

# SEMITEACH — силовая электроника для студентов

Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com

## Общие сведения

Блок SEMITEACH включает в себя 3-фазный выпрямитель, 3-фазный инвертор IGBT и тормозной чоппер (рис. 1б). Это наиболее распространенная конфигурация для построения привода электродвигателя, в англоязычной литературе она носит название CIB (Converter/Inverter/Brake). Для управления IGBT—инвертором и тормозным каскадом используются 4 полумостовых драйвера SKHI 22R, в состав SEMITEACH включены также линейный и релейный датчики температуры и вентилятор охлаждения. Подробное описание каждого элемента схемы приведено далее.

Несмотря на то, что SEMITEACH является законченным изделием, и все изолированные затворы IGBT подключены к соответствующим выходам драйверов, для надежного функционирования изделия необходимо соблюдение требований по защите от статического электричества (ESD). Соответственно, сигнальные соединения следует выполнять с использованием антистатических браслетов.

Выпрямитель SEMITEACH должен быть подключен к питающей сети через автомат защиты, который будет использоваться и как выключатель. В конструкции сборки SEMITEACH предусмотрены необходимые меры безопасности, все высоковольтные цепи и каскады блока закрыты пластиковой крышкой. Однако высокое напряжение присутствует на контрольных выходах затворов IGBT верхнего плеча, на терминалах питания и выходах, поэтому подключение силовых кабелей и измерительной аппаратуры необходимо производить с максимальной осторожностью и только после отключения сборки от сетевого питания.

Хорошим способом предотвращения возможных проблем, связанных с неправильным подключением, является использование автотрансформатора в цепи питания. В этом случае, подав питание (15 В) на драйвер

Проектирование мощных конверторов на основе современных скоростных электронных ключей IGBT и MOSFET требует от разработчика глубоких знаний, опыта и владения современными методами расчета и моделирования. Для знакомства с основами теории и практики создания силовых преобразовательных устройств дизайнерским центром компании SEMIKRON разработан «обучающий» модуль привода SEMITEACH. Предлагаемая статья посвящена особенностям конструкции данной сборки и базовым принципам проектирования подобных изделий.

Таблица. Коннекторы модуля SEMITEACH

№ (рис. 1)	Тип коннектора	Назначение	Рабочее напряжение	Максимальный ток, А
0	Клемма	Заземление	0	30
1	Клемма 4 мм	Питание вентилятора	220 В/50 Гц	1
2	Клемма 4 мм	Термоконтакт	15 В	5
3	Клемма 4 мм	Вход выпрямителя	220–400 В	30
4	Клемма 4 мм	DC выход выпрямителя	600 VDC (красный +, синий –)	30
5	Клемма 4 мм	DC вход инвертора IGBT	600 В DC (красный +, синий –)	30
6	Клемма 4 мм	АС выходы инвертора и чоппера	400 В AC/600 В DC	30
7	BNC коаксиальный, 50 Ом	Входы управления инвертора (инверсные)	КМОП-логика 0/15 В	1
8	BNC коаксиальный, 50 Ом	Вход управления чоппера (инверсный)	КМОП-логика 0/15 В	1
9	BNC коаксиальный, 50 Ом	Выход сигнала ошибки	КМОП-логика 0/15 В	1
10, 11	Клемма 4 мм	Питание драйвера 15 В (11 — общий)	15 В	5
12	Клемма 4 мм	Термодатчик	0–5 В	1

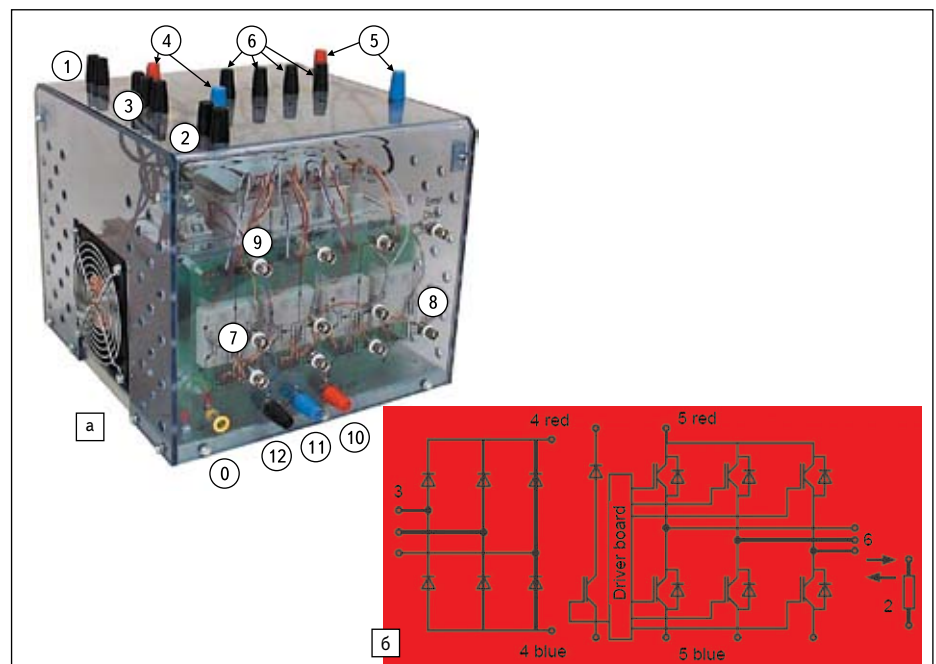


Рис. 1. а) Внешний вид модуля SEMITEACH; б) принципиальная схема CIB

и установив на выходе трансформатора небольшое напряжение (20–50 В), вы имеете возможность проконтролировать соответствие сигналов управления контроллера и вы-

ходного напряжения инвертора. Включать модуль на полную нагрузку следует только в случае полной уверенности в правильности соединений и алгоритмов управления.

## Система охлаждения

Система охлаждения, предназначенная для отвода тепла от силовых ключей, является одним из основных элементов преобразовательного устройства, во многом определяющим его надежность и долговечность. Модули выпрямителя и инвертора, рассеивающие основную часть мощности, размещаются на теплостоке, производимом, как правило, из алюминиевых сплавов. Для данной цели алюминий является материалом, оптимальным по соотношению таких показателей, как удельная теплопроводность, стоимость, пригодность к механической обработке. В большинстве случаев для снижения цены в силовой электронике используются литые и штампованные радиаторы.

В блоке SEMITEACH применен стандартный теплосток P3/250 (профиль P3 длиной 250 мм). Основным параметром теплоотвода, определяющим его перегрев относительно охлаждающего воздуха на 1 Вт рассеиваемой мощности, является тепловое сопротивление  $R_{th(s-a)}$ . Для повышения эффективности отвода тепла используется режим принудительного воздушного охлаждения с помощью вентилятора, создающего циркуляцию воздуха в области ребер радиатора. При прохождении охлаждающего воздуха вдоль теплостока образуется перепад давления, величина которого зависит от геометрии поперечного сечения и длины теплостока.

Эффективность работы вентилятора описывается графиками зависимости создаваемого давления от скорости потока воздуха (в м<sup>3</sup>/ч). Как показывают кривые, приведенные на рис. 2, параметры охлаждения в некоторой степени зависят от частоты питающего напряжения (50 или 60 Гц). Оптимальная рабочая точка кулера в системе охлаждения находится на пересечении его характеристики с кривой падения давления радиатора. Эта зона позволяет определить в первом прибли-

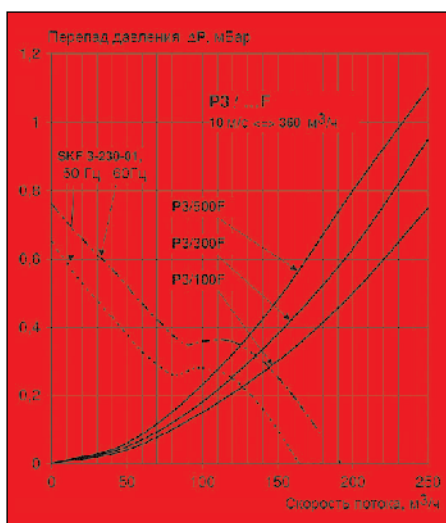


Рис. 2. Характеристические кривые вентилятора SKF 3 и радиатора P3 различной длины

жения скорость потока охлаждающего воздуха внутри ребер теплостока. Для повышения надежности рекомендуется выбирать рабочую точку с учетом некоторого дополнительного перепада давления. Наличие дефектов поверхности, элементов крепежа и т. д. препятствует прохождению воздуха и снижает эффективность системы охлаждения.

## Устройство управления затворами IGBT

Драйвер SKHI 22 осуществляет передачу управляющих сигналов контроллера на затворы силовых ключей, а также выполняет ряд важных сервисных функций, к которым относятся:

- Формирование сигнала включения/выключения затвора нужной амплитуды, а также обеспечение тока, достаточного для быстрого перезаряда емкостей затвора.
- Подавление высокочастотных шумовых сигналов.
- Мониторинг аварийных состояний и отключение IGBT при падении напряжения управления, перегрузке по току, коротком замыкании (КЗ). Состояние КЗ детектируется по выходу транзистора из насыщения и увеличению напряжения «коллектор – эмиттер»  $V_{CEsat}$ . Порог срабатывания защиты и время задержки после обнаружения КЗ задаются элементами  $R_{CE}$ ,  $C_{CE}$  установленными на плате драйвера.
- Гальваническая изоляция контрольных импульсов и цепей управления затворами, потенциально связанных с высоковольтными каскадами. Гальваническая развязка необходима для обеспечения безопасности, повышения надежности и защиты контроллера от повреждения при аварии силовых каскадов.

В блоке SEMITECH использовано 3 драйвера SKHI 22 A-R, каждый из которых управляет одной полумостовой стойкой 3-фазного инвертора и еще один предназначен для контроля тормозного каскада. Токковые характеристики SKHI 22 позволяют ему работать с параллельным соединением нескольких IGBT, что может быть использовано для наращивания мощности инвертора. Перед включением SEMITECH необходимо подробно ознакомиться с техническими характеристиками драйвера [4].

Для питания схемы управления необходим источник питания 15 В, мощность которого следует выбирать с учетом тока потребления четырех SKHI 22 при полной нагрузке. Сигнал готовности платы управления имеет высокий логический уровень (+15 В). При обнаружении аварийного режима происходит отключение IGBT, схема защиты формирует сигнал неисправности низкого уровня, импульсы управления игнорируются. Для сброса этого состояния необходимо устранить неисправность и подать на оба входа сигнала нулевого уровня. Спустя 9 мкс блокировка снимается

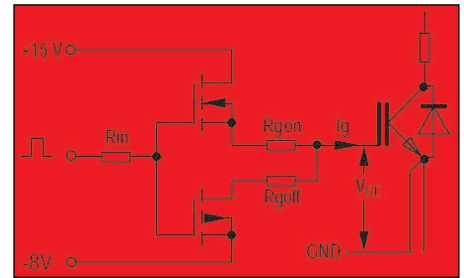


Рис. 3. Выходной каскад драйвера с разделенными цепями включения и выключения

и на выходе ERROR (вывод 3) восстанавливается сигнал высокого уровня. Следует учесть, что на плате управления SEMITEACH установлены резисторы 10 кОм между выводами ERROR и цепью питания +15 В, отсутствующие в самих драйверах.

## Входной выпрямитель и инвертор IGBT

Для выпрямления питающего напряжения в блоке SEMITEACH используются три однофазных диодных модуля SKD 51/14, установленных на общем радиаторе с инвертором. Они рассчитаны на предельное обратное напряжение 1400 В, что позволяет выпрямителю работать от промышленной 3-фазной сети до 440 В. В условиях лаборатории SEMITEACH может подключаться и к обычной розетке 220 В, однако при этом необходимо учитывать соответствующее снижение мощности и уровня выходного сигнала.

Три плеча инвертора SEMITEACH образованы тремя полумостовыми модулями IGBT SKM 50GB123 со встроенными антипараллельными диодами. Управляющие входы IGBT (затворы и эмиттеры) соединены с выходами драйверов, формирующих сигналы включения/выключения (+15 В/-8 В). На плате управления расположены резисторы затворов,  $R_{Gon}/R_{Goff}$  величина которых составляет в нашем случае 30 Ом. Сопротивления в цепи затворов, ограничивающие пиковое значение затворных токов  $I_{Gpeak}$ , оказывают большое влияние на динамические характеристики ключей: скорость переключения  $di/dt$  и уровень потерь  $E_{sw}$ . Увеличение номинала  $R_G$  снижает скорость коммутации, а, следовательно, и амплитуду переходных перенапряжений, но приводит к возрастанию  $E_{sw}$ . При выборе резисторов затвора приходится учитывать массу различных факторов, включая требования по ЕМИ, поскольку скорость переключения IGBT непосредственно влияет на спектр и уровень излучаемых электромагнитных помех.

## Звено постоянного тока

Звено постоянного тока (ЗПТ) является одним из главных элементов конструкции преобразователя, определяющим его надеж-

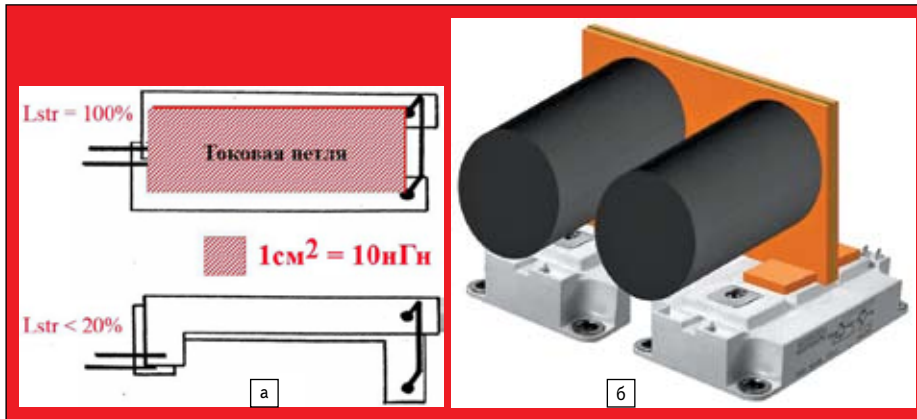


Рис. 4. а) Влияние площади токовой петли на величину паразитной индуктивности; б) копланарная конструкция DC-шины

ность, габариты и вес. Соединительные шины ЗПТ распределяют энергетические потоки между силовыми модулями и накопительными конденсаторами. Наиболее сложные конструкции используются в импульсных схемах с высокими значениями коммутируемых токов и напряжений и большими скоростями их изменения. Основными требованиями, предъявляемыми к шинам, являются минимальные значения индуктивностей и сопротивлений проводников и большая допустимая плотность тока в сочетании с высоким напряжением изоляции.

Любая шина, как реальный проводник конечной длины, имеет распределенную паразитную индуктивность  $L_B$ . При коммутации больших токов с высокой скоростью наличие этой индуктивности приводит к возникновению перенапряжений на силовых ключах. Например, при отключении IGBT напряжение на коллекторе возрастает на величину  $\Delta V = L_B \times di/dt$  относительно потенциала шины питания  $V_{DC}$ , где  $di/dt$  — скорость спада тока коллектора. Если суммарное значение  $V_{CE} = V_{DC} + \Delta V$  превысит предельно допустимый уровень, это может привести к пробое транзистора.

Как показано на рис. 4а, величина «токовой петли», определяемая несовпадением путей протекания тока по положительному и отрицательному проводникам шины питания, непосредственно связана со значением  $L_B$ . Именно поэтому оптимальной считается конструкция шины (в англоязычной литературе она называется sandwich), в которой (+) и (-) слои расположены плоскопараллельно. Вариант топологии практически идеального «сэндвича» для стандартных 62-мм корпусов IGBT показан на рис. 4б.

Для надежной работы преобразователя необходимо контролировать напряжение шины даже у отключенного от сети устройства. У модулей IGBT 12 класса, на которых построен блок SEMITEACH, максимально допустимое значение  $V_{DC}$  при котором разрешена коммутация ключей, составляет 750–800 В. Многие интеллектуальные силовые модули, такие как SKiP, обеспечивают защиту по это-

му параметру, однако SEMITEACH данной функцией не обладает. При повышении напряжения питания до 800 В контроллер должен выключать транзисторы и блокировать сигналы управления до тех пор, пока  $V_{DC}$  не упадет до безопасного уровня. Для мониторинга напряжения шины питания, как правило, используются дифференциальные усилители с высокоомным входом. Наличие тормозного чоппера позволяет активно ограничивать уровень  $V_{DC}$  с помощью внешнего тормозного резистора.

После отключения сетевого питания напряжения на конденсаторах звена постоянного тока сохраняется в течение нескольких минут, скорость его спада определяется номиналом балансируемых сопротивлений, установленных параллельно емкостям.

Если при включении блока не ограничивать ток заряда конденсаторов шины питания, они подвергаются ударному воздействию, что приводит к сокращению ресурса. Простейшим способом контроля тока, используемым во множестве практических схем, является установка резистора «предзаряда»  $R_{charge}$  и параллельного ему контактора между выпрямителем и инвертором. Для этой цели у модуля SEMITEACH имеются соответствующие выводы. Измерение величины  $V_{DC}$  в этом случае позволяет замыкать контактор после достижения этим напряжением соответствующего уровня. При выборе номинала  $R_{charge}$  следует учесть, что, как правило, сопротивления способны выдерживать десятикратную разовую перегрузку. Таким образом, если конвертор работает от сети 380 В (то есть выпрямленное напряжение  $V_{DC} \approx 540$  В), а мощность резистора выбрана 10 Вт, то  $R_{charge} \geq 540^2/100 \approx 3$  кОм.

В звене постоянного тока SEMITEACH использовано 2 последовательно соединенных электролитических конденсатора (ЭК) 2200 мкФ/400 В. Таким образом, общая емкость DC-шины составляет 1100 мкФ/800 В. Теоретически, это соотношение должно определяться требованиями по уровню пульсаций выпрямленного напряжения. Однако на практике основным ограничивающим фактором для ЭК является допустимый сред-

неквадратичный ток  $I_{RMS}$ . По этой причине емкость DC-шины, как правило, приходится делать больше, чем требуется по соображениям фильтрации.

Значение  $I_{RMS}$  зависит от режимов работы инвертора. Для нашего случая предельно допустимый ток на 1 емкость составляет 19,1 А при 40 °С или 8,2 А при 85 °С. 30-летний опыт компании SEMIKRON по разработке силовых преобразователей показывает, что эта норма удовлетворяет большинство практических применений среднего диапазона мощности.

Предельный ток конденсатора в общем случае ограничен уровнем активных потерь и перегревом. Потери мощности определяются как  $P_C = ESR \times I_{RMS}^2$ , где ESR (Equivalent Series Resistor) — эквивалентное последовательное сопротивление. Срок службы емкости (Life Time Expectancy, LTE) зависит от тепловых режимов работы, определяемых уровнем рассеиваемой мощности. Основным параметром для расчета LTE является температура в наиболее нагретой точке  $T_{hs}$  (обычно это геометрический центр), вычисляемая по формуле:

$$T_{hs} = P_C \times R_{th} + T_a,$$

где  $R_{th}$  — тепловое сопротивление конденсатора. При увеличении  $T_{hs}$  до 85...90 °С не только сокращается срок службы элемента, но и возрастает риск его пробоя.

Несмотря на очевидные технологические недостатки, электролиты по соотношению удельной емкости, рабочего напряжения и тока пульсаций до сегодняшнего дня остаются самыми популярными компонентами для построения ЗПТ-инверторов в диапазоне мощности до 1 МВт при напряжении до 1000 В. Основными проблемами их применения являются относительно высокое значение ESR и низкое рабочее напряжение. Для решения первого вопроса используются различные технологические приемы, улучшающие отвод тепла из центральных областей емкостей или применяется режим принудительного воздушного охлаждения.

В последние годы у ЭК появилась достойная альтернатива — полипропиленовые конденсаторы, отличающиеся существенно меньшим значением ESR и гораздо более высокой стойкостью к пробое. Подобные элементы имеют рабочее напряжение до 1500 В и выше, что позволяет решить еще один важный вопрос — необходимость последовательного соединения ЭК при работе выпрямителя от промышленных сетей с напряжением 380 В и выше. При последовательном включении емкостей необходимо обеспечить выравнивание напряжений, поскольку их утечки могут существенно отличаться. Для этой цели используются балансирующие резисторы  $R_{leak}$ , номинал которых должен быть существенно меньше сопротивления утечки ЭК (рекомендуемое соотношение 1:10). Очевидно, что при этом они сами становятся

источником дополнительных потерь, хотя играют и положительную роль, обеспечивая разряд емкости DC-шины после снятия питания. В модуле SEMITEACH использованы резисторы 22 кОм, при этом постоянная времени разряда составляет 46,2 с. Поэтому в целях безопасности рекомендуется использовать активный сброс напряжения, например, с помощью тормозного чоппера, который входит в состав SEMITEACH.

**Коммутационные перенапряжения и снабберы**

Правильно спроектированная копланарная шина позволяет снизить требования к снабберным цепям, необходимым для снижения уровня переходных перенапряжений, возникающих при коммутации. Паразитные колебательные процессы наводятся в контурах, образованных распределенными индуктивностями и емкостями шин, силовых транзисторов, диодов, конденсаторов (рис. 5).

В общем случае номинал снаббера  $C_s$  вычисляется исходя из заданного уровня перенапряжения  $V_{os}$  и значения энергии, запасенной в паразитной индуктивности шины  $L_B$  при коммутации тока  $I_{peak}$ :

$$V_{os} = I_{peak} \times \sqrt{\frac{L_B}{C_s}}$$

Снабберы применяются как для ограничения переходных перенапряжений, так и для снижения динамических потерь в силовых ключах. В последнем случае они используются для формирования траектории переключения: емкости, установленные параллельно цепи «коллектор – эмиттер», снижают скорость нарастания напряжения, индуктивности в цепях коллектора, ограничивают скорость нарастания тока.

Конфигурация снабберной схемы зависит от многих параметров — типа силовых модулей, рабочей частоты и параметров нагрузки. Практически все современные транзисторы и модули IGBT имеют прямоугольную область безопасной работы (ОБР или SOA — Safe Operating Area), то есть допускают работу в ре-

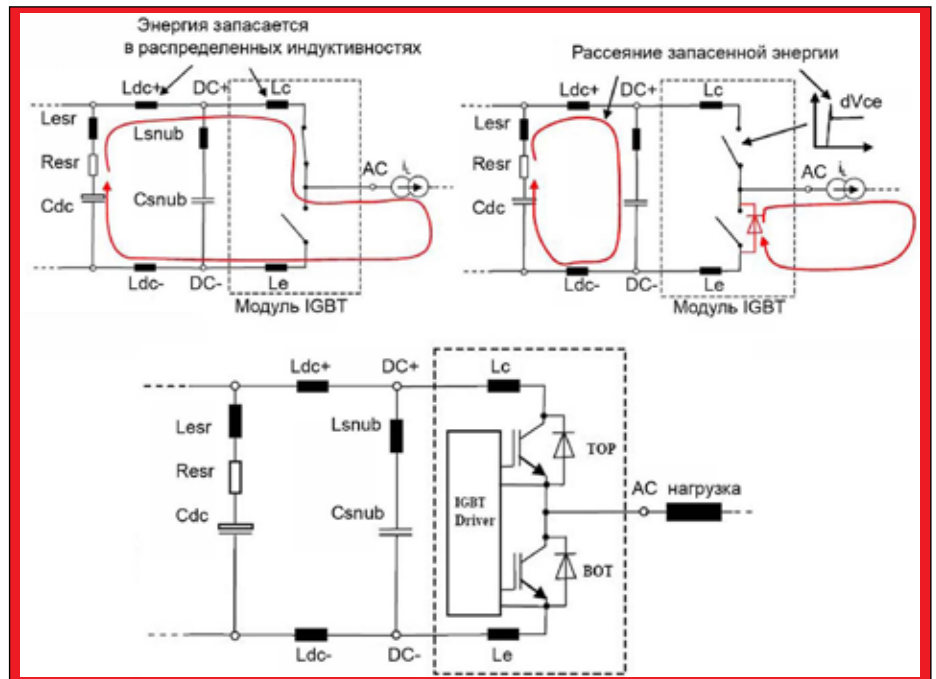


Рис. 5. Процесс коммутации тока в полумостовой ячейке инвертора

жиме «жесткого переключения», когда коммутируются максимальный ток и напряжение. В этом случае главная задача снабберов — ограничение переходных перенапряжений.

Простейший снаббер представляет собой низкоиндуктивный пленочный конденсатор, установленный параллельно шинам питания полумоста. Именно такой вариант рекомендуется для безопасной эксплуатации модулей IGBT. Конструкция снабберного конденсатора должна обеспечивать не только минимальную распределенную индуктивность, но и удобство подключения к терминалам силового модуля. Внешний вид специализированных конденсаторов показан на рис. 6б-г. Применение обычной высоковольтной емкости (рис. 6а) в качестве снаббера недопустимо.

На рис. 7а показан график изменения напряжения  $V_{CE}$  «коллектор – эмиттер» при выключении силового ключа. Пик напряжения  $\Delta V_1$  вызывается паразитной индуктивностью цепи снаббера  $L_S$ ; амплитуду перенапряже-

ния при известной скорости изменения тока  $di/dt$  можно рассчитать по формуле:

$$\Delta V_1 = L_S \times di/dt.$$

После окончания пика  $\Delta V_1$  начинается рост переходного напряжения  $\Delta V_2$ , вызываемого зарядом емкости снаббера. Амплитуда  $\Delta V_2$  зависит от емкости снаббера и энергии, запасенной в паразитной индуктивности DC-шины:

$$\Delta V_2 = L_B \times i_c^2 / C_s.$$

При заданных значениях  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  приведенные выражения можно использовать для вычисления емкости снаббера и его максимально допустимой индуктивности. Обратите внимание на то, что значение  $C_s$  оказывается прямо пропорциональным величине паразитной индуктивности шины. Таким образом, правильная топология си-

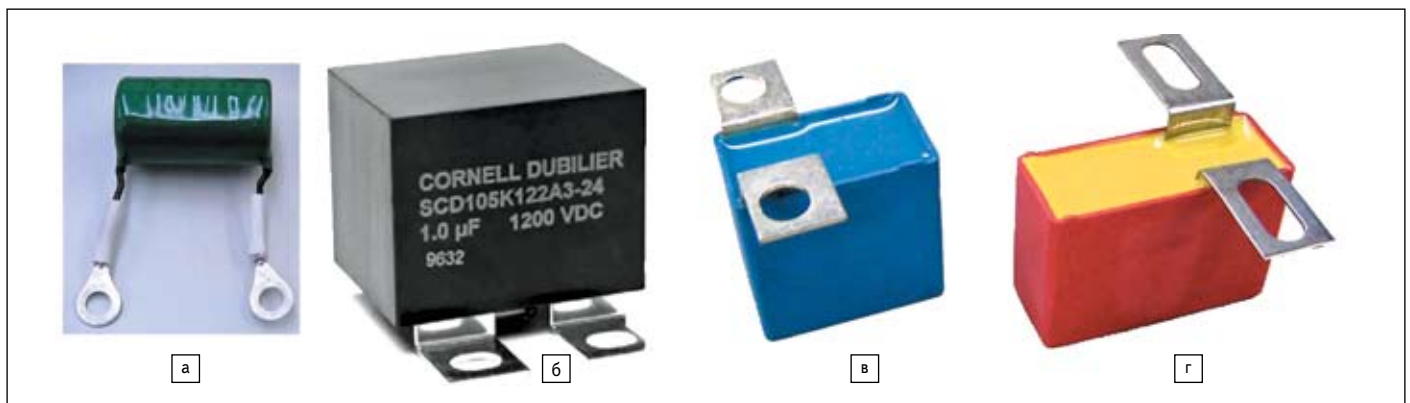


Рис. 6. Конструкции снабберных конденсаторов

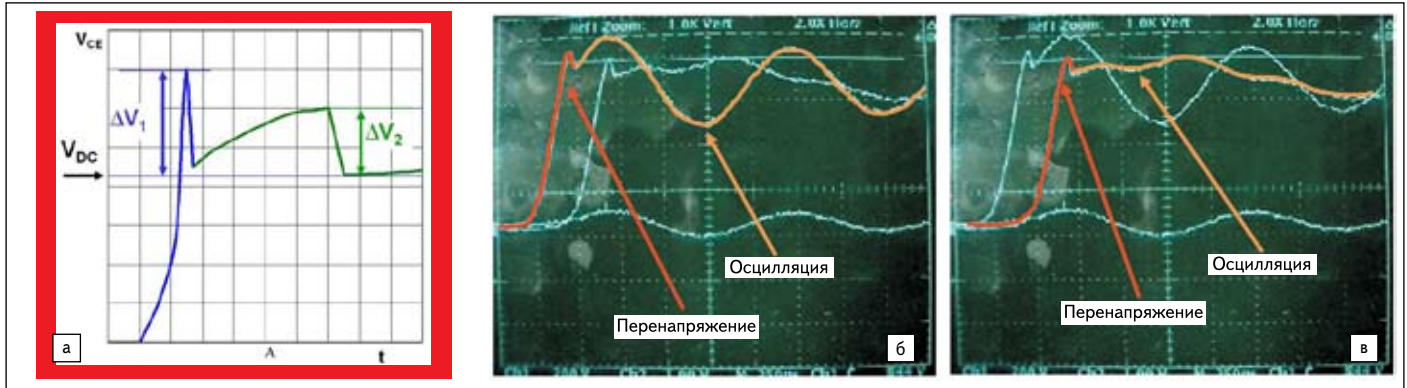


Рис. 7. Влияние снабберных цепей на величину переходного перенапряжения:

а) напряжение  $V_{CE}$  при отключении транзистора; б) результат при неудачном выборе снаббера; в) результат при удачном выборе снаббера

лового каскада, обеспечивающая минимальные значения паразитных индуктивностей, позволяющая снизить требования к снабберным цепям.

### Защита от перегрева

В блоке SEMITEACH предусмотрено 2 вида тепловой защиты. На радиаторе сборки установлен биметаллический термоконттакт, предназначенный для ее отключения в случае перегрева (номинальная температура отключения — 71 °C, гистерезис — около 20 °C). Основным его назначением является защита блока от аварийного повышения температуры, вызванного отказом вентилятора или аномально длительным током перегрузки. В простейшем случае отключение инвертора обеспечивается соединением термоконтakta последовательно с питанием драйвера.

На теплоотводе установлен также линейный сенсор LM335Z производства National Semiconductor, предназначенный для точного измерения температуры радиатора. Микросхема представляет собой стабилитрон с нормированной линейной зависимостью напряжения от температуры (10 мВ/°C). С помощью этого датчика можно примерно оценить уровень потерь  $P_D$  инвертора, пользуясь формулой:

$$P_D = \Delta T \times R_{th(s-a)}$$

где  $\Delta T$  — разница температур радиатора и окружающей среды, а  $R_{th(s-a)}$  — тепловое сопротивление радиатора P3/265, равное 96,2 °C/Вт.

### Расчет тепловых режимов

Данная глава посвящена методике анализа тепловых режимов, являющегося основ-

ным этапом при проектировании силового преобразовательного устройства. Причиной генерации потерь мощности силовыми ключами является неидеальность их релейных характеристик: отличное от нуля падение напряжения в состоянии проводимости и наличие зоны перекрытия тока/напряжения при переключении (зеленая и красная области на рис. 8а, б).

Соответственно, потери мощности подразделяются на статические (или потери проводимости) и динамические (потери переключения), влияние токов утечки в закрытом состоянии обычно не принимаются во внимание. Общая формула для расчета мощности рассеяния за период коммутации  $T$  имеет следующий вид:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CE}(t) \times i(t) dt.$$

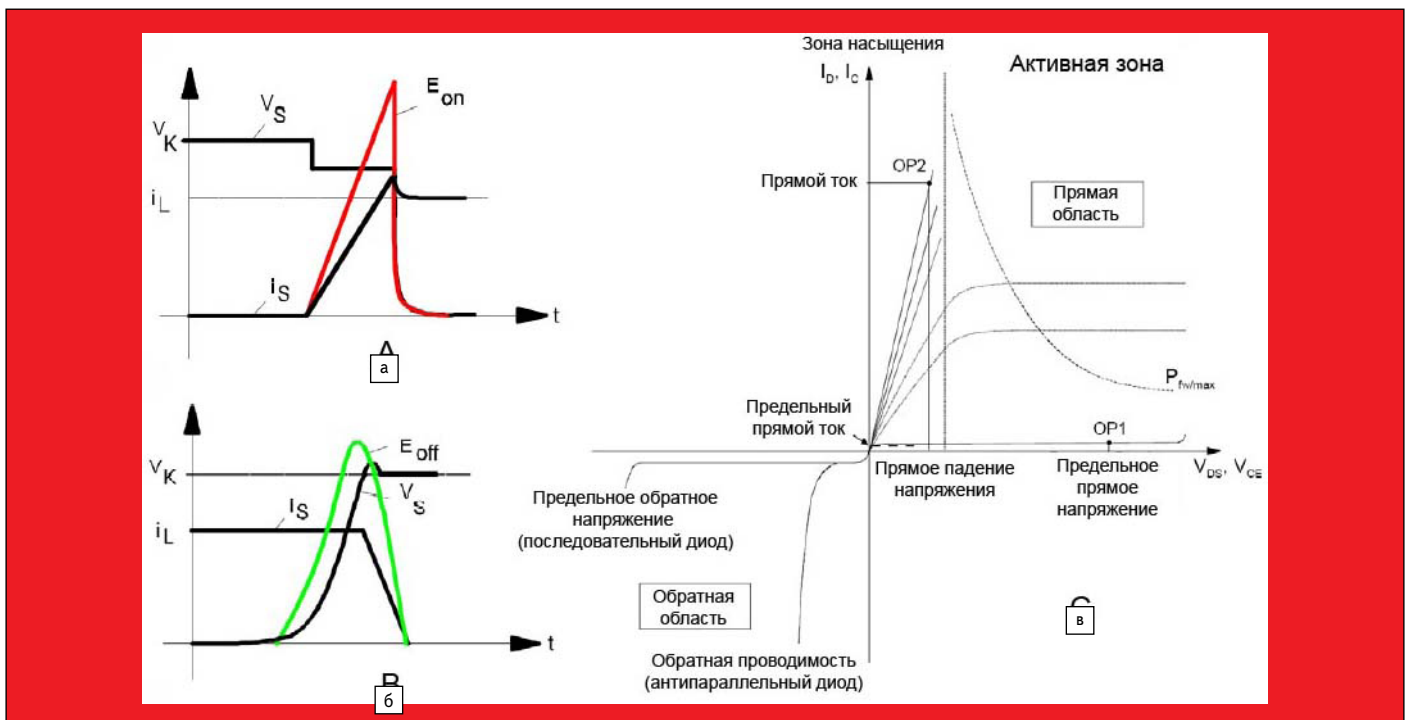


Рис. 8. а) Включение IGBT; б) выключение IGBT; в) базовые выходные характеристики силового модуля (IGBT + диод)

Организация отвода тепла, выделяемого при работе силовых ключей, и оптимизация системы охлаждения является одной из главных задач проектировщика преобразовательного устройства. С ростом мощности устройства и соответствующим увеличением уровня тепловыделения эта задача усложняется. Модуль генерирует потери в состоянии проводимости, включения, выключения, то есть всегда, когда через него протекает ток и падает напряжение.

Главным ограничением мощностных характеристик любого преобразовательного устройства является температура чипов  $T_j$ , которая ни при каких условиях не должна превышать предельных значений  $T_{jmax}$ . Дальнейший перегрев чреват нарушением электрических характеристик кристалла (например, резким ростом тока утечки), повреждением его выводов, разрушением связи с изолирующей подложкой. Для большинства современных IGBT и диодов  $T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$ , внедрение новых типов кристаллов (Trench 4) позволяет увеличить это значение на  $25^\circ\text{C}$ .

Несмотря на постоянное совершенствование технологий и повышение надежности компонентов, расчеты следует производить с некоторым запасом по перегреву, учитывая разброс параметров и возможные производственные дефекты сборки. Для преобразователей на базе IGBT, КПД которых составляет 95–98%, безопасным и разумным считается тепловой режим, когда  $T_j$  не превышает  $125^\circ\text{C}$  при номинальной мощности и  $150^\circ\text{C}$  в случае кратковременной перегрузки.

### Потери проводимости

Статические потери создаются при протекании тока  $I_C$  через открытый транзистор. Падение напряжения определяется по характеристике  $V_{CE(sat)} = f(I_C)$ , семейство подобных графиков для различных значений  $V_{CE}$  обязательно приводится в документации. Аналитически прямое напряжение ключа вычисляется по формуле  $V_{CE} = V_{CE0} + R_{ce} \times I_C$  определяющей падение напряжения на эквивалентном резисторе  $R_{ce}$  при протекании тока  $I_C$ . Значения  $V_{CE0}$  (статическое пороговое напряжение «коллектор – эмиттер») и  $R_{ce}$  (эквивалентное сопротивление в состоянии проводимости) также можно найти в спецификации IGBT.

Рассеиваемая в состоянии проводимости мощность  $P_{cond}$  рассчитывается с помощью выражения:

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} V_{CE0} \times i(t) + R_{ce} \times i^2(t) dt = \frac{1}{T} \left[ V_{CE0} \int_0^T i(t) dt + R_{ce} \int_0^T i^2(t) dt \right] = V_{CE0} \times I_{av} + R_{ce} \times I_{rms}^2$$

Для примера рассчитаем мощность рассеяния 3-фазного инвертора, работающего в режиме синусоидальной линейной ШИМ с коэффициентом модуляции:

$$m = 2(\sqrt{3}/3) \times (U_{peak}/U_d), 0 \leq m \leq 1.$$

При расчете используются следующие допущения:

- Время переключения транзистора и диода не учитывается.
- Температура кристалла постоянна (это справедливо при частоте огибающей  $F_{out}$  не ниже 50 Гц).
- Пульсации выходного тока с частотой ШИМ не учитываются.
- Прямая характеристика IGBT линейна, как в формуле для  $V_{CE}$ .

Потери проводимости IGBT и диода для данных условий:

$$P_{condIGBT} = \frac{1}{2} \left( V_{CE0} \frac{1}{\pi} + r \frac{I^2}{4} \right) + m \times \cos j \times \left( \frac{1}{8} V_{CE0} + \frac{r \times I^2}{3\pi} \right),$$

$$P_{condD} = \frac{1}{2} \left( V_{d0} \frac{1}{\pi} + r \frac{I^2}{4} \right) - m \times \cos j \times \left( \frac{1}{8} V_{d0} + \frac{r \times I^2}{3\pi} \right).$$

### Потери переключения

Энергия коммутационных потерь  $E_{sw}$  определяется площадью перекрытия кривых тока и напряжения при переключении транзистора. Это иллюстрируют цветные кривые  $E_{on}/E_{off}$  на рис. 8а, б. Соответствующие измерения, производимые в лаборатории SEMIKRON, позволяют на основе этих данных строить зависимость энергии включения и выключения от тока  $I_C$  при определенном напряжении на коллекторе (например,  $V_{CE} = 600\text{ В}$ ) и резисторе затвора  $R_G$ . Такие кривые можно найти в технических характеристиках любого IGBT.

В нашем случае анализ графиков  $E_{sw} = f(I_C)$  показывает, что эта зависимость является почти линейной, что позволяет применить упрощенное выражение для расчета:

$$(E_{on} + E_{off}) = k \times I_C (V_{CE0} R_G).$$

Используя аналогичные допущения, можно вывести выражение для зависимости энергии от напряжения:

$$(E_{on} + E_{off}) = k' \times V_{CE} (I_C R_G).$$

Следовательно, для постоянного тока:

$$P_{sw} = f_{sw} (E_{on} + E_{off}) = f_{sw} \times I_C \times V_{CE} \times K.$$

По методике, описанной в предыдущем случае, определим динамические потери для схемы 3-фазного инвертора:

$$P_{ON+OFF\_IGBT} = \frac{\sqrt{2} \times I_{RMS}}{\pi} f_{sw} \times V_{CE} \times K.$$

### Потери мощности и температура перегрева

Для обеспечения надежной и безотказной работы преобразователя необходимо обеспечить отвод тепла от силовых кристаллов. Для этой цели используется теплоотвод (радиатор), который может работать в режиме естественной конвекции или принудительного воздушного/жидкостного охлаждения. Перегрев радиатора на 1 Вт рассеиваемой мощности задается тепловым сопротивлением  $R_{th(s-a)}$ , определяемым как отношение перепада температур к рассеиваемой мощности  $R_{th(s-a)} = (T_s - T_a)/P_D$ .

Для моделирования тепловых процессов удобно пользоваться эквивалентной электрической схемой, на которой тепловые сопротивления заменяются электрическими, температура представляется в виде источника напряжения, а мощность — источником тока. Подобно перепадам напряжения определяются следующие градиенты температуры:

- «радиатор – окружающая среда»  $\Delta T_{ha}$ ;
- «корпус модуля – радиатор»  $\Delta T_{ch}$ ;
- «кристалл – корпус модуля»  $\Delta T_{jc}$ .

Тепловым сопротивлением обладают все элементы конструкции модуля и их соединения, через которые происходит распространение тепла в окружающую среду. Для улучшения эффективности охлаждения необходимо снижать величины  $R_{th}$ , что достигается с помощью следующих приемов:

- Толщина соединительных слоев между материалами должна быть минимальной. Для реализации этого условия в модулях прижимного типа SEMIKRON (например, SKiiP, MiniSKiiP) базовая плата исключена из конструкции, а керамическая DBC-подложка устанавливается непосредственно на радиатор.

- Установка модуля на радиатор должна выполняться с использованием теплопроводящей пасты, заполняющей воздушные пустоты и способствующей улучшению отдачи тепла на радиатор.

- Для каждого конкретного применения необходимо выбирать оптимальный тип радиатора. Например, увеличение площади его поверхности повышает коэффициент теплообмена с воздухом. Теплосток, обладающий большей массой, имеет и более высокую теплоемкость, что способствует сглаживанию температурных пульсаций.

Тепло, выделяемое силовыми чипами, через корпус модуля отводится на теплосток и далее в окружающую среду. Соответственно, основными параметрами, используемыми при тепловом расчете, являются:

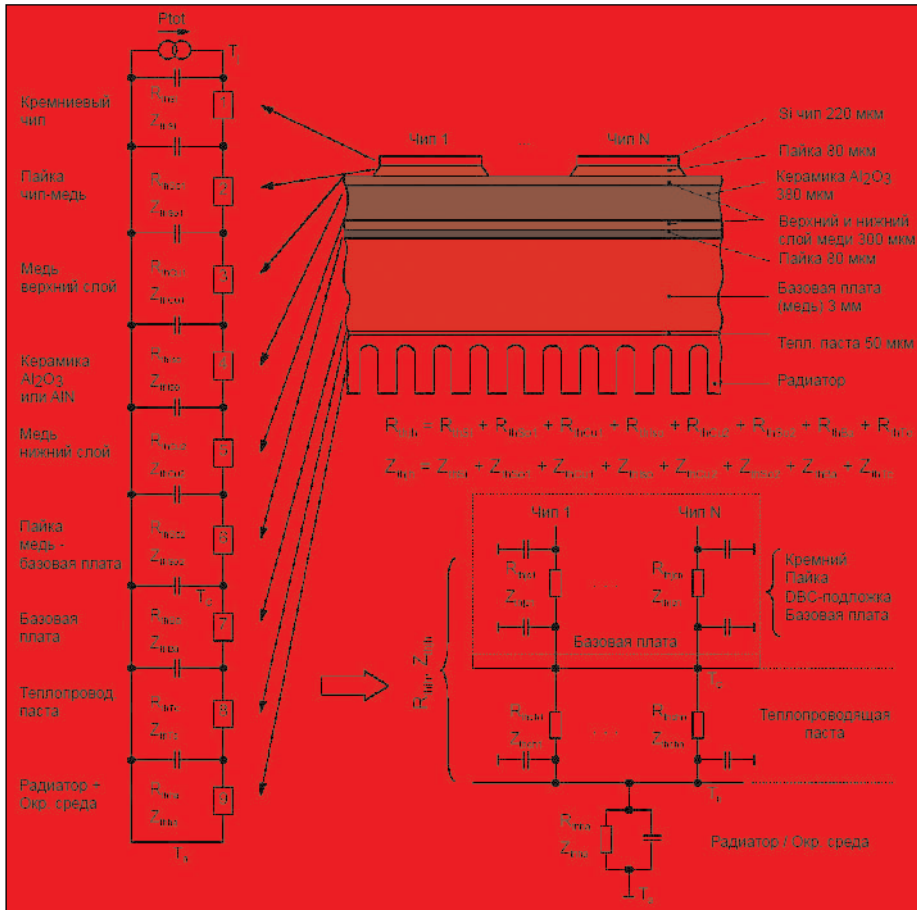


Рис. 9. Эквивалентная тепловая модель IGBT-модуля на радиаторе

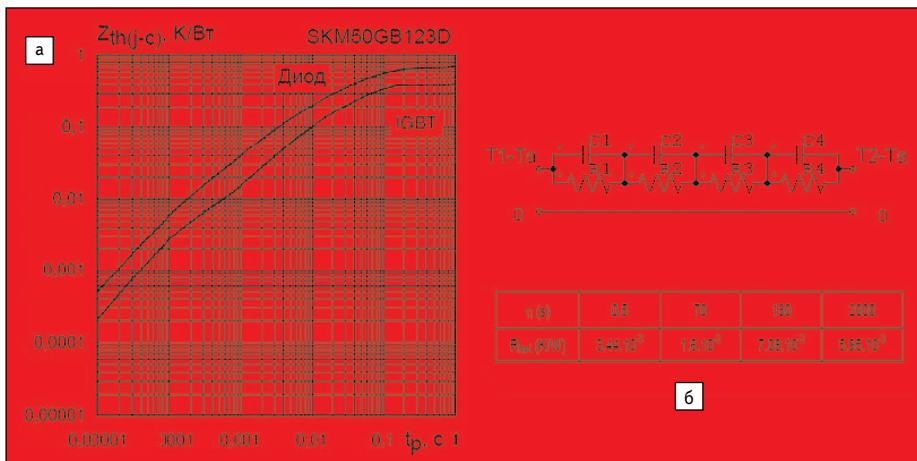


Рис. 10. а) Графики динамического теплового импеданса  $Z_{th(j-c)}$ ; б) эквивалентная электрическая схема

- тепловое сопротивление «кристалл – корпус»  $R_{th(j-c)}$ ;
- тепловое сопротивление «корпус – радиатор»  $R_{th(c-h)}$ ;
- тепловое сопротивление «радиатор – окружающая среда»  $R_{th(h-a)}$ .

Необходимо отметить, что указанные характеристики определяют только стационарные тепловые режимы без учета кратковременных перегрузок. Как видно из графиков на рис. 10, переходные состояния могут быть проанализированы с помощью так называемого динамического теплового импеданса  $Z_{th}$ , являющегося времязависимым параметром.

При моделировании тепловых режимов с помощью эквивалентной электрической схемы кривая  $Z_{th}$  имитируется цепью, состоящей из последовательно соединенных RC-звеньев. Компания SEMIKRON определяет значения для 4–5 таких звеньев (рис. 10), что дает достаточно высокую точность аппроксимации даже при кратковременных перегрузках. Таблицы значений  $R_{thi}$  и тепловой постоянной времени  $\tau_i$  можно най-

ти в справочнике “SEMIKRON Databook”. При длительности импульса проводимости  $t_p$  более 0,5 с, что в несколько раз превышает тепловую постоянную времени чипа, импеданс  $Z_{th}$  можно не анализировать. Такое состояние рассматривается как установившееся, и для расчета перегрева в этом случае используется статическое сопротивление  $R_{th}$ . Поэтому в отношении радиатора, обладающего очень высокой тепловой инерцией, рассматривается только статический параметр  $R_{th(s-a)}$ .

Тепловой расчет силового каскада является одним из важнейших этапов процесса разработки, который позволяет подтвердить правильность выбора модуля для заданных условий работы. Для обеспечения экономической эффективности изделия желательно максимально использовать нагрузочные характеристики силовых ключей, дабы не переплачивать за неоправданный запас по мощности. Решение этой задачи немыслимо без специализированного программного обеспечения, призванного максимально упростить и автоматизировать процесс проектирования, устранить возможные ошибки, оптимизировать выбор элементной базы.

Одним из самых эффективных средств расчета тепловых режимов является программа SEMISEL, разработанная специалистами компании SEMIKRON и доступная на сайте [4]. Среди аналогичных продуктов SEMISEL является наиболее автоматизированной, точной и простой в использовании программой. Она пригодна для анализа большинства существующих практических схем, позволяет оптимально выбрать режимы работы и условия охлаждения и требует от пользователя ввода только числовых исходных данных. Возможностям SEMISEL и особенностям работы с ней посвящено достаточно много публикаций [9, 10], а на рис. 11 показаны основные рабочие окна программы: ввод исходных данных и результаты вычислений. Анализ был выполнен для следующих режимов работы блока SEMITEACH:

- напряжение питания  $V_{in}$  — 600 В;
- выходное напряжение  $V_{out}$  — 400 В;
- выходной ток  $I_{out}$  — 30 А;
- частота ШИМ  $f_{sw}$  — 8 кГц;
- $\cos \varphi$  — 0,85;
- коэффициент/длительность перегрузки — 1,2/20 с.

Как показывают расчеты, устройство при этом обеспечивает безопасные режимы работы даже с учетом 20% перегрузки, поскольку температура чипов не превышает 115 °С.

## Заключение

Проектирование преобразователей высокой мощности является сложнейшей задачей, требующей внимательного подхода на всех этапах проектирования. Успешная разработка подобных изделий немыслима без учета распределенных параметров конс-

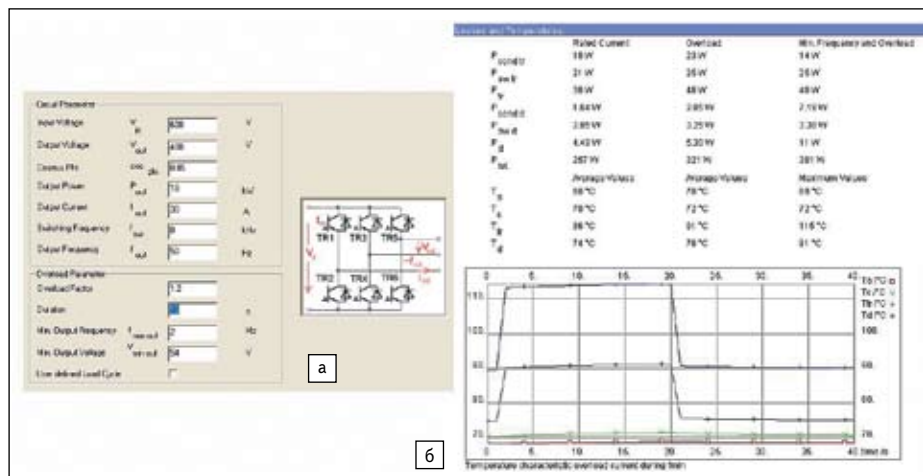


Рис. 11. а) Окно задания режимов работы; б) результаты расчета SEMISEL

### Литература

- Sargos F. IGBT Power Electronics Teaching System. Principle for sizing power converters. AN-8005, SEMIKRON International GmbH, 2008.
- Schreiber D. High Power IGBT STACKs Produced by SEMIKRON. Presentation materials.
- Колпаков А. И. Особенности проектирования частотных преобразователей средней и большой мощности // Электронные компоненты. 2003. № 6.
- [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
- Nicolaï U., Reimann T., Petzoldt J., Lutz J., Martin E. P. Application Manual. Power Modules. First Edition. SEMIKRON.
- International, 2000. ISBN 3-932633-46-6. [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
- Application Note. First Edition. 1998. Power Electronics Teaching System, SEMIKRON.
- Lamp J. Application Note, AN 7006. 2008., SEMIKRON.
- Колпаков А. И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SEMISEL // Электронные компоненты. 2004. № 6.
- Колпаков А. И. SEMISEL V3.1 — особенности новой версии программы // Силовая электроника. 2008. № 3.

трукции и проведения многоступенчатого теплового расчета.

Демонстрационная сборка силового каскада электропривода SEMITEACH, разработанная специалистами SEMIKRON, способна помочь студентам и начинающим инженерам в освоении принципов проектирования си-

ловых преобразовательных устройств и проведении теплового расчета. По всем вопросам следует обращаться в офис технической поддержки SEMIKRON в Санкт-Петербурге, приобрести блок можно через официальных дистрибуторов компании в Москве, Санкт-Петербурге и Новосибирске. ■