

Программа SEMISEL – тепловые расчёты силовых схем

Печатается с разрешения журнала Chip News Украина (<http://www.chipnews.com.ua>)

Андрей Колпаков, Андрей Гладских

Расчёт тепловых режимов работы силового каскада является одним из важнейших этапов процесса разработки, позволяющим подтвердить правильность выбора и применения электронного компонента, что во многом определяет надёжность работы устройства. В статье описаны основные особенности программы теплового расчёта SEMISEL и в виде примера приведены расчёты трёхфазного выпрямительного моста, чоппера и трёхфазного инвертора.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное ценовое давление рынка и стремление к повышению эффективности преобразовательных устройств сделали выбор элементной базы одним из самых ответственных этапов проектирования. Не менее ответственной фазой разработки является и расчёт тепловых режимов, важность которого обусловлена непрерывным увеличением плотности мощности.

Растущее многообразие решений, применяемых в силовой электронике, и специализация типов компонентов привели к тому, что сравнение близких по назначению силовых модулей на основании только справочных данных стало серьёзной проблемой. Предельные значения тока и напряжения транзистора или модуля, обычно вынесенные в заголовок технических характеристик, не дают разработчику никаких данных для расчёта, а лишь позволяют в первом приближении сравнить один элемент с другим. Сложность выбора компонента заключается и в том, что желательно максимально использовать его мощностные характеристики, чтобы не платить лишних денег за неоправданный запас мощности.

Проектирование силового каскада является сложным и ответственным процессом, требующим от современ-

ного разработчика большого объёма знаний и опыта. Автоматизированные средства разработки, позволяющие решать большинство поставленных задач, способны оказать неоценимую помощь при разработке и свести к минимуму ошибки проектировщика.

Что такое SEMISEL?

Тенденции современного рынка силовой электроники – сокращение сроков проектирования, рост мощностей и усиление требований к надёжности – делают невозможным процесс разработки без специализированного программного обеспечения. Программы для расчёта режимов работы мощных преобразовательных устройств предлагаются практически всеми основными производителями силовых модулей. Наиболее популярные компьютерные средства разработки доступны на сайтах компаний Eupes/Infineon, Mitsubishi, Semikron. Как правило, данные программы предназначены для расчёта мощности потерь и температуры перегрева, с их помощью разработчик может с различной степенью достоверности выбрать силовой ключ на основании заданных режимов работы.

Компания Semikron предложила для массового применения свою программу автоматизированного расчёта и выбора компонентов SEMISEL [1] раньше своих конкурентов. Первый вариант программы появился на сайте фирмы в 2001 г., и с тех пор SEMISEL постоянно совершенствуется, обновляется, пополняется база данных. Последняя версия SEMISEL Version 4.0.1 пригодна для моделирования тепловых режимов любых силовых ключей на основании их технических характеристик.

Программа SEMISEL, on-line-версия которой доступна по ссылке semisel.semikron.com, может быть использована для анализа практически всех используемых конфигураций схем в реальных условиях эксплуатации. Последние варианты SEMISEL способны помочь разработчику практически на всех этапах проектирования, включая выбор драйвера, расчёт режимов его работы, а также оптимизацию охлаждающей системы любого типа или моделирование заданного рабочего цикла.

В первую очередь программа предназначена для решения следующих задач:

- оптимальный выбор силового ключа для заданной конфигурации схемы и условий эксплуатации;
- сравнение эффективности работы различных компонентов, поиск замены;
- достижение оптимальной технической и экономической эффективности;
- нахождение оптимального соотношения основных электрических характеристик (частоты переключения, эффективности системы охлаждения, перегрузочной способности и т.п.);
- оценка запаса надёжности по предельным режимам.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные потери в силовых транзисторах и модулях создаются непосредственно в кристалле. Тепло, выделяемое полупроводниковым кристаллом, отводится через корпус элемента на теплоотвод и далее – в окружающую среду. Градиент температур между кристаллом и окружающим воздухом является функцией рассеиваемой мощности и тепловых сопротивлений материалов, из которых состоит корпус элемента, и материалов теплоотвода.

На рис. 1 показаны в разрезе слои стандартного модуля IGBT, участвующие в процессе теплопередачи: 1 – вывод чипа (Al), 2 – чип (Si), 3 – припой,

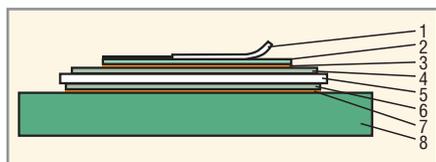


Рис. 1. Элементы тепловой структуры модуля IGBT

4 – металлизация (Cu), 5 – керамика (Al₂O₃), 6 – металлизация (Cu), 7 – припой, 8 – основание (Cu). Слои 4, 5, 6 образуют так называемую DCB (Direct Copper Bonding) плату – керамическую пластину, покрытую с двух сторон медной фольгой методом диффузионного напыления. Для корректного теплового анализа должны быть определены тепловые сопротивления каждого из показанных элементов. Модуль устанавливается на радиатор через теплопроводящую пасту, и эти элементы также должны быть учтены при расчёте. Кроме того, для правильного анализа динамических тепловых процессов необходимо знать теплоёмкость соответствующих слоёв.

В справочных данных полупроводниковых элементов обычно приводятся предельные параметры тока для постоянного (continuous) и импульсного (pulse) режимов. При реальной работе кристалла, например, в режиме высокочастотной модуляции, ток и температура кристалла имеют пульсирующий характер и амплитуда импульсов тока может значительно превышать предельные постоянные значения. Для теплового расчёта в таких режимах температура кристалла определяется с помощью графика динамического теплового импеданса Z_{thjc} . Исходными данными являются потери мощности за один импульс, длительность импульса и коэффициент заполнения.

Для компьютеризации расчёта график динамического теплового импеданса выражается в виде аналитической функции, и градиент температуры рассчитывается по формуле:

$$\Delta T(t) = PZ_{thjc} = p \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-t/\tau_i}]. \quad (1)$$

Специалисты фирмы Semikron произвели вычисления компонентов формулы для всех модулей, выпускаемых фирмой. Это позволило сделать процесс расчёта полностью автоматизированным, простым и точным.

На рис. 2 показаны эпюры импульсов мощности и соответствующие им графики изменения температуры кристалла. Для расчёта градиента температуры служат следующие формулы, используемые программой SEMISEL:

- одиночный кратковременный импульс (температура не достигает установившегося значения):

$$\Delta T(t_1) = P \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-t_1/\tau_i}],$$

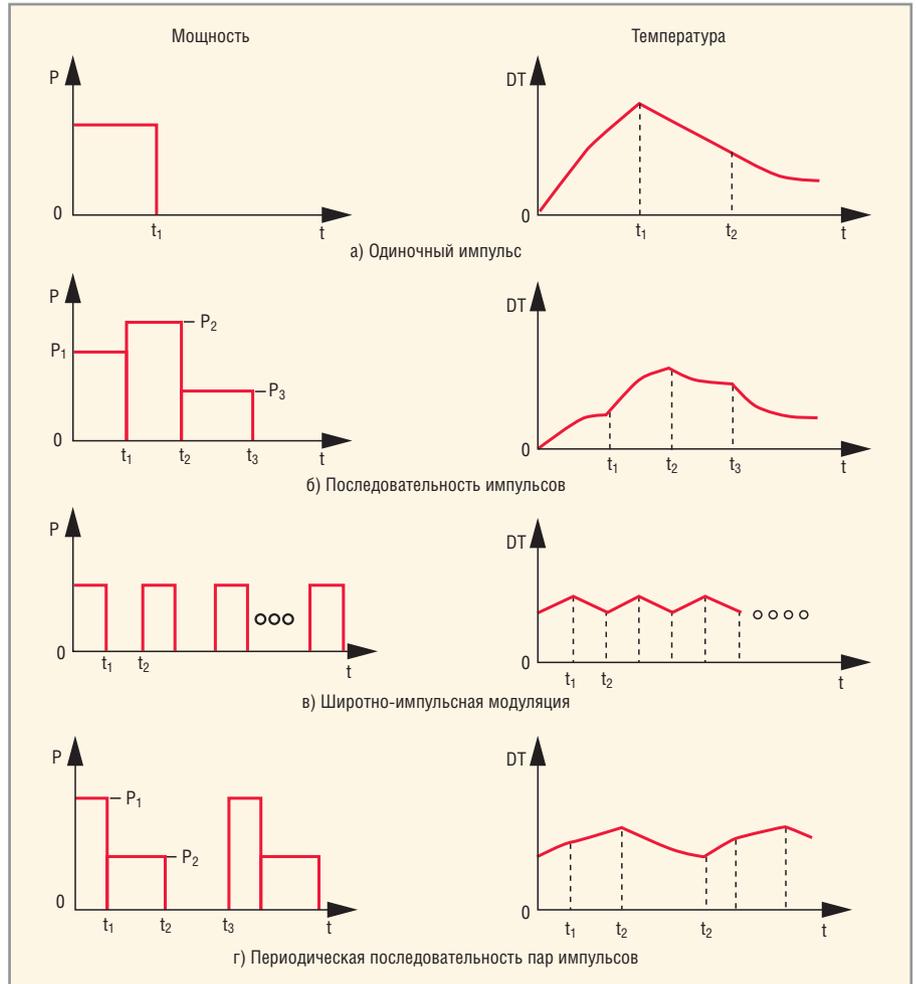


Рис. 2. Тепловые режимы работы силовых модулей

$$\Delta T(t_2) = P \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-t_2/\tau_i}] - P \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-(t_2-t_1)/\tau_i}] + P_2 \sum_{i=1}^n R_i \frac{1 - e^{-(t_2-t_1)/\tau_i}}{1 - e^{-t_3/\tau_i}}.$$

- последовательность одиночных прямоугольных импульсов. Этот режим используется для аппроксимации импульсов произвольной формы. Формула дана для последовательности из Q импульсов:

$$\Delta T(t_Q) = \sum_{q=1}^Q (P_q - P_{q-1}) \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-(t_Q-t_{q-1})/\tau_i}];$$

- широтно-импульсная модуляция с постоянным коэффициентом заполнения:

$$\Delta T = P \sum_{i=1}^n R_i \frac{1 - e^{-t_p/\tau_i}}{1 - e^{-t_p/\tau_i}};$$

- периодическая последовательность пар различных импульсов:

$$\Delta T = P_1 \sum_{i=1}^n R_i \frac{[1 - e^{-t_1/\tau_i}] e^{-(t_2-t_1)/\tau_i}}{1 - e^{-t_3/\tau_i}} +$$

Реальные режимы работы могут рассматриваться как различные сочетания указанных режимов. Далее необходимо определить тепловое сопротивление R_{thjc} . Для этого служат выражения:

$$R_{(thjc)p} = \sum_{i=1}^n R_i \frac{1 - e^{-t_p/\tau_i}}{1 - e^{-1/(\tau_i f)}}, \quad (2)$$

$$t_p = \frac{\theta}{360 f}, \quad (3)$$

где t_p – длительность импульса, выраженная в формуле (3) через угол отсечки θ , f – рабочая частота.

Данные выражения справедливы как для кратковременных одиночных импульсов, так и для высокочастотных импульсных режимов. Для расчёта значения $R_{(thjc)p}$ используется значение максимальной рассеиваемой мощности за период проводимости.

Приведённые выше формулы даны отнюдь не для того, чтобы испугать

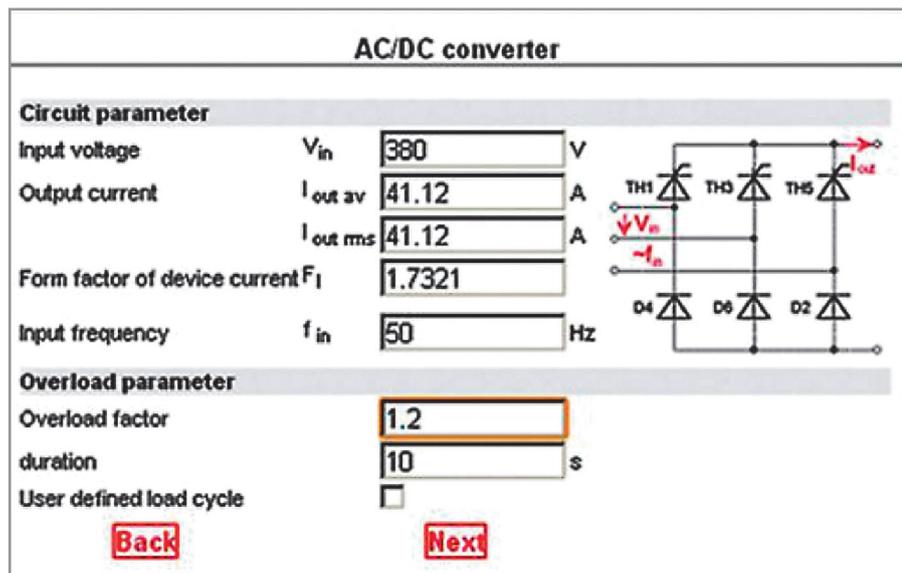


Рис. 3. Исходные данные для расчёта трёхфазного выпрямительного моста

пользователя. Они отражают общие принципы, заложенные в программе SEMISEL, и предназначены для специалистов, которые хотят понять физику происходящих процессов. А сама программа разработана таким образом, чтобы максимально упростить процесс расчёта.

Одним из главных достоинств программы SEMISEL по сравнению с аналогичными средствами расчёта является широкий выбор схем AC/DC-, AC/AC-, DC/AC- и DC/DC-преобразователей:

- выпрямители AC/DC:
 - В2U – однофазный выпрямительный мост,
 - В2Н – однофазный тиристорный мост с управлением в верхнем плече,
 - В2С – однофазный полностью управляемый тиристорный мост,
 - В6U – трёхфазный выпрямительный мост,
 - В6Н – трёхфазный полууправляемый тиристорный мост,
 - В6С – трёхфазный полностью управляемый тиристорный мост;
- регуляторы переменного напряжения AC/AC:
 - W1C – тиристорный ключ,
 - W3C – трехфазный тиристорный ключ;
- инверторы DC/AC:
 - inverter_1_phases – полный мостовой каскад (в режиме разрывного и непрерывного тока),
 - inverter_3_phases – трёхфазный инвертор,
 - direct inverter – обычный мостовой инвертор в режиме «флипплоп»,

– 3-level inverter – трёхуровневый инвертор;

- преобразователи постоянного тока DC/DC:
 - buck – чоппер верхнего плеча,
 - boost – чоппер нижнего плеча,
 - SR-мотор – вентильный индукторный двигатель.

Далее мы рассмотрим на различных примерах, как непосредственно работает программа SEMISEL. Примером послужит «сквозное» проектирование преобразователя частоты, состоящего из трёхфазного выпрямительного моста, чоппера системы торможения и IGBT-инвертора. Исходные данные для расчётов: $P_n = 22 \text{ kW}$, $\cos\phi_{std} = 0.8$; 3 phase 380 V; possible overload 20% time 10 sec; $f_{pwm-max}$ – до 12 kHz; $f_{pwm-std}$ – 4.5 kHz; sinusoidal PWM. Полная мощность системы при стандартном косинусе: $S_{nom} = P_n/0.8 = 27.5 \text{ kVA}$.

Трёхфазный выпрямительный мост

Рассмотрим вариант расчёта трёхфазного полууправляемого выпрямителя. После выбора соответствующей конфигурации (В6Н) на экране появляется схема и меню (рис. 3), в котором требуется ввести значения соответствующих параметров:

- V_{in} – линейное напряжение;
- $I_{out av}$, $I_{out rms}$ – среднее и среднеквадратичное значение выходного тока;
- F_1 – так называемый форм-фактор – отношение среднеквадратичного и среднего тока выпрямительного моста (не нагрузки!). При индуктивной нагрузке $F_1 = 1,41$ для однофазного выпрямителя и $F_1 = 1,73$ для трёхфазного выпрямителя. Если вве-

дены значения $I_{out av}$ и $I_{out rms}$, то F_1 вычисляется автоматически;

- f_{in} – значение частоты входного сигнала (учитывается при расчёте потерь для быстрых диодов);
- Overload factor – процент перегрузки. При расчёте потерь используется метод последовательных приближений из 40 шагов и учитывается эффект саморазогрева;
- Duration – время перегрузки;
- User defined load cycle – эта опция используется, если форма выходного тока отличается от стандартной и определяется пользователем.

В нашем случае:

- фазный входной ток $I_{inp} = 34 \text{ A}$;
- выходной ток выпрямителя $I_d = P_n/535 = 41,12 \text{ A}$ (учитываем, что реактивный ток двигателя замыкается через батарею звена, поэтому при расчёте выпрямителя используем только номинальную мощность);
- коэффициент перегрузки – 1,2 на протяжении 10 с.

После заполнения всех необходимых граф программа предлагает различные типы выпрямителей, выпускаемых фирмой и подходящих для решения данной задачи (рис. 4). Дальнейшие действия необходимы для расчёта мощности потерь. Вы выбираете тип корпуса моста и непосредственно тип элемента из выпадающего меню. При использовании типовых значений параметра (typical values) тепловой расчёт производится для номинального режима работы, предельные значения (maximum values) необходимы для расчёта режима перегрузки.

Выбор элементной базы. Как говорил Леонид Быков устами киногероя фильма «В бой идут одни старики», – учите матчасть. Поэтому вначале, пожалуйста, ознакомьтесь с номенклатурой выпускаемых приборов, чтобы не ошибиться случайно раз в пять. «Запас карман не жмет», но денег уже требует [6].

Если хотите использовать библиотеку ранее выпускавшихся приборов (мало ли, вдруг где-то пара-тройка модулей пролежала в значке лет семь...), поставьте птичку в графе: Select your package and device x Add former generation.

Надеюсь, что читатель уже полистал ShortForm Semikron, если нет – в электронном виде можно найти здесь: <http://issuu.com/semikron/docs/semikronshort-form-2011-012> (или запро-

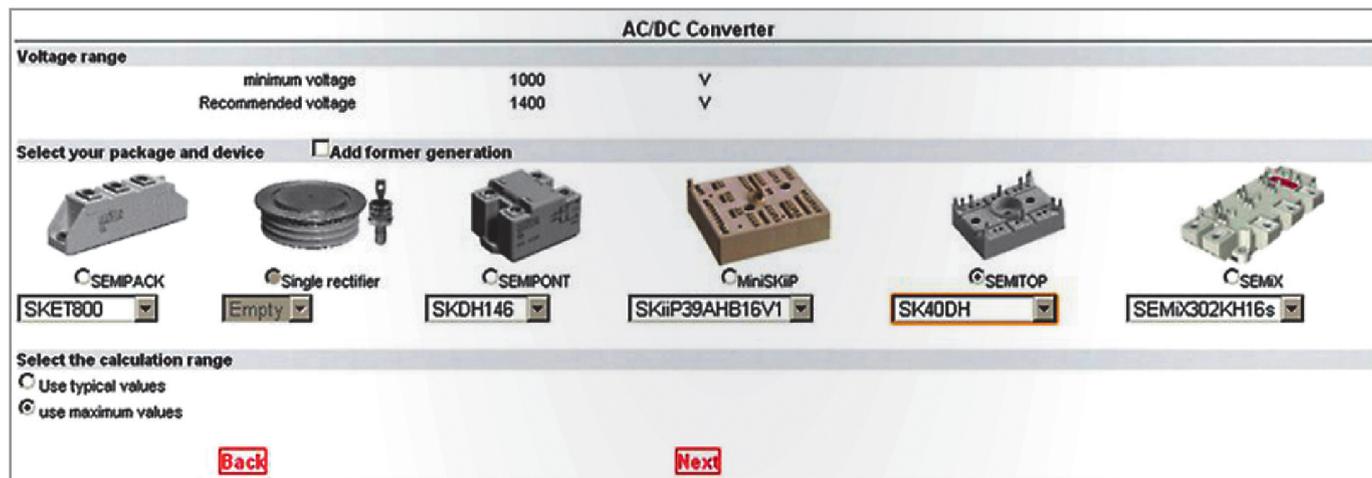


Рис. 4. Предлагаемые типы выпрямителей

суть у дистрибьютора печатный вариант). Поэтому без лишних объяснений выбираем первые попавшиеся приборы на 40 А, например миниатюрный SEMTOP SK400DH.

Следующий этап – расчёт мощности потерь и температуры кристалла. Экран для этого режима приведен на рис. 5.

Берём рекомендованный охладитель P14-120 со стандартным вентилятором и нажимаем Calculate.

- T_a – температура окружающей среды;
- number of switches per heatsink – количество элементов модуля, в нашем случае (трёхфазный выпрямитель) – 6;
- number of parallel devices on the same heatsink – количество параллельно соединённых на одном радиаторе модулей – 1;
- cooling method – способ охлаждения. Расчёт может производиться для естественного режима (natural air), режима принудительной вентиляции (forced air) и режима водяного охлаждения (water);
- SK model – тип теплостока производства Semikron, после выбора автоматически заполняется графа теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$;
- correction factor – с помощью этого коэффициента можно изменять значение теплового сопротивления «тепlostок – окружающая среда» $R_{th(s-a)}$;
- flow rate – скорость протекания воздуха или жидкости в режиме принудительного охлаждения;
- self defined heatsink – вводятся параметры теплоотвода пользователя;
- fixed heatsink temperature – расчёт перегрева кристалла относительно температуры окружающей среды

при фиксированной температуре радиатора.

Результаты расчётов можно увидеть на рис. 6. В таблице результатов кроме входных данных и конфигурации схемы приводятся следующие параметры:

- VTO25(125) – прямое падение напряжения;
- rT25(125) – динамическое прямое сопротивление;
- Lossesdevice – потери на одном диоде;
- Lossestot – суммарные потери.

С помощью соответствующих кнопок можно вернуться в любую точку программы, изменить исходные данные и повторить расчёт. В конце расчёта программа сообщит своё мнение о выбранном элементе и теплоотводе:

- This configuration works fine – силовой элемент и радиатор выбраны правильно, температура кристалла в режиме перегрузки не превышает 125°C, обеспечен запас по перегрузке ($100^\circ\text{C} < T_j < 125^\circ\text{C}$);
- This configuration seems to be too powerful – выбран неоправданно мощный элемент, запас по мощности слишком велик ($T_j < 100^\circ\text{C}$);
- Recommendation by Semikron: Do not use semiconductor in the range of $T_{j(max)} = 125^\circ\text{C}$ – температура кристалла в режиме перегрузки превышает 125°C, рекомендуется выбрать более мощный элемент или улучшить охлаждение;
- This configuration does not work! – температура кристалла во всех режимах превышает 125°C, необходимо применить более мощный элемент или улучшить теплоотвод.

Результат... не очень хороший, ибо рекомендация Semikron гласит: «Recommendation by Semikron: Do not use semiconductor in the range of $T_{j(max)} =$

$= 125^\circ\text{C}$ », и действительно, – максимальная температура кристалла при перегрузке 115°C.

Если температура внутри шкафа возрастёт хотя бы на 10°C (что для прошлого года было объективной реальностью), то получим перегрев кристалла. Проверяем, устанавливая в графе «Ambient and heat sink parameter: Ambient temperature T_a 50».

Результат не заставил себя ждать: «Evaluation: This configuration does not work!»

Берём радиатор большего размера: P16-200. Повторный расчёт при той же температуре с новым радиатором показывает успешный результат «This configuration works fine» (забегая вперёд, скажем: если радиатор использовать «по-хозяйски», т.е. разместить на нём ещё чоппер с инвертором, то результат может оказаться плачевным, но до этого ещё дойдём).

Опять вернемся к статье «Мифы...»[6]. А лучше вспомним Ильфа и Петрова:

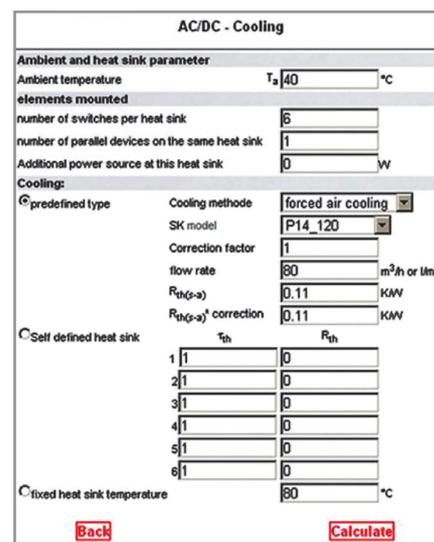


Рис. 5. Исходные данные для теплового расчёта трёхфазного выпрямительного моста

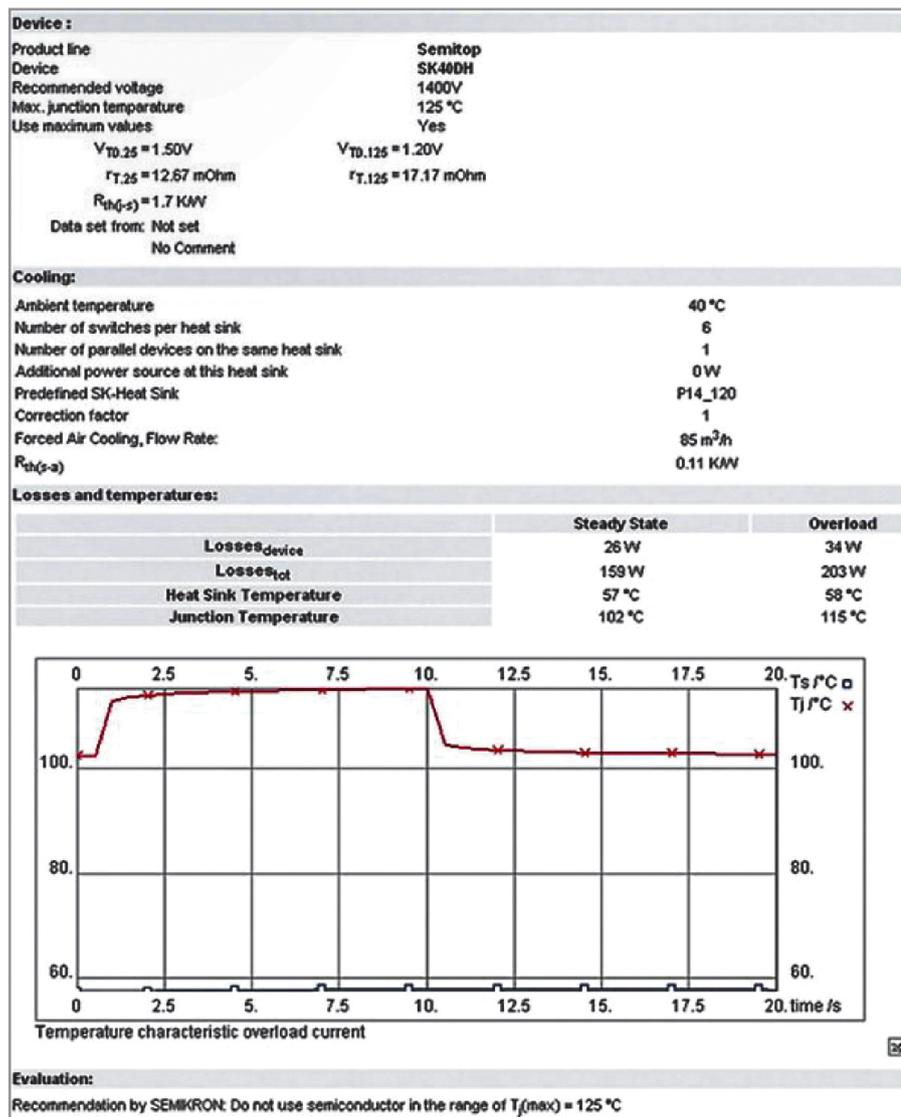


Рис. 6. Результаты расчёта трёхфазного выпрямительного моста

«На антресолях жила ничья бабушка, которая не доверяла электричеству». Вот так и наш брат-разработчик не очень доверяет заверениям, что печатный монтаж (если грамотно спроектирована плата) позволяет спокойно работать с токами до 50 А. Поэтому пробуем другой вариант (опять же без объяснения причины выбора) – выбираем модули Semipack1 SKKH42.

Проходим последовательность ещё раз, начиная с выбора диодно-тиристорного модуля. Для этого кликаем внизу кнопку Device Parameter, возвращаемся на страницу выбора, ставим птичку на Semipack и SKKH42. Нажимаем кнопку Calculate – результат: «This configuration seems to be too powerful».

Очень большой запас, ибо при перегрузке температура кристалла едва достигает 73°C. Не по-хозяйски (хотя мы же держим в памяти, что хотим разместить все силовые ключи на одном радиаторе)...

Из «чистого интереса» вернёмся к радиатору P14-120 (как поменять, надемся, грамотный читатель уже запомнил). Результат: температура при перегрузке 79°C и «This configuration seems to be too powerful».

Как гласит народная мудрость, «модуль – он и на северном полюсе – модуль, но очень холодный».

Предоставим читателю возможность самостоятельно оценить возможность применения в этой схеме SKKH27.

Дотошный читатель логичное объяснение этому «чуду» найдёт самостоятельно.

ТОРМОЗНОЙ ЧОППЕР

Выбираем конфигурацию силовой части DC/DC Buck. «Почему?» – тут же спросит дотошный читатель. А для теплового расчёта нет никакой разницы, куда вешать тормозной (Brake) резистор. Точно так же никакой разницы нет между полупроводниковыми кристаллами в конфигурациях GAR

и GAL Semikron. Они симметричны. Но вот какие параметры вводить для расчёта?

Исторически сложилось, что в электроприводе переменного тока свойства тормозного ключа зависят от механизма, в котором применяется привод. Поэтому такое разделение оставим на совести инженеров-приводчиков. А именно, тормозящий ключ, в зависимости от применяемых регуляторов и законов торможения, может быть выбран в двух вариантах: на 33% номинальной мощности привода или на 100% (для справки: 33% используется для общепромышленных приводов, где нужно торможение; 100% – для высокодинамичных и высокоинерционных).

Начнём с общепромышленных с невысокой динамикой.

Зачем вообще нужен чоппер? При частотном торможении асинхронный двигатель переходит в генераторный режим и кинетическая энергия, запасённая в роторе (и приводимом механизме), за вычетом механических потерь (трение) и электрических потерь (на активных сопротивлениях статора и ротора), преобразуется инвертором назад в электрическую. При этом напряжение U_d на конденсаторах звена растёт. Вот для рассеяния этой возвращаемой энергии и применяется тормозящий ключ с мощным резистором (вариант рекуперации не рассматриваем). При выделении её на резисторе напряжение U_d снижается с $U_{d \text{ max}}$ до $U_{d \text{ min}}$ (наперёд заданные настраиваемые величины).

Величина и мощность указанного резистора выбирается исходя из следующих условий:

- $R_b \leq 0,33 U_{d \text{ max}} / I_{d \text{ nom}}$ для общепромышленных приводов;
- $R_b \leq U_{d \text{ max}} / I_{d \text{ nom}}$ для высокодинамичных.

Значение $U_{d \text{ max}}$ выбирается исходя из максимально допустимого для конденсаторной батареи (обычно в звене используют последовательно соединённые электролитические конденсаторы с $U_{c \text{ nom}} = 400 \text{ В}$). Поэтому для обеспечения надёжности, с учётом возможного рабаланса емкостей батарей: $U_{d \text{ max}} = 0,9 \times 2 U_{c \text{ nom}} = 720 \text{ В}$.

Не вникая в особенности, отметим, что вариант торможения, когда brake-ключ полностью открыт, является далеко не оптимальным с точки зрения задач привода. Поэтому используется несколько более сложный алгоритм,

при котором ток через тормозной резистор стабилизирован, а частота ШИМ совпадает с частотой коммутации ключей инвертора. Вот его и рассмотрим:

$$I_b = 0,33I_d = \sim 14 \text{ A}, f_{sw} = 4,5 \text{ кГц.}$$

Задаём начальные параметры U_{in} (наше U_{dmax}) = 720V, U_{out} (наше U_{dmin}) = 620 и переходим к выбору компонентов. Вариантов – масса. Остановимся на самом простом: SEMITOR SK20GAR123D (Add former generation).

При $T_a = 50^\circ\text{C}$ получаем предупреждение: «Температура перехода 140°C », что явно не годится.

Дилемма – выбрать либо более мощный ключ, либо более мощный радиатор. Начнём с ключа. Используем модуль SEMITOR SK30GAR123D, что даст нам следующие величины потерь (рис. 7): «температура кристалла 102°C , This configuration works fine».

Запоминаем выделяемую мощность: «Ptot 52 W 52 W».

Вспоминаем, что использовать три разных радиатора для выпрямителя, инвертора и чоппера «не по-хозяйски», и возвращаемся к... расчёту выпрямителя. Поскольку чоппер добавит нам 52 Вт тепловых потерь, учтём их в строке «Additional power source at this heat sink» выбора охладителя. В результате получаем то, что предположили заранее: «Evaluation: This configuration does not work!». То есть разместить выпрямитель SK40DH и чоппер SK30GAR123 на радиаторе P14-120 невозможно в силу перегрева (чем точнее хотите получить результат, тем больше вариантов и итераций придётся посчитать). То же самое проделаем для выпрямителя на модулях SEMIPAK1 SKKH42. Температура кристаллов модулей выпрямителя подросла до 85°C , но до граничной 125°C ещё очень далеко.

ИНВЕРТОР IGBT

Чтобы рассчитать тепловые потери нашего инвертора, возвращаемся к странице выбора схемы, нажав на кнопку Change Circuit. Выбираем схему Inverter 3 Phases и вводим исходные данные (которые затем отобразятся в левой колонке рис. 8). Переходим к выбору IGBT-модулей для расчёта... глаза разбегаются. Здесь уже нужен либо кое-какой опыт разработчика, либо перебор нескольких десятков вариантов, либо... введение допол-

| Calculated losses and temperatures with rated current and at overload: | | | |
|--|--|---------------|----------|
| | | Rated Current | Overload |
| $P_{cond tr}$ | | 27 W | 27 W |
| $P_{sw tr}$ | | 18 W | 18 W |
| P_{tr} | | 46 W | 46 W |
| $P_{cond d}$ | | 3.03 W | 3.03 W |
| $P_{sw d}$ | | 3.18 W | 3.18 W |
| P_d | | 6.22 W | 6.22 W |
| P_{tot} | | 52 W | 52 W |
| T_s | | 56 °C | 56 °C |
| T_c | | 56 °C | 56 °C |
| T_{tr} | | 102 °C | 102 °C |
| T_d | | 83 °C | 83 °C |

Рис. 7. Результаты расчёта тормозного чоппера

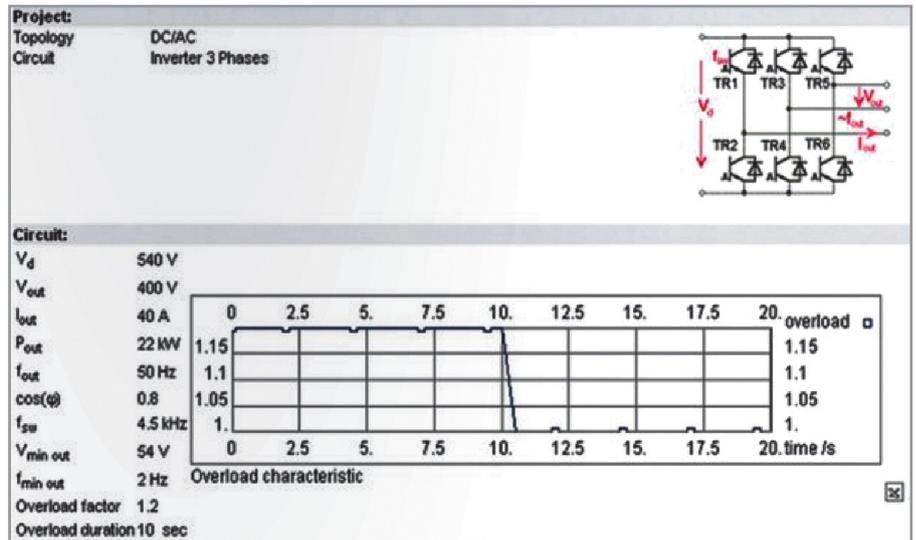


Рис. 8. Результаты расчёта трёхфазного инвертора

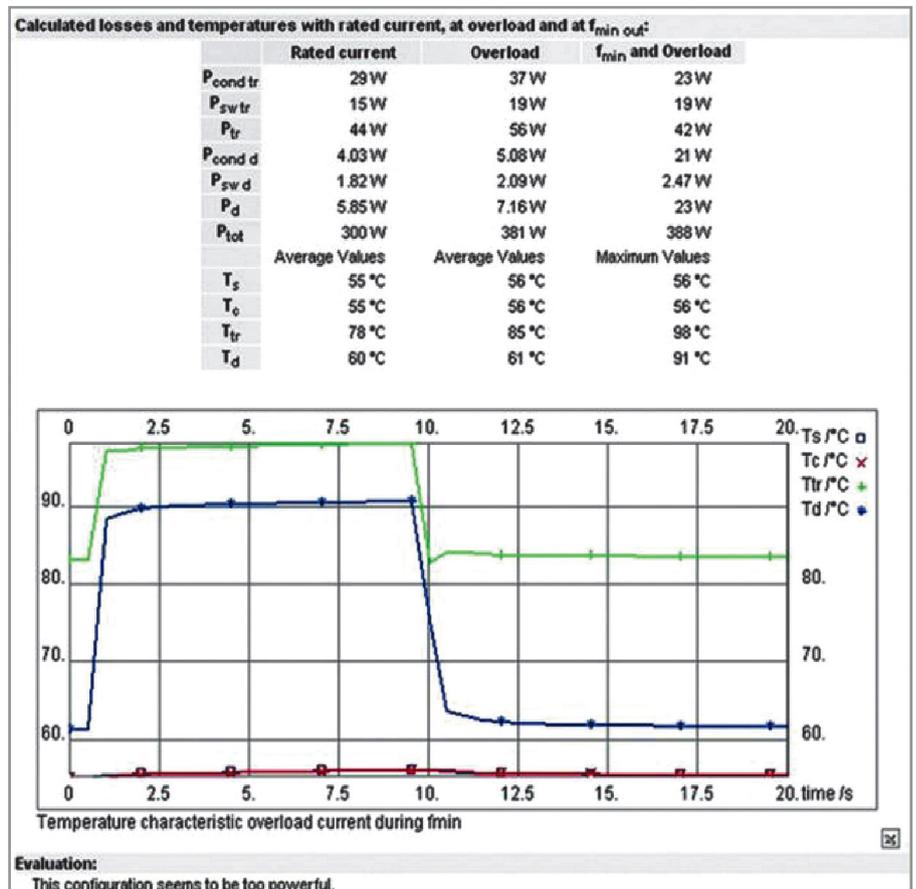


Рис. 9. Результаты расчёта трёхфазного инвертора при использовании радиатора P16-200

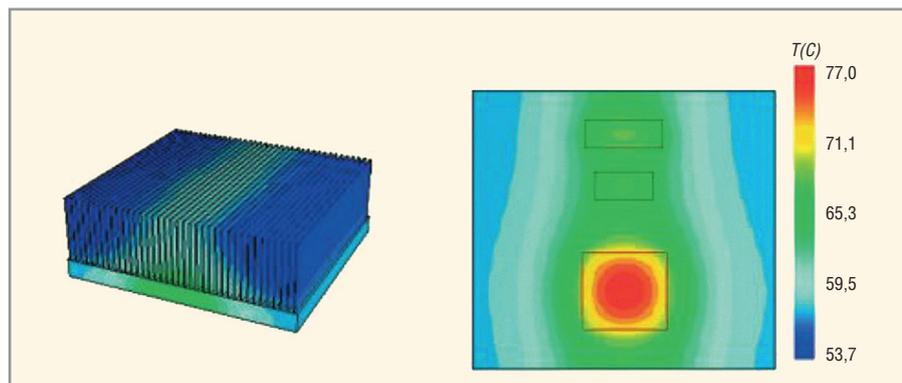


Рис. 10. Распределение тепла в радиаторе

нительных факторов, ограничивающих число вариантов. Поскольку ранее мы решили, что постараемся использовать печатные проводники, то остановимся на модуле SK75GD12T4T (просто исходя из допустимых амплитудных значений тока через транзисторный ключ).

Радиатор P14-120, всё ОК. Размещаем на этом же радиаторе чоппер, что добавляет к рассеиваемой мощности еще 52 Вт. Пересчитываем – тоже всё в порядке, но температура подросла до 127°C.

При $T_a = 50^\circ\text{C}$ температура кристалла – 139°C, радиатора – 93°C (мощность потерь в самом «плохом» случае: минимальная выходная частота инвертора + 20% перегрузка). 93°C – перебор, «наши люди в булочную на такси не ездят». Поэтому используем P16-200. Результаты расчёта приведены на рис. 9.

Как и следовало ожидать, радиатор холодный – 56°C, температура кристалла – 91°C при перегрузке.

Предпоследний этап для проверки. Рассмотрим «самое слабое звено» – выпрямитель с добавлением к нему мощности, выделяемой чоппером – 52 Вт и инвертором – 388 Вт.

Пересчитываем температуру выпрямителя и получаем зловещее «This configuration does not work!».

Удлинение радиатора не оправдывает надежд – та же фраза красным (что мы ранее и предполагали).

Делаем ход конём, меняем выпрямительный мост на более мощный – SK70DH. И через несколько секунд убеждаемся, что если разместить на охладителе типа P16-200 и диодный мост, и чоппер, и инвертор, кристаллы этих модулей будут чувствовать себя более чем комфортно. Увеличение частоты ШИМ до 12 кГц для инвертора увеличит тепловые потери в инверторе до 669 Вт. Однако, пересчитав тепловой режим, убеждаемся: кристаллы

IGBT-модулей уже будут работать в режиме, близком к предельному, но выпрямитель останется в норме ($T_{\text{охл}} = 85^\circ\text{C}$).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА

В предыдущем разделе мы установили, что на одном радиаторе P16-200 можно разместить все три тепловыделяющих элемента нашего преобразователя частоты. Невьясненным остаётся вопрос: «Как их разместить?». Ведь мы получили среднюю температуру радиатора, которая эквивалентна «средней температуре по больнице». Для того чтобы оценить взаимовлияние модулей и распределение температурного поля по радиатору, воспользуемся программой R-Theta [8]. Дадим возможность читателю самостоятельно разобраться с настройками этой программы. Поэтому лишь заметим, что визуализация процесса распределения тепла в радиаторе позволяет оценить эффективность охлаждающей системы, что наглядно демонстрирует рис. 10.

Грамотное разнесение силовых модулей на поверхности радиатора улучшает картину распределения тепла, что эквивалентно уменьшению теплового сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Давно прошли времена, когда выбор силового ключа осуществлялся на основании его номинального тока, а для повышения надёжности рекомендовалось использовать двойной запас по мощности. Цель современного разработчика – обеспечение высокой надёжности при использовании предельных режимов работы компонентов плюс минимальные сроки проектирования. Решение этой задачи немислимо без специализированного программного обеспечения, призванного максимально упростить и авто-

матизировать процесс проектирования, устранить возможные ошибки, оптимизировать выбор элементной базы.

Программа SEMISEL пригодна для анализа большинства существующих практических схем [9], позволяет оптимально выбрать режимы работы и условия охлаждения и требует от пользователя ввода только числовых исходных данных. Удобный интерфейс, пояснения, данные для всех режимов работы, позволяют использовать программу разработчикам средней квалификации. Конечно, компьютер не способен заменить голову разработчика. Знания и опыт в любом случае остаются самыми главными составляющими процесса проектирования. Специализированное программное обеспечение – это, прежде всего, очень хороший инструмент для грамотного инженера, помогающий избежать массы ошибок, быстро проанализировать различные варианты схемы и выбрать из них лучший. В результате сокращается время и повышается качество работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wintrich A. Free help with your converter design. Semikron Elektronik, 2006.
2. Srajber D., Lukasch W. The calculation of the power dissipation for the IGBT and the inverse diode in circuits with sinusoidal output voltage. Semikron Elektronik, 1996.
3. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules. PCIM Europe J. 2003.
4. Колпаков А.И. Обеспечение надёжности силовых IGBT-модулей. Электронные компоненты. 2003. № 4.
5. Колпаков А.И. Методы оценки надёжности IGBT-модулей Semikron в предельных режимах. Силовая электроника. 2004. № 1.
6. Колпаков А.И. Мифы и легенды российских электронщиков. Компоненты и технологии. 2007. № 9.
7. Колпаков А.И. Принципы работы и особенности программы теплового расчёта. Электронные компоненты. 2004. № 6.
8. Колпаков А.И. Тепловое моделирование – просто и доступно. Электронные компоненты. 2008. № 8.
9. Колпаков А.И., Мисак Т.В., Полищук С.И. Программа теплового расчёта SEMISEL 3.1 – новые возможности и перспективы. Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоєфективність. Тематичний вип., 2008. Ч. 2. С. 114–119.

