005. № 6.