

SEMiSTART:

модули для устройств плавного пуска

Общей тенденцией современного рынка силовой электроники является уменьшение габаритов преобразовательных устройств при одновременном повышении их мощности. Для успешного решения этой задачи приходится кардинально изменять архитектуру силового модуля, чтобы повысить перегрузочную способность или обеспечить более эффективный отвод тепла. В устройствах плавного пуска (софт-стартерах) полупроводниковые кристаллы используются в условиях экстремальных токовых и тепловых нагрузок. Поскольку софт-стартер работает в постоянных циклических режимах, стойкость к термоциклированию является одним из основных параметров, определяющих длительность срока службы. Новые модули SEMiSTART компании SEMIKRON являются первыми силовыми ключами, специально разработанными для применения в устройствах плавного пуска асинхронных двигателей.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором — самый известный тип электродвигателей, применяемых в промышленности. Широкое распространение они получили благодаря надежной конструкции, простоте технического обслуживания и дешевизне. На среднем промышленном предприятии парк приводов на основе асинхронных машин может достигать сотен, а то и тысяч единиц. И если у маломощных двигателей проблем с пуском обычно не бывает, то для моторов средней и большой мощности (от 75 кВт и выше) прямое включение приводит к возникновению значительных пусковых токов, а момент двигателя при этом может превысить допустимое значение. Кроме того, резкое изменение момента при наличии люфтов и зазоров приводит к динамическим ударам в трансмиссии привода.

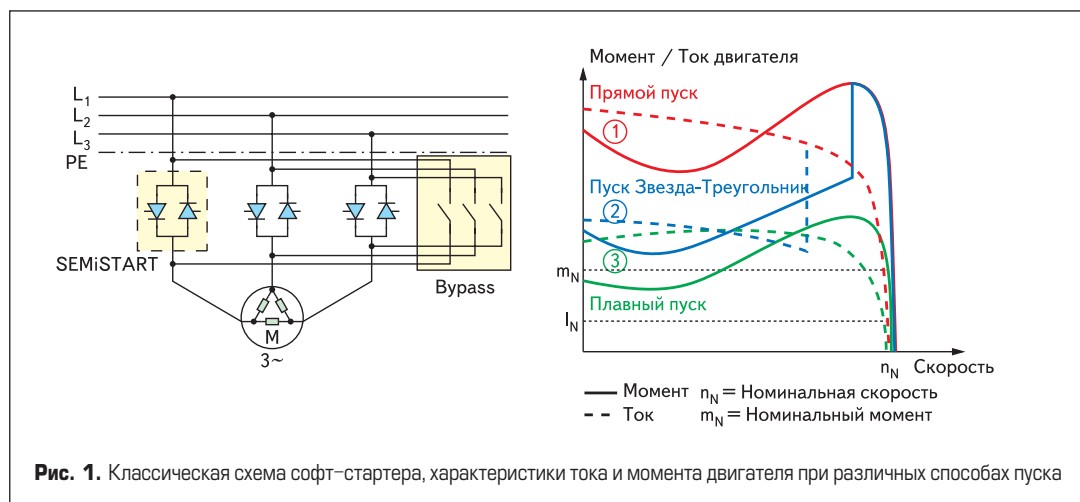
Три года назад по заказу Siemens — одного из крупнейших европейских производителей устройств плавного пуска, — компанией SEMIKRON была разработана серия специализированных тиристорных модулей. Теперь модули SEMiSTART, прошедшие серьезную проверку временем, стали доступны на широком рын-

ке. Основным отличием новых силовых ключей является сверхнизкое значение внутреннего теплового сопротивления, достигнутое благодаря разработке инновационного 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.

Основной задачей, решаемой разработчиками SEMiSTART, было обеспечение высокой долговременной надежности работы антипараллельного тиристорного каскада при высоких токах перегрузки. На практике для асинхронных моторов используется 3 способа запуска (соответствующие графики приведены на рис. 16).

Прямой пуск от сети

Режим старта асинхронного двигателя непосредственно от сети характеризуется крайне высокими значениями пускового тока и момента (см. красные эпо-



ры на рис. 16). Периодические включения с большим моментом трогания неизбежно приводят к механическим повреждениям и постепенному разрушению мотора и элементов привода, типичным примером может служить обрыв ленты конвейера. Стартовые перегрузочные токи вызывают возникновение всплесков напряжения в питающей сети, и чем выше значение этих токов, тем более серьезные проблемы могут возникнуть при эксплуатации привода.

Величина пускового тока для большинства асинхронных двигателей лежит в пределах $4...7 \cdot I_{ном}$ и зависит от множества параметров электродвигателя (активное сопротивление обмоток, количество полюсов двигателя, величина зазора между ротором и статором, количество и форма пазов для укладки обмоток, конструкция «беличьей клетки», обмотки ротора и т. д.).

Недостатки прямого пуска очевидны:

- снижение срока службы коммутационных элементов;
- снижение срока службы электродвигателя;
- перегрузка питающей сети (трансформатора подстанции), особенно если есть вероятность одновременного запуска нескольких двигателей;
- падение напряжения в сети негативно влияет и на процесс запуска двигателя, и на остальных потребителей электрической энергии;
- резкое изменение момента двигателя приводит к дополнительному износу трансмиссии привода, динамическим ударам в технологическом оборудовании.

Для устранения описанных нежелательных эффектов необходимо ограничивать величину пускового тока и момента, то есть управлять напряжением, подаваемым на двигатель.

Пуск с переключением со звезды на треугольник

Простейшим способом снижения пусковых перегрузок является так называемый режим старта с переключением со звезды на треугольник (в англоязычной литературе он называется *wye-delta start*). В этом случае статорные обмотки мотора перед пуском включаются звездой, а после того как скорость вращения достигнет номинального значения, соединение меняется на треугольник (синие графики на рис. 16). В результате напряжение на каждой обмотке в пусковом режиме составляет $1/\sqrt{3}$, то есть менее 60% от номинального значения, что и позволяет снизить величину пускового тока и момента. Переключение соединения, как правило, производится механическим коммутатором. Момент изменения схемы обмоток отмечен ступенькой на графиках — обратите внимание на то, что последующий всплеск тока и момента практически приближают описанную схему к варианту прямого пуска. Еще одним существенным недостатком схемы старта «звезда – треугольник» является использование механических контакторов, склонных к быстрому износу из-за искрения контактов. Необходимость их периодической замены делает описанную схему достаточно тяжелой в обслуживании и малонадежной.

Плавный пуск

Наиболее популярными схемами, позволяющими регулировать и ограничивать величину стартовых токов асинхронных двигателей, являются устройства плавного пуска. В классической схеме софт-стартера (рис. 1а) встречно-параллельно соединенные тиристорные модули включаются между обмотками мотора и питающей сетью. В процессе выхода двигателя на рабочий режим напряжение на обмотках регулируется с помощью изменения фазы открывания тиристорных. Контролируя время проводящего состояния тиристорных ключей, можно управлять величиной пускового тока и момента, а также изменять скорость разгона.

При протекании пусковых токов через полупроводниковые модули в них рассеивается мощность, определяемая величиной прямого падения напряжения (V_T для тиристорных). Происходит разогрев кристаллов, который продолжается и после выхода мотора на рабочий режим. Для снижения потерь при номинальной работе мотора силовые ключи, как правило, шунтируются с помощью механического «байпасного» коммутатора (Vurpass на рис. 1). Это позволяет повысить КПД устройства и сократить интервал времени между пусками (время бестоковой паузы). В отличие от предыдущей схемы, байпасные ключи используются при низких номинальных токах, и срок их службы может быть соизмеримым с ресурсом всей системы. Кроме того, контакты байпаса не работают в режиме прерывания тока или коммутации больших напряжений, благодаря чему исключается их искрение или подгорание. Напряжение на контакте в момент замыкания не превышает величину прямого падения напряжения на открытом тиристоре, составляющую единицы вольт.

Требования к силовым модулям

Для того чтобы софт-стартер был компактным и надежно работал в течение всего срока службы, используемые в нем полупроводниковые ключи должны иметь высокую перегрузочную способность. Даже при использовании режима плавного пуска стартовые токи в несколько раз превышают номинальные значения, в противном случае двигатель может не разогнаться. В этом, кстати, состоит один из главных недостатков софт-стартеров по отношению к частотным преобразователям, которые способны осуществлять запуск двигателя и регулирование его оборотов с постоянным моментом.

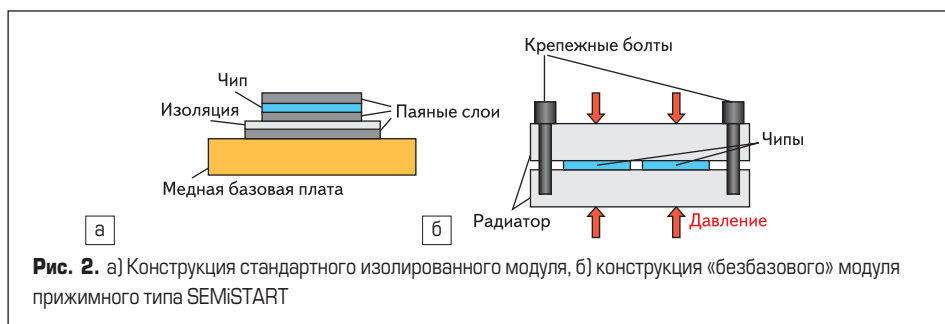
В наиболее мощных пусковых установках пиковые значения токов могут достигать величин в несколько килоампер, и полупроводниковые ключи должны выдерживать такие нагрузки в течение всего времени разгона двигателя. В то же время от софт-стартера требуется компактность и дешевизна, а габариты и стоимость подобного изделия в первую очередь зависят от размеров и стоимости используемых силовых модулей.

Для повышения экономической эффективности пусковых преобразователей в них, как правило, применяются тиристорные ключи, номинальный ток которых гораздо меньше пускового тока мотора. Возможность этого обусловлена тем, что тиристоры работают под полной нагрузкой только в течение очень непродолжительного времени старта (как правило, не более 30 с). За время разгона температура чипов может вырасти, например, с 40 до 130 °С (градиент составит 90 °С). Если устройство обеспечивает, например, 3 пуска в час при 8-часовом рабочем дне, то в течение 10 лет суммарное количество стартов составит 87 600. Отсюда вытекает очередное требование к силовым модулям, используемым в устройствах плавного пуска: они должны надежно работать при регулярных больших перепадах температуры, то есть обладать высокой стойкостью к термоциклированию.

Вплоть до настоящего времени производители софт-стартеров занимаются поиском компромиссных решений и выбором полупроводников, наилучшим образом удовлетворяющих указанным требованиям. Разработкой компанией SEMIKRON серии тиристорных модулей SEMiSTART, предназначенных для использования в устройствах плавного пуска, является важным шагом на пути решения проблемы.

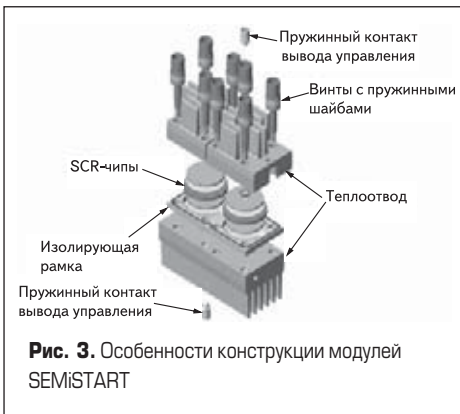
Особенности конструкции модулей SEMiSTART

В стандартных изолированных модулях соединение чипов с керамической DCB-платой и платой с медным основанием производится с помощью пайки. Такие ключи допускают только односторонний способ охлаждения (рис. 2а): 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 керамики, керамики и кремниевых чипов, чипов и медных терминалов.



В условиях циклического изменения температуры в паяных соединениях накапливается усталость, при длительной эксплуатации это приводит к разрушению структуры соединительных слоев, резкому увеличению теплового сопротивления, перегреву кристаллов и выходу модуля из строя.

Силовые модули прижимного типа отличаются, прежде всего, тем, что электрическая и тепловая связь между чипами, терминалами и корпусом осуществляется с помощью прижима (рис. 26). Для обеспечения надежного соединения прикладываемое при этом контактное усилие может достигать нескольких килоньютон. Специальные ускоренные испытания на воздействие термоциклов подтверждают, что стойкость прижимных модулей к термоциклированию возрастает многократно, особенно сильный положительный эффект наблюдается при работе силовых ключей на больших токах (более 200 А). Технология прижимного контакта (pressure-contact-technology) была разработана и внедрена компанией SEMIKRON в начале 1990-х годов при производстве интеллектуальных силовых модулей SKiP. Длительная эксплуатация компонентов данного типа подтвердила надежность и высокие технические характеристики их конструкции, именно поэтому концепция прижимного соединения была использована при разработке компонентов серии SEMiSTART.



Устройство тиристорного модуля SEMiSTART показано на рис. 3. Два тиристорных чипа (SCR — Silicon Controlled Rectifier), соединенных встречно-параллельно, расположены между теплоотводами, 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. Герметизация внутреннего объема модуля осуществляется с помощью силиконового геля, заливаемого внутрь изолирующей рамки.

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

снижению взаимного теплового влияния чипов. Затворы тиристоров 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.

Система охлаждения SEMiSTART проектировалась для работы в условиях кратковременных перегрузок при естественном отводе тепла, поэтому в отличие от классических теплостоков с тонким основанием и высокой эффективной площадью охлаждения радиаторы SEMiSTART имеют массивную базу и небольшие ребра.

Благодаря непосредственному двустороннему отводу тепла от чипов, запрессованных между радиаторами, в модулях SEMiSTART удалось добиться существенного снижения теплового сопротивления «кристалл – корпус» $R_{th(j-c)}$ по сравнению с компонентами в стандартных изолированных корпусах. В таблице 1 приведены основные характеристики модуля SKKQ 1500 семейства SEMiSTART и тиристорного модуля SKKT 500. В обоих силовых ключах использованы одни и те же кристаллы, именно поэтому значение пикового тока I_{TSM} , являющегося характеристикой чипа, одинаково. При этом величина теплового сопротивления SEMiSTART составляет около 45% от значения $R_{th(j-c)}$ стандартного модуля.

Таблица 1. Сравнительные характеристики модулей SKKQ 1500 и SKKT 500

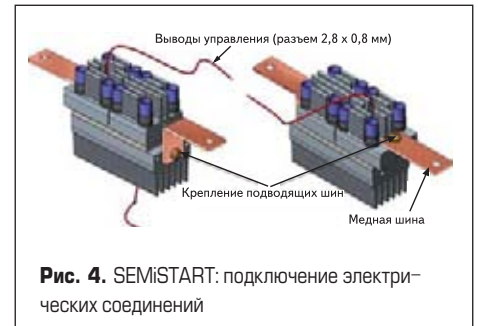
	SKKQ 1500	SKKT 500
$I_{TSM}, A (25^\circ C)$	17 000	17 000
$R_{th(j-c)}, C/Вт$	0,037	0,082
Габариты, мм	500 × 100 × 123 (с радиатором)	60 × 50 × 150 (без радиатора)

Лучшие тепловые характеристики компонентов серии SKKQ позволяют применять их при больших номинальных токах и создавать на их основе гораздо более компактные изделия. Отметим также, что теплосток является элементом конструкции SEMiSTART, все характеристики которого нормированы для режима естественного охлаждения. Поскольку модули SEMiSTART не нуждаются в установке на радиатор, из процесса сборки исключается ответственная операция нанесения теплопроводящей пасты. Конструкция обеспечивает простой доступ к терминалам, способ подключения силовых шин и выводов управления показан на рис. 4.

Естественно, что компоненты семейства SEMiSTART могут работать в любых применениях, где требуется коммутация или управление цепями переменного тока, например в регуляторах мощности или устройствах защиты.

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

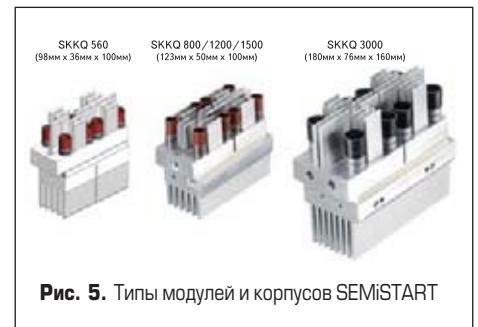
	SKKQ 560	SKKQ 800	SKKQ 1200	SKKQ 1500	SKKQ 3000
$I_{ovr}, A (20 c)$	560	800	1225	1500	3080
I_{TSM}, A	5700	5700	9500	17 000	30 000
$R_{th(j-c)}, C/Вт$	0,106	0,106	0,066	0,037	0,026



Состав семейства SEMiSTART

Модули SEMiSTART выпускаются в трех типах корпусов, они предназначены для работы в диапазоне пусковых токов $I_{ovr} 500-3000 А$ при нормированном времени пуска 20 с. Типы корпусов и названия компонентов семейства показаны на рис. 5, а основные технические характеристики приведены в таблице 2.

Как уже было сказано, технические характеристики компонентов серии SEMiSTART нормированы для режима пуска асинхронного

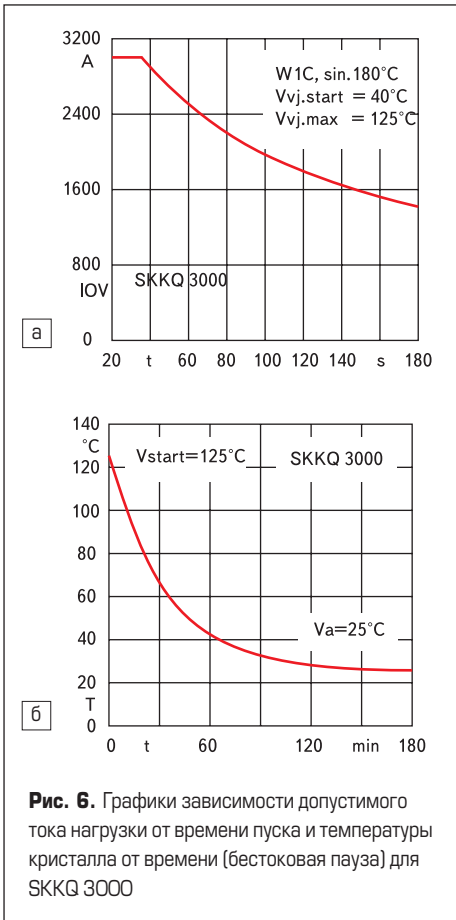


двигателя (время выхода на рабочий режим — 20 с) при естественном охлаждении. Для определения рабочих параметров в условиях, отличающихся от номинальных, необходимо воспользоваться графиками, приводимыми в технической документации. Например, с помощью эшюры на рис. 6а (Fig. 6 в документации SEMIKRON) можно определить значение допустимого тока при времени пуска, превышающем 20 с.

Эшюра на рис. 6б (Fig. 9 в документации SEMIKRON), показывающая процесс охлаждения кристаллов при начальной температуре $T_{start} = 125^\circ C$, позволяет рассчитать минимальное время бестоковой паузы. Модули SEMiSTART могут быть использованы и в режиме принудительного воздушного охлаждения, при этом в зависимости от интенсивности обдува сокращается допустимое время между пусками.

SKSS 1 — контроллер софт-стартера

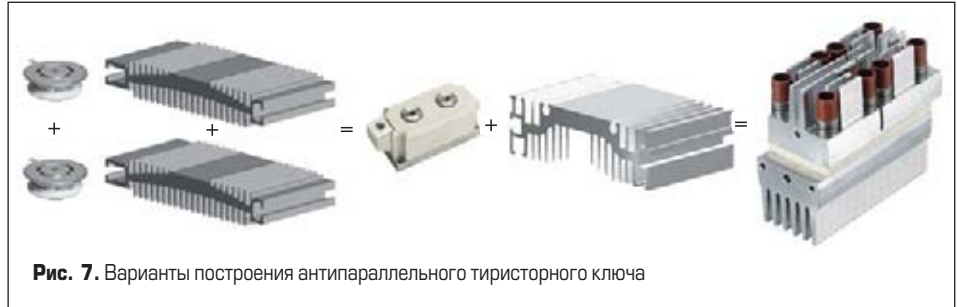
Компания SEMIKRON всегда стремится предложить заказчику комплексное решение любой преобразовательной задачи, поэтому разрабатывает и производит широкую гамму специализированных драйверов и плат управ-



ления. К ним относятся и SKSS 1 — универсальный контроллер системы плавного пуска.

SKSS 1 разработан на основе 8-разрядного микроконтроллера семейства Z86 фирмы Zilog и включает в себя все элементы, необходимые для управления тиристорным блоком плавного пуска трехфазного асинхронного двигателя. Для создания полностью законченного устройства кроме контроллера требуются только элементы коммутации и силовые ключи, в качестве которых могут быть использованы модули SEMiSTART.

Основные характеристики и возможности софт-стартера на базе SKSS 1:



- напряжение питания 230/400 В или 690 В, допуск $\pm 15\%$;
- автоматический выбор частоты 50 или 60 Гц;
- режим токовой синхронизации;
- независимое управление режимами пуска и остановки, регулирование времени старта и стопа в пределах 1–100 с;
- гальваническая изоляция 4 кВ;
- программируемый режим ограничения пускового тока;
- мониторинг состояния неисправности, небаланса фаз и правильности чередования фаз, защита от выхода напряжения из допуска, перегрузки по мощности, повреждения тиристорного ключа;
- режим энергосбережения;
- светодиодная индикация рабочего состояния, режима ограничения тока, состояния неисправности, пропавания фазы или отказа тиристорного ключа;
- управление режимом «байпас».

ной конструкции и отсутствию паяных и сварных соединений;

- простота подключения выводов.

Как показано на рис. 7, один элемент семейства SEMiSTART заменяет два капсульных тиристора с радиаторами или один изолированный модуль с теплопроводом, при этом он обеспечивает несоизмеримо более высокие значения перегрузочных токов.

Компоненты SEMiSTART, предназначенные для использования в качестве силовых ключей устройств плавного пуска асинхронных моторов, несомненно, будут востребованы рынком. Сектор промышленных софт-стартеров непрерывно растет, что обусловлено увеличивающимися требованиями по энергосбережению и воздействию на питающую сеть, а также необходимостью продления ресурса мощных электродвигателей. Применение специализированных силовых ключей, подобных SEMiSTART, позволяет создавать компактные, недорогие и надежные пусковые устройства, практически не нуждающиеся в обслуживании.

Заключение

Основными преимуществами компонентов серии SEMiSTART при их использовании в устройствах плавного пуска являются:

- компактный дизайн, интегрированный тепловод;
- нормирование основных характеристик для режима естественного охлаждения;
- низкое значение теплового сопротивления «кристалл – корпус» $R_{th(j-c)}$;
- высокая надежность, высокая стойкость к термоциклированию благодаря прижим-

Литература

1. Schäfer N., Herrmann R. Soft-Start Control of Electric Motors // Power Electronics Europe. Issue 1, 2007.
2. Schäfer N., Gill M. SEMiSTART — modules for soft start applications. SEMIKRON International, 02.2007.
3. Ермаков М. Плавный пуск — от теории к практике // Компоненты и технологии. 2006. № 2.