

ТИРИСТОРНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ПЛАВНОГО ПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

М. Ермаков mikhail@igbt.ru

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором – самый распространенный тип электродвигателей, применяемых в промышленности. На среднем промышленном предприятии парк оборудования с использованием асинхронных электродвигателей достигает порой сотен, а то и тысяч единиц. И если с пуском двигателей малой мощности проблем обычно не бывает, то прямое включение электромоторов средней и большой мощности (от 75 кВт и выше) зачастую приводит к возникновению значительных пусковых токов, а момент двигателя при этом может превысить допустимое значение. Самым простым решением этой проблемы является применение тиристорных устройств плавного пуска.

Величина пускового тока для большинства асинхронных двигателей лежит в пределах от $4I_{ном}$ до $7I_{ном}$ 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 аппаратов;
- снижение срока службы самого двигателя;
- перегрузка питающей сети (трансформатора подстанции), особенно если есть вероятность одновременного запуска двигателей, питающихся от одного трансформатора;
- падение напряжения в сети, что негативно влияет как на процесс запуска двигателя, так и на работу других потребителей электрической энергии;
- резкое изменение момента двигателя, приводящее к дополнительному износу трансмиссии привода, динамическим ударам в технологическом оборудовании.

Тиристорное устройство плавного пуска (другие названия – плавный пускатель, софт-стартер) – это самое распространенное решение проблемы прямого пуска. В статье рассматриваются основные моменты, с которыми сталкивается разработчик системы плавного пуска при выборе и расчете силовой части и системы охлаждения плавного пускателя.

ВЫБОР СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЧАСТИ

Основа силовой части тиристорного устройства плавного пуска представляет собой симисторный ключ (два тиристора, включенных встречно-параллельно). Возможны три варианта построения схемы силового каскада: коммутация одной фазы, двух фаз и трех фаз (рис.1).

Единственное преимущество первых двух вариантов схемы – низкая стоимость по сравнению с третьим вариантом. Основной же недостаток – перекося фазных токов и напряжений двигателя. Так как стоимость силовых тиристорных сегодня существенно снизилась, наиболее перспективно и целесообразно применение схемы с коммутацией всех трех фаз. Надо заметить, что при соединении обмоток двигателя в

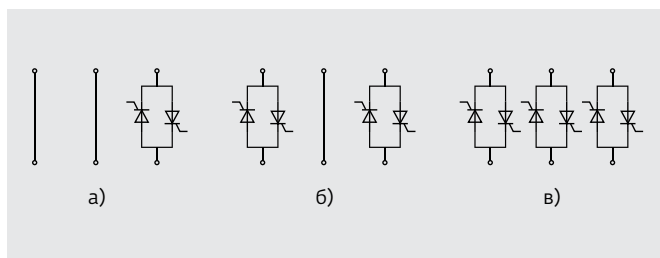


Рис.1. Возможные конфигурации силовой части плавного пускателя: коммутация одной (а), двух (б) и трех фаз (в)

треугольник возможно включение симисторного ключа не в фазу цепи питания, а в разрыв обмотки (рис.2). В этом случае ток каждого ключа в $\sqrt{3}$ раз меньше фазного тока, что приводит к повышению КПД устройства и позволяет использовать тиристоры, рассчитанные на меньший ток.

Параметры условного (выбранного для расчета) двигателя:

- напряжение – 380 В;
- номинальная мощность – 90 кВт;
- коэффициент мощности – 0,8;
- КПД – 0,9;
- номинальный ток – 189 А;
- максимально допустимая кратность пускового тока – 5х в течение 10 с (т.е. 945 А в течение 10 с).

Как первоначальный выбор компонентов и схем включения, так и дальнейшее уточнение параметров разрабатываемой сборки тесно связаны с тепловым расчетом. Для этого используется программа теплового расчета SEMISEL™ [1, 2].

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ

Для выполнения теплового расчета необходимо сделать предварительный выбор элементов.

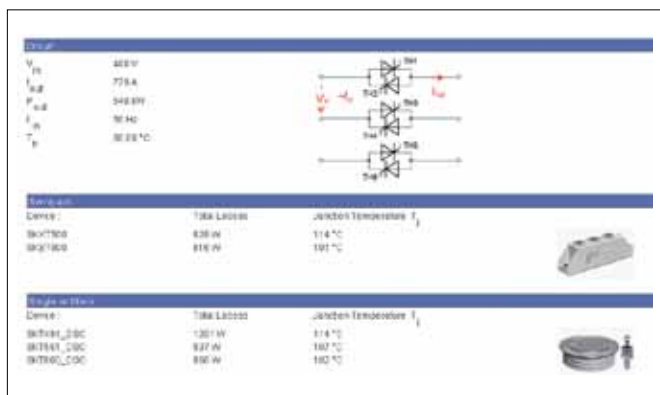


Рис.3. Device Proposal. Результаты предварительного выбора тиристоров

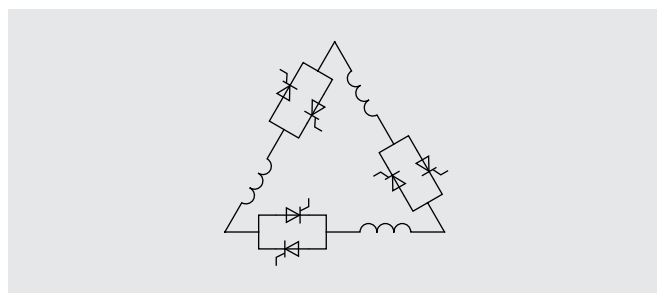


Рис.2. Включение симисторного ключа в разрыв обмотки

В качестве исходного варианта можно использовать три модуля SKKT 430/14 E на радиаторе P16/300F.

SKKT 430/14 E – модуль тиристор/тиристор в корпусе SEMIPACK® 5. Рабочее напряжение модуля – 1400 В, максимальный средний ток – I_{TAV}=440 А (sin.180; T_c=85°С). "E" в названии компонента означает стойкость к скорости изменения напряжения dU/dt (1000 В/мкс).

В марке радиатора: P16 – наименование профиля, 300 – длина, мм, F – способ охлаждения (принудительный воздушный).

Возможные варианты тиристорных модулей для создания силового каскада плавного пускателя приведены в табл.1.

Используя новую опцию программы SEMISEL – Device Proposal, можно очень быстро сделать предварительный выбор силовых полупроводниковых приборов. Для этого необходимо использовать схему W3C (для плавного пускателя) и ввести требуемые параметры (номинальное напряжение, частоту, максимальный длительный ток и температуру радиатора). Программа сама подберет возможные варианты, а в результатах предварительного расчета (рис.3) можно будет увидеть суммарную величину потерь и результирующую температуру кристалла тиристора. Только необходимо помнить, что максимальный длительный ток следует выбирать с соответствующим запасом, так как величину и длительность перегрузки Device Proposal не учитывает.

ВЫБОР КЛАССА (ВЕЛИЧИНЫ) НАПЯЖЕНИЯ ТИРИСТОРОВ

Учитывая качество наших промышленных сетей и незначительное влияние (примерно на 3%) класса напряжения на стоимость модулей, выбираем рекомендованный программой класс напряжения 14, т.е. 1400 В (рис.4). Выбрав класс напряжения с запасом, нельзя забывать о необходимости







применения снабберных RC-цепей, которые не только защищают от коммутационных перенапряжений, но и ограничивают скорость изменения напряжения на выводах тиристора.

При подборе модулей с теплоотводом рекомендуется ориентироваться на расчетные данные готовых сборок. Выбор модуля SKKT 430 + P16/300F, например, основан на готовом решении SEMIKRON – сборке SKS 620F W3C 740 V22 ($I_{\text{макс.}}=690$ В, длительный

ток $I_{\text{макс.}}=620$ А при температуре окружающей среды $T=35^{\circ}\text{C}$ или 560 А при $T=40^{\circ}\text{C}$). Подробное описание параметров всех сборок можно найти на сайте компании в разделе продукции SEMISTACK (сборки) [3].

Основные параметры сборок по схеме W3C (другие названия этой схемы – плавный пуск, регулятор переменного тока, трехфазный АС-ключ, трехфазный тиристорный коммутатор) приведены в табл.2.

Таблица 1. Характеристики тиристорных ключей

Наименование	Максимально допустимое значение тока		Радиатор	Номинальный (длительный) ток I_{rms} , А (W3C, $T_a=40^{\circ}\text{C}$)	Перегрузка 200% в течение 10 с, $I_{200\%}/I_{\text{ном}}$, А (W3C, $T_a=40^{\circ}\text{C}$)	Корпус
	I_{TAV} , А, при T_c , $^{\circ}\text{C}$	I_{rms} , А, при T_s , $^{\circ}\text{C}$				
SKKT 57	55	80	P3/180F	95	118/59	SEMIPACK® 1 
SKKT 72	70	85	P3/180F	105	140/70	
SKKT 92	95	85	P3/180F	120	162/81	
SKKT 106	106	85	P3/180F	130	170/85	
SKKT 122	122	88	P16/200F	220	266/133	SEMIPACK® 2 
SKKT 132	130	87	P16/200F	250	298/149	
SKKT 162	160	83	P16/200F	279	332/166	
SKKT 213	213	90	P16/200F	340	410/205	SEMIPACK® 3 
SKKT 253	253	85	P16/200F	359	450/225	
SKKT 330	330	80	P16/200F	460	594/297	
SKKT 430	430	86	P16/300F	590	828/414	SEMIPACK® 5 
SKKT 500	500	89	P16/300F	650	920/460	
SKET 740	740	81	3 × P16/200F	1100	1440/720	SEMIPACK® 6 
SKET 800	805	85	3 × P16/200F	1245	1520/760	
SKT 760	760	80	6 × P17/130F	900	1250/625	
SKT 1000	1000	85	6 × N4/250F	1650	2160/1080	
SKT 1200	1200	85	6 × N4/250F	1900	2500/1250	
SKT 1800	1800	85	6 × N4/250F	2450	3300/1650	
SKT 2400	2400	76	6 × N4/250F	2590	3600/1800	

При выборе решения надо учитывать вид охлаждения: естественное или принудительное воздушное. Например, сборки SKS 780N W3C 670 V16 и SKS 780F W3C 680 V16 рассчитаны на один и тот же длительный ток. Но если выбрано естественное охлаждение, то надо использовать более мощные ключи и массивные радиаторы. В первом случае используются тиристоры SKT 1200, которые более чем в два раза дороже, чем SKT 551, применяемых в качестве силовых ключей для второго варианта. Выбор массивного радиатора также негативно скажется на себестоимости плавного пускателя.

С другой стороны, чем больше масса радиатора, тем больше его теплоемкость. Это объясняет тот факт, что первый вариант (SKS 780N W3C 670 V16, естественное воздушное охлаждение) имеет большую перегрузочную способность, чем второй ($I_{200\%}=1286$ А). На графиках зависимости номинального тока от длительности перегрузки и величины тока перегрузки I_{OVL} (рис. 5, 6) это хорошо видно.

Также можно оценить влияние выбора системы охлаждения при одном и том же номинале полупроводникового прибора. Например, с тиристорами SKT 551 можно построить силовую сборку либо на ток 440 А с естественным воздушным охлаждением (см. табл.2, SKS 440N W3C 380 V16), либо на ток 780 А с принудительным (см. табл.2, SKS 780F W3C 680 V16).

Используя новую возможность программы SEMISEL – StackSel (рис.7), можно выполнить тепловой расчет на основе выбранной сборки и исходных данных (мощность, ток, кратность и длительность перегрузки, температура окружающей среды). Таким образом, можно пересчитать и получить максимальный длительный ток для температуры окружающей среды, отличающейся от 35°C, например 40°C. Или проверить



Рис.4. Выбор тиристорного модуля

перегрузочную способность определенной сборки при других параметрах кратности и длительности перегрузки, например, перегрузка 150% в течение 1 мин.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Приведем несколько вариантов расчета.

Длительный режим, номинальный ток $I_{out}=189$ А. Находим схему (W3C), вводим основные параметры ($I_{out}=189$ А, Overload factor=1). Выбираем модуль SEMIPACK® SKKT 430 (см. рис.4). Опция Use maximum values позволяет анализировать наихудший вариант с учетом разброса параметров модулей. Далее вводим параметры системы охлаждения:

- температура охлаждающей среды $T_a=40^\circ\text{C}$,
- режим принудительного воздушного охлаждения (forced air cooling),
- тип радиатора P16_300_16B (16B – это вентилятор SEMIKRON SKF 16-B).

Поскольку предполагается, что все три модуля расположены на одном теплоотводе, необходимо

в графе Number of switch per heatsink (количество ключей на радиаторе) ввести цифру 6 (три модуля по два тиристора). Так как параллельное соединение модулей не используется, в соответствующем поле оставляем "1".

Кстати, опция Additional power source at this heatsink (дополнительный источник тепла на

этом охладителе) позволяет учесть тепло, которое выделяется другими расположенными на этом же радиаторе элементами.

Расчеты показывают, что результирующая температура кристалла силового ключа ($T_j = 68^\circ\text{C}$) при заданных условиях меньше предельно допустимого значения более чем на 60°C .

Таблица 2. Характеристики сборок SEMISTACK компании SEMIKRON

Наименование	$I_{\text{макс.}}, \text{A}$, длительно, $T_{\text{окр.ср.}} = 35^\circ\text{C}$	Перегрузка 200% в течение 10 с каждые 10 мин, $I_{200\%}/I_{\text{ном.}}, \text{A}$	$U_{\text{ном.}}, \text{В}$	Масса, кг	Используемые тиристоры
Неизолированные решения (построены на неизолированных тиристорах)					
Естественное охлаждение					
SKS 290N W3C 250 V16	290	404/202	500		SKT 300
SKS 440N W3C 380 V16	440	702/351	500	60	SKT 551
SKS 540N W3C 470 V16	540	861/430	500	60	SKT 760
SKS 660N W3C 570 V16	660	1036/518	500	140	SKT 760
SKS 780N W3C 670 V16	780	1286/643	500	140	SKT 1200
Принудительное охлаждение					
SKS 590F W3C 570 V16	590	668/334	500		SKT 300
SKS 780F W3C 680 V16	780	1023/511	500	38	SKT 551
SKS 1000F W3C 870 V16	1000	1439/719	500	38	SKT 1000
SKS 1000F W3C 1200 V22	1000	1439/719	690	38	SKT 1000
SKS 1200F W3C 1430 V22	1200	1770/885	690	38	AT 646
SKS 1470F W3C 1270 V16	1470	1902/951	500		SKT 1000
SKS 1770F W3C 1540 V16	1770	2244/1122	500	120	SKT 1000
SKS 2680F W3C 2320 V16	2680	3485/1742	500	125	SKT 1800
Изолированные решения (построены на изолированных тиристорных модулях)					
SEMIKUBE Thyristor	123	169/84	400	2,1	SKKT 92
SKS 200F W3C 170 V16	200	273/136	500	6	SKKT 162
SKS 290F W3C 250 V16	290	353/176	500		SKKT 162
SKS 470F W3C 410 V16	470	586/293	500		SKKT 250
SKS 580F W3C 400 V16	580	1000/500	400	22	SKKT 500
SKS 620F W3C 740 V22	620	849/424	690	19	SKKT 430
SKS 690F W3C 600 V16	690	958/479	500	19	SKKT 500

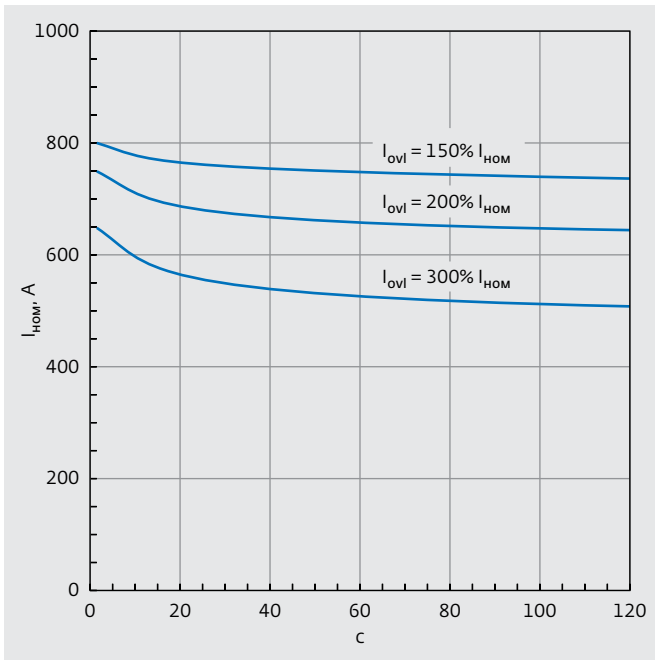


Рис.5. Зависимость номинального тока от длительности перегрузки. Естественное воздушное охлаждение

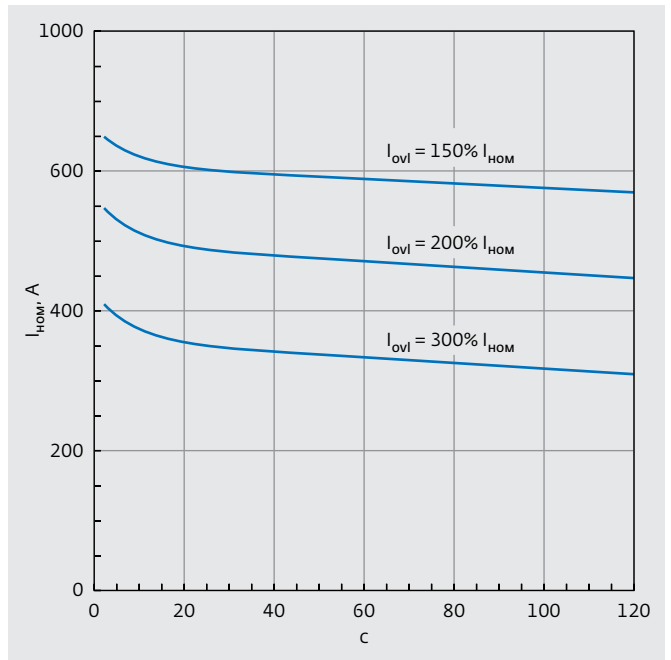


Рис.6. Зависимость номинального тока от длительности перегрузки. Принудительное воздушное охлаждение

Пятикратная перегрузка после установившегося длительного номинального режима ($5I_{ном}=945$ А в течение 10 с). В поле кратности перегрузки (overload factor) вводится цифра 5. Получившееся при этом значение $T_j=121^{\circ}\text{C}$ обеспечивает запас по перегреву 9°C . Затем можно

подобрать соответствующую длительность режима перегрузки.

Четырехкратная перегрузка после установившегося длительного номинального режима ($4I_{ном}=756$ А в течение 35 с). Результат: $T_j=122^{\circ}\text{C}$, запас по перегреву – 8°C .

Трехкратная перегрузка после установившегося длительного номинального режима ($3I_{ном}=567$ А в течение 10 мин). Результат: $T_j=125^{\circ}\text{C}$, запас по перегреву – 5°C . Заметим, что 10 мин – это практически установившийся режим (рис.8). Исходя из этого, можно предположить, что и паузу между пусками можно установить равной 10 мин. Чтобы проверить это предположение, надо задать в SEMISEL соответствующий цикл нагрузки в режиме User defined load cycle.

При расчете и выборе элементов силовой части плавного пускателя необходимо учитывать следующее:

- есть два пути получения достаточно больших перегрузочных способностей (трехкратных и выше): выбор более мощных тиристоров и выбор более массивных радиаторов (перегрузочная способность увеличивается за счет большей теплоемкости охладителя). Первый вариант дороже, второй – увеличивает вес устройства. Еще один недостаток второго варианта – большая теплоемкость требует увеличения паузы между пусками;

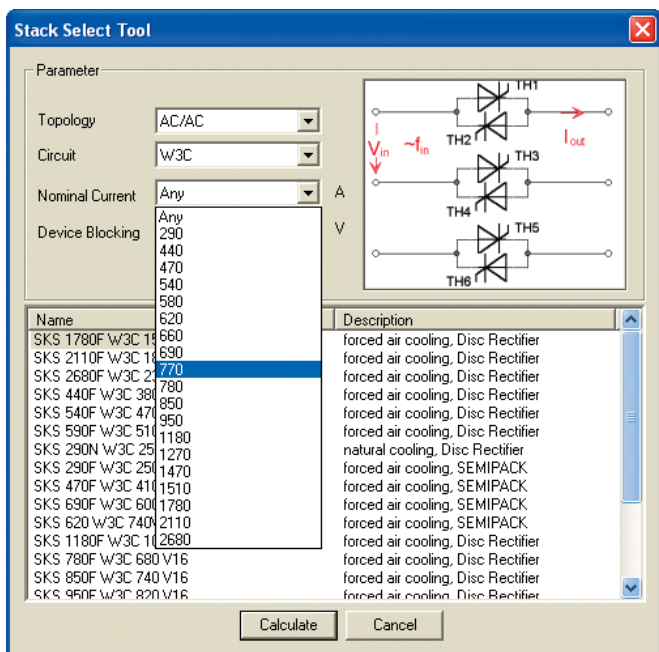


Рис.7. StackSel – выбор готовой сборки

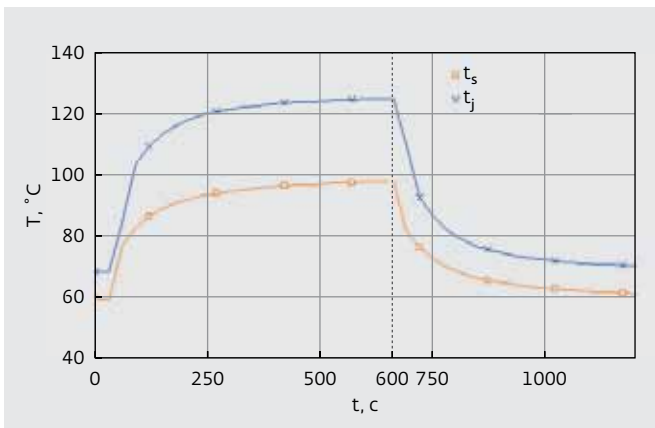


Рис.8. Расчетные зависимости температуры кристалла силового ключа (T_j) и радиатора (T_s) при трехкратной перегрузке ($3I_{ном} = 567$ А) в течение 10 мин

- если ваш радиатор обладает достаточно высокой теплоемкостью, а плавный пускатель шунтируется сразу после запуска и не работает в длительном режиме на номинальную нагрузку, то эффективность теплоотвода (статическое тепловое сопротивление R_{th}) и наличие вентилятора будут влиять только на скорость охлаждения и, соответственно, на минимальную паузу между пусками. Проще говоря, один из способов избавиться от принудительного охлаждения в плавном пускателе — использовать массивный радиатор и шунтировать тиристоры контактором сразу после запуска двигателя;
- в базе данных программы SEMISEL и в описаниях модулей задано значение теплового сопротивления "корпус-теплоотвод" $R_{th(c-s)}$. Это тепловое сопротивление зависит не только от конструкции самого модуля, но и от качества теплового контакта. В инструкции по монтажу модулей указаны определенные требования к качеству поверхности радиатора, значения момента затягивания крепежных болтов и толщина слоя теплопроводящей пасты. Если соблюдать эти нормы, то результаты тепловых расчетов будут совпадать с результатами испытаний. Также надо иметь в виду, что реальное значение теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$ может отличаться от расчетного, так как один и тот же радиатор, в зависимости от размеров, количества и взаимного расположения модулей на нем, может иметь различные тепловые сопротивления. При выборе теплоотвода рекомендуется внимательно изучать его технические характеристики, обычно в них указывается

зависимость тепловых сопротивлений от длины радиатора, количества установленных модулей, скорости потока воздуха и т.д.

Итак, рассчитано устройство и проведены испытания. Но почему-то реальная температура радиатора отличается от расчетной (измеренная обычно меньше). Прежде чем сомневаться в правильности расчетов, надо проверить, совпадает ли температура воздуха при испытаниях с температурой, взятой для расчета (анализ был проведен для $T_a = 40^\circ\text{C}$), и в каком месте была определена температура. Расчетная точка измерения температуры радиатора находится на его поверхности непосредственно в месте теплового контакта с модулем. А температура в этой точке может значительно отличаться от измеренной (рис.9). Не забывайте также, что расчет был произведен с использованием опции Use maximum values, а это значит, что анализировался самый худший вариант. Попробуйте применить режим Use typical values, разница в результатах может достигать 20°C .

ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Для защиты тиристоров от повреждения токами короткого замыкания обычно используются быстродействующие предохранители. Для их

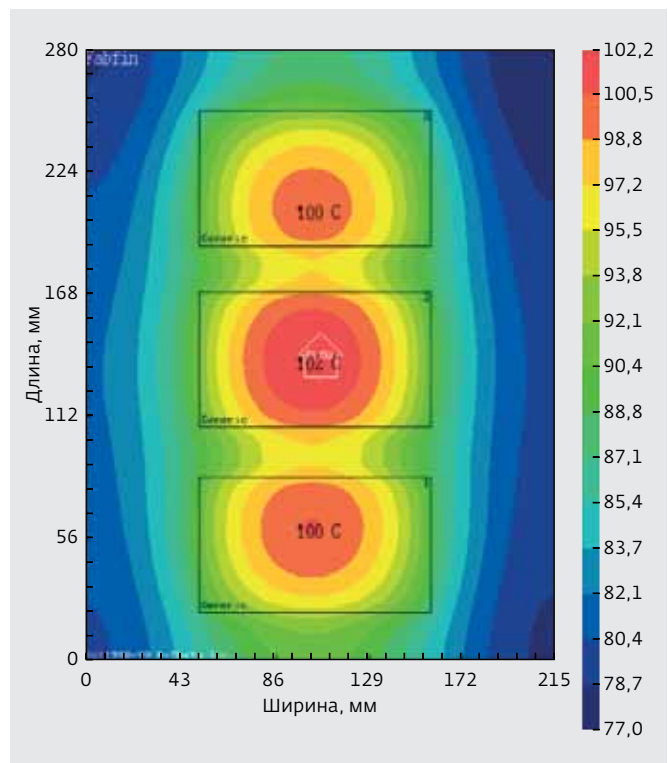


Рис.9. Температура в различных точках радиатора

правильного выбора в технических характеристиках тиристорного модуля приводится параметр I^2t , значение которого обязательно должно быть больше соответствующего значения в технических характеристиках предохранителя. При этом следует проверить (по токовым зависимостям), выдержит ли предохранитель максимально возможные для проектируемого устройства перегрузки.

В приведенных примерах не были рассмотрены все тонкости и детали выбора и расчета устройства плавного пуска. Не рассматривались также вопросы, связанные с применением снабберных RC-цепей, которые необходимы для защиты тиристоров от перенапряжений и произвольного включения в случае превышения критического значения dU/dt , и методика расчета скорости воздушного потока вентилятора, работающего на определенный охладитель.

В большинстве случаев разработчику, не искушенному в тонкостях разработки силового каскада, быстрее и выгоднее приобрести готовое решение. Компания SEMIKRON имеет богатый опыт не только в корпусировании силовых полупроводников, но и в разработке готовых сборок SEMISTACK (рис.10) [4].

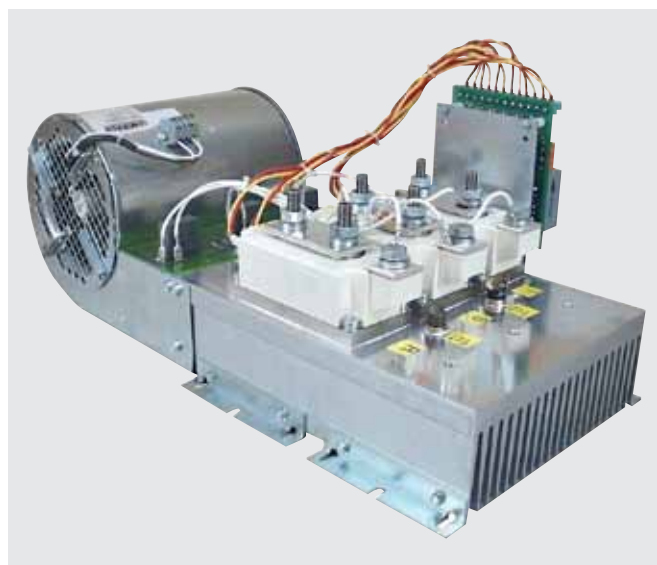


Рис.10. Внешний вид сборки SKS 620F W3C 740 V22 (3× SKKT 430 на радиаторе P16/300 + вентилятор SKF 16 B)

МОДУЛИ SEMISTART

Жесткая конкуренция на рынке силовых полупроводниковых приборов заставляет производителей силовых компонентов постоянно улучшать их параметры, совершенствовать технологии,

Таблица 3. Основные характеристики модулей SEMiSTART

Характеристики	SKKQ 560	SKKQ 800	SKKQ 1200	SKKQ 1500	SKKQ 3000
I_{OVI}, A	560	800	1200	1500	3000
I_{TSM}^*, A	5700	5700	9500	17000	30000
$R_{th(j-s)}, ^\circ C/WT$	0,106	0,106	0,066	0,037	0,026

* I_{TSM} – ударный ток тиристора в открытом состоянии

разрабатывать новые поколения элементов с уникальными характеристиками.

Силовой тиристорный модуль SEMiSTART разработан инженерами компании SEMIKRON и представляет собой готовую силовую часть для одной фазы системы плавного пуска – тиристорный ключ по встречно-параллельной схеме. Он разработан специально для систем пуска асинхронных электродвигателей.

Конструкция модуля очень проста. Два тиристорных кристалла включены встречно-параллельно и зажаты между двумя массивными алюминиевыми радиаторами с двойным ребрением, имеющими хорошо развитую поверхность. Радиаторы позволяют эффективно отводить тепло и быстро охлаждают кристаллы тиристоров в паузах между пусками, а также являются силовыми выводами модуля.

Прижимная технология, используемая при производстве этих модулей, обеспечивает повышенную стойкость к термоциклированию, а следовательно, надежность и долговечность системы в тяжелых условиях эксплуатации при частых пусках электродвигателей. Очень низкое тепловое сопротивление наделяет тиристорные

модули небывалой перегрузочной способностью и объясняет высокую эффективность и компактность готовой системы плавного пуска. Тепловое сопротивление модулей SEMiSTART более чем в два раза меньше, чем у стандартных тиристорных модулей SEMIPACK с аналогичными кристаллами.

Модули SEMiSTART выпускаются на пять номиналов пусковых токов и в трех различных корпусах (рис.11). Следует отметить, что модули нормируются на кратковременный (пусковой) ток в течение 20 с. Сразу после успешного пуска электродвигателя тиристорные ключи шунтируются контактами пускателя. Основные характеристики модулей SEMiSTART приведены в табл.3.

Преимущества при использовании SEMiSTART очевидны:

- высокий максимальный ток перегрузки (низкое тепловое сопротивление);
- долговечность благодаря прижимной технологии;
- компактность и самодостаточность конструкции, простота использования (нет необходимости в дополнительных радиаторах);
- низкая цена: готовые к использованию тиристорные ключи с радиаторами охлаждения по цене обычного тиристорного модуля;
- ключи уже нормированы на пусковые токи для использования в системах плавного пуска, нет необходимости в дополнительных расчетах.

Особенности новых модулей SEMiSTART позволяют российским производителям не только поднять свои устройства на новый уровень эффективности и компактности, но также сэкономить время (и деньги) на разработку тиристорных устройств плавного пуска нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://semisel.semikron.com>.
2. <http://www.igbt.ru/semisel.zip>.
3. <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=367>.
4. www.semikron.com.

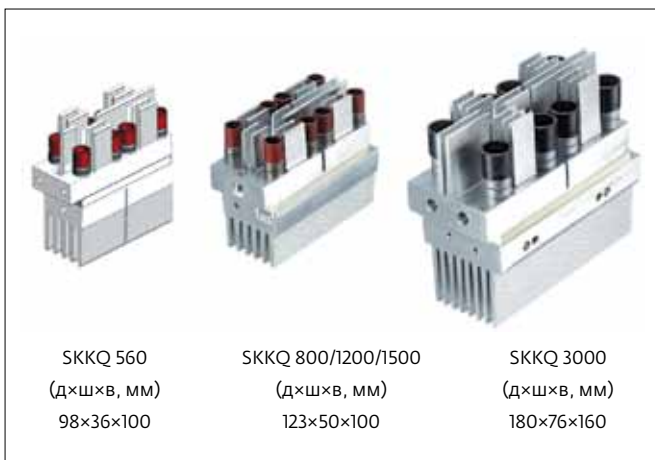


Рис.11. Типоразмеры модулей SEMiSTART

