

MELCOSIM? IPOSIM? SEMISEL?

О выборе и замене модулей IGBT

В результате быстрого развития технологий мощных полупроводниковых приборов, в первую очередь MOSFET и IGBT, а также устройств управления — драйверов и микроконтроллеров, понятие «схемотехника» как искусство создания принципиальной схемы утратило свое первоначальное значение. Разработчику силового каскада требуется всего лишь грамотно выбрать ключевой элемент и драйвер, пользуясь соответствующими цифрами и графиками. Однако это «всего лишь» иногда оказывается серьезной проблемой. Предельные данные тока и напряжения транзистора или модуля, обычно вынесенные в заголовок технических характеристик, не дают разработчику никаких данных для расчета, а позволяют только в первом приближении сравнить один элемент с другим. Сложность выбора компонента заключается в том, что желательно максимально использовать его мощностные характеристики, чтобы не платить лишних денег за неоправданный запас по мощности. Упростить решение обеих задач — выбора компонента и поиска замены — позволяют автоматизированные программы теплового расчета.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Евгений Карташев

Вопросу об оптимальном выборе типа и класса силового модуля посвящено достаточно много публикаций. Однако это по-прежнему остается серьезной проблемой для разработчиков — так же, как и замена модуля на аналогичное изделие другой фирмы или даже на модуль того же производителя, но выполненный по другой технологии.

На рис. 1 показаны некоторые типы корпусов модулей IGBT, применяемых в различных областях преобразовательной техники. Это уникальные интеллектуальные силовые модули SKiiP SEMIKRON, новейшие низкопрофильные модули ECONO+ и SEMiX, а также наиболее распространенные в настоящее время стандартные модули IGBT (SEMITRANS — в соответствии с системой обозначений SEMIKRON).

Все показанные конструктивы имеют свои функциональные особенности, свои тепловые характеристики. Выбор силового ключа при разработке нового изделия обычно начинается именно с определения типа и конфигурации модуля, необходимых для наиболее полного решения задачи.

Большие значения допустимых предельных токов IGBT (они могут в 5–10 раз превышать номинальные значения) способны создать у разработчика иллюзию, что транзисторы могут работать в режиме перегрузки. На самом деле перегрузка совершенно недопустима. И для оценки правильности выбора элемента существует только один критерий — температура кристалла в наиболее напряженном режиме работы. Владеть методикой расчета температуры кристалла, понимать тепловые процессы, происходящие в силовом модуле, должен любой уважающий себя разработчик.

Напомним для начала, как выглядит стандартный процесс теплового расчета. Температурный анализ работы силового каскада состоит из трех этапов: расчет мощности потерь, расчет мгновенного значения температуры кристалла полупроводника и выбор режима охлаждения.

Как рассчитать мощность потерь

Методика расчета мощности рассеяния импульсных силовых компонентов приводится во многих инструкциях по применению, в общем случае она сводится к нахождению суммы статических и динамических потерь. Как будет показано далее, температура кристалла должна определяться с помощью графика теплового импеданса. Исходными данными для расчета являются значение мощности потерь за импульс проводимости и температура корпуса элемента. Ниже приведены основные формулы, пред-

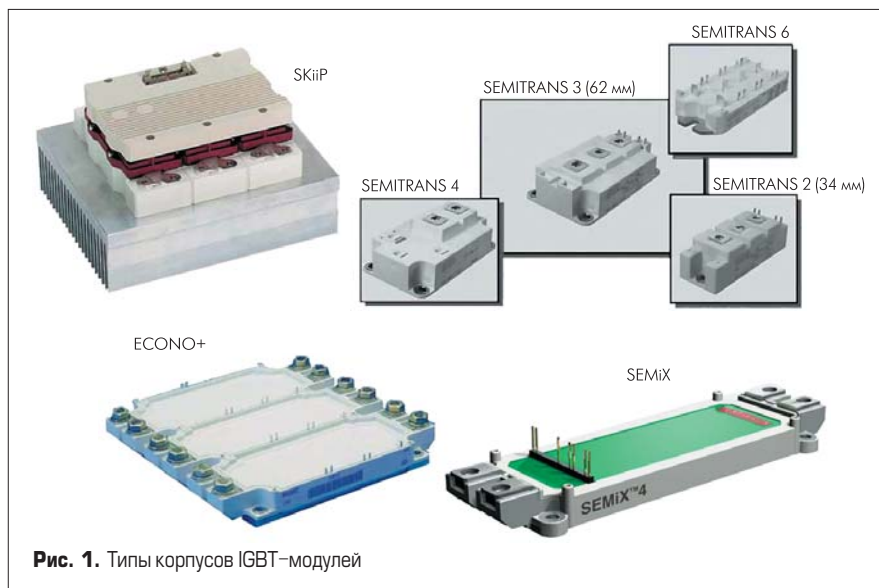


Рис. 1. Типы корпусов IGBT-модулей

назначенные для базового теплового расчета в случае применения IGBT.

Оговоримся сразу, что описанные здесь способы расчета предназначены для пытливых инженеров, которые всегда хотят «докопаться до сути» и которым знание методики расчета может помочь в работе. Читателям нетерпеливым можем посоветовать пропустить данную часть и сразу обратиться к описанию программ, призванных автоматизировать и упростить этот нелегкий труд.

Мощность статических потерь транзистора IGBT

$$P_D = I_{Cav} \times U_{CE}(@I_C)$$

I_{Cav} — среднее за время импульса проводимости значение тока коллектора; $U_{CE}(@I_C)$ — напряжение насыщения при данном токе коллектора, оно определяется по графику $U_{CE} = f(I_C)$, приводимому в технических характеристиках силового транзистора (модуля). Поскольку ток и, соответственно, напряжение насыщения в течение импульса проводимости могут сильно изменяться, то гораздо правильнее (но сложнее) вычислить определенный интеграл от произведения тока и напряжения за период проводимости.

Мощность динамических потерь транзистора IGBT

Значение суммарной энергии потерь E_{ts} должно учитывать потери от обратного восстановления оппозитного диода и потери, вносимые за счет «хвоста» — остаточного тока коллектора выключенного транзистора. При работе не в режиме «жесткого переключения» необходимо пользоваться значениями энергии потерь включения/выключения E_{on}/E_{off} с учетом соответствующих корректирующих коэффициентов.

$$P_{SW} = E_{ts}(@I_C @ R_g) \times F_{sw}$$

$E_{ts}(@I_C @ R_g)$ — суммарная энергия потерь с учетом тока коллектора и импеданса цепи управления затвором, значение E_{ts} определяется по графикам $E_{ts} = f(R_g)$ и $E_{ts} = f(I_C)$; F_{sw} — рабочая частота.

Мощность, рассеиваемая на антипараллельном диоде

На антипараллельном диоде транзистора IGBT мощность рассеивается при коммутации тока в индуктивной нагрузке. Прирост температуры модуля за счет рассеяния мощности на антипараллельном диоде должен рассчитываться отдельно, так как диод и транзистор проводят ток в разные моменты времени и тепловое сопротивление R_{thJC} для диода отличается от значения данного параметра для транзистора.

$$P_{DF} = I_{FM} \times V_{FM}(@I_{FM})$$

I_{FM} — ток диода за время импульса проводимости; $V_{FM}(@I_{FM})$ — напряжение на диоде при токе I_{FM} .

Мощность, рассеиваемая в режиме синусоидальной модуляции

В каскадах, где выходной ток меняется по синусоидальному закону, вычисление мощности потерь оказывается наиболее сложным.

Инвертор с изменяющимся током обычно называют VVVF-инвертором (variable voltage variable frequency). В таких преобразователях скважность импульсов управления изменяется по закону, заданному схемой управления. Потери в VVVF-инверторе зависят от температуры, частоты ШИМ, скважности, величины тока пульсаций и других факторов. Для оценки мощности потерь в данном случае можно воспользоваться следующими формулами:

Потери в IGBT:

$$P_D = I_{CP} \times V_{CE} \times (1/8 + D_M \times \cos\theta/3\pi) — \text{потери проводимости;}$$

$$P_{SW} = E_{ts}(@I_C @ R_g) \times F_{sw}/\pi — \text{потери переключения;}$$

$$P_{DM} = P_D + P_{SW} — \text{суммарные потери.}$$

Потери в диоде:

$$P_{DF} = I_{FM} \times V_{FM}(@I_{FM}) \times (1/8 - D_M \times \cos\theta/3\pi) — \text{потери проводимости;}$$

$$P_{rr} = 0,125 \times I_{rr}(@dI_F/dt) \times t_{rr} \times V_s \times F — \text{потери за счет восстановления.}$$

Суммарные потери на плече:

$$P_A = P_{DM} + P_{DF} + P_{rr}$$

В формулах использованы следующие обозначения:

θ — угол между напряжением и током;
 $\cos\theta$ — коэффициент мощности (Power Factor);
 I_{CP} — пиковое значение синусоидального выходного тока;
 D_M — глубина модуляции;
 I_{rr} — пиковый ток обратного восстановления;
 t_{rr} — время обратного восстановления диода;
 V_s — напряжение питания силового каскада.

Таким образом, пользуясь приведенными формулами, можно найти мощность потерь как для силового ключа, так и для модуля с определенной конфигурацией. Дальнейшим шагом расчета является нахождение температуры кристалла.

Как рассчитать температуру кристалла

В справочных данных на любой силовой транзистор или модуль обязательно приводится график теплового импеданса Z_{thJC} , подобный показанному на рис. 2. С помощью этого графика, зная суммарную мощность потерь $P_{DM(DF)}$ за время импульса проводимости t_p , коэффициент заполнения D и температуру корпуса элемента T_C , можно определить температуру кристалла T_J :

$$T_J = P_{DM(DF)} \times Z_{thJC} + T_C$$

Нижняя эюра на графиках (рис. 2) дана для случая одиночных импульсов (single pulse), когда допустимый ток максимален. Эта эюра может быть использована, например, для расчета режима защиты от короткого замыкания. С ее помощью можно определить допустимый пиковый ток короткого замыкания и минимальное время отключения транзистора при циклическом характере работы схемы защиты.

В формуле для T_J есть одна неизвестная величина — температура корпуса транзистора (модуля) T_C . Она определяется по формуле:

$$T_C = P_{AV} \times R_{thCS} + T_s = P_{AV} \times (R_{thCS} + R_{thSA}) + T_a$$

где P_{AV} — средняя мощность, рассеиваемая модулем; R_{thCS} — тепловое сопротивление «корпус — теплосток»; R_{thSA} — тепловое сопротивление «теплосток — окружающая среда»; T_a — температура окружающей среды; T_s — температура теплостока.

В данной формуле нам неизвестно значение температуры T_s (или R_{thSA}). Как правило, серьезные производители радиаторов приводят в технических характеристиках не только величину теплового сопротивления теплоотвода, но и его зависимость от скорости потока воздуха в режиме принудительного воздушного охлаждения и от количества установленных на нем модулей.

Обратите внимание на то, что при расчете температуры радиатора мы пользуемся средним значением рассеиваемой мощности P_{AV} , поскольку тепловая инерция теплоотвода

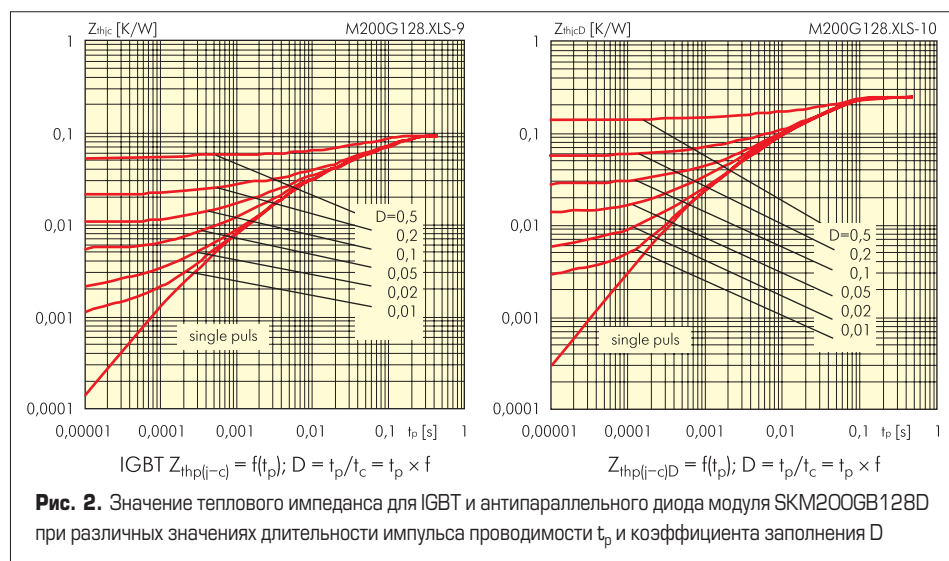


Рис. 2. Значение теплового импеданса для IGBT и антипараллельного диода модуля SKM200GB128D при различных значениях длительности импульса проводимости t_p и коэффициента заполнения D

очень велика и в течение импульса проводимости его температура практически не меняется (в отличие от температуры кристалла).

Подводя итог сказанному, можно привести стандартную последовательность операций, необходимых для «ручного» теплового расчета. Предполагается, что модуль работает в режиме рассеяния некоторой постоянной мощности и периодически подвергается перегрузкам.

1. Рассчитываются потери мощности силового ключа в течение импульса проводимости и среднее значение мощности, рассеиваемой модулем в установившемся состоянии.

2. Выбирается тип радиатора и скорость охлаждающего воздуха (в режиме принудительного охлаждения), определяется тепловое сопротивление теплоотвода R_{thSA} , рассчитывается перепад температуры «поверхность радиатора — окружающая среда», определяется температура радиатора T_S .

3. С помощью теплового сопротивления R_{thCS} , рассчитывается перепад температуры на переходе «корпус модуля — поверхность радиатора» и температура корпуса T_C .

4. С помощью графиков теплового импеданса Z_{thJC} находится максимальная температура кристалла T_J в установившемся состоянии.

5. Рассчитывается дополнительная мощность, рассеиваемая в режиме перегрузки, определяется температура кристалла для режима перегрузки.

6. Находится интервал времени между импульсами перегрузки. Если это время достаточно для охлаждения кристалла до рабочей температуры установившегося значения и предельная температура не превышает требуемой величины (по рекомендации большинства производителей $T_J < 125^\circ\text{C}$ для номинального режима, $T_J < 150^\circ\text{C}$ для режима перегрузки), то расчет заканчивается.

7. Если тепловые режимы не обеспечивают безопасной работы, корректируется режим охлаждения, элемент заменяется на более мощный или используется параллельное соединение элементов.

Тепловой расчет — очень сложный процесс, требующий внимательности, аккуратности и некоторого опыта. Большинство используемых при расчете параметров модулей зависят от температуры, соответственно расчет требует нескольких итераций. Однако перегрев и выход из строя аппаратуры — не слишком ли это высокая цена за экономию времени на тепловой анализ? В любом случае отчаиваться не стоит, поскольку, как будет показано дальше, данный процесс в настоящее время достаточно автоматизирован и упрощен благодаря усилиям ведущих производителей силовых модулей.

Как выбрать?

При выборе или поиске замены прежде всего необходимо определиться с частотным диапазоном, в котором будет работать силовой ключ. Это необходимо потому, что практически все компании-производители выпускают несколько классов модулей, параметры которых оптимизированы для работы в различных применениях. Для одних преобразователей определяющими являются потери про-

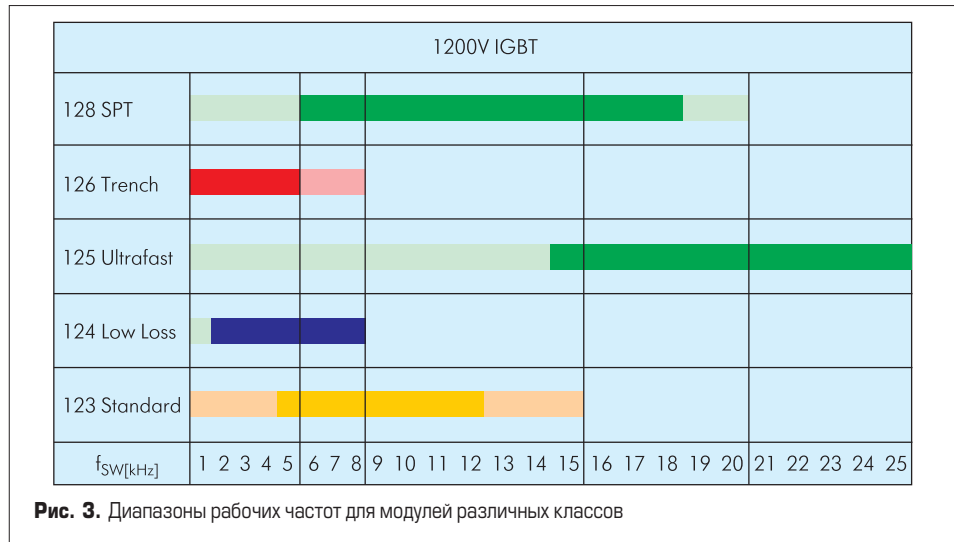


Рис. 3. Диапазоны рабочих частот для модулей различных классов

Таблица 1. Обозначение классов модулей у различных производителей

Технология	SEMIKRON	EUPEC	Mitsubishi	Характеристика типа
Standard	123	DN2	H, U (3 gen)	Средние значения параметров
Low Loss	124	DLC		Низкое напряжение насыщения V_{CEsat}
Fast/Ultrafast	125	KS4 (Short tail)	NFH,	Низкое значение энергии потерь переключения E_{on}, E_{off}
Trench	126	KE3 (IGBT ⁺)	NF (5 gen), F (4 gen)	Сверхнизкое напряжение насыщения V_{CEsat}
SPT/Fast Trench/SCTBT	128	KT3 (Fast IGBT ⁺)	A (5 gen CSTBT)	Оптимальное сочетание потерь проводимости и переключения

димости, для других — потери переключения, третьим необходим оптимальный баланс между двумя типами потерь.

На практике можно выделить три основных типа устройств, отличающихся по значению рабочей частоты силовых ключей:

- 1) низкочастотные преобразователи (ветрогенераторы, конверторы для энергосистем, использующих энергию солнца, мощные высоковольтные приводы) — для этих применений главными являются потери проводимости;
- 2) импульсные преобразователи частоты (приводы, некоторые типы источников бесперебойного питания) — для этих применений требуются низкие потери проводимости и переключения одновременно;
- 3) высокочастотные устройства (системы индукционного нагрева, сварочное оборудование) — для этих применений определяющими являются потери переключения.

Фирма SEMIKON, например, предлагает пять типов модулей IGBT, отличающихся частотным диапазоном. Рис. 3 демонстрирует частотные области, для которых предназначены данные типы. К сожалению, сравнение затрудняется тем, что у каждого производителя своя система обозначений, свои технологии производства, даже название одной и той же технологии может звучать совершенно по-разному.

Однако в любом случае свои частотные «предпочтения» есть у всех фирм, и выбор модуля надо начинать именно с определения частотного диапазона. В таблице 1 приведены обозначения и даны характеристики основных типов модулей IGBT, выпускаемых крупнейшими компаниями, работающими в области силовой электроники, — SEMIKRON, EUPEC, Mitsubishi. А с особенностями различных технологий производства можно ознакомиться в одной из публикаций журнала [6].

Можно гарантировать, что при поиске замены вам не удастся найти элемента, полностью

совпадающего с заменяемым по основным характеристикам: напряжению насыщения, динамическим параметрам, энергии потерь, значению тепловых сопротивлений. Более того, у различных производителей часто отличаются методики измерения параметров и условия, при которых они нормируются. Даже при прочих равных условиях оказывается, что какие-то параметры хуже, а какие-то — лучше.

К счастью для разработчиков, теперь существуют средства, позволяющие решить проблему выбора и замены практически безошибочно, — это программы автоматического теплового расчета, о которых мы расскажем чуть ниже. А выбор элемента на основании теплового расчета является единственно правильным, поскольку, как уже было сказано, наиболее подходящим является тот транзистор (модуль), у которого при одинаковых условиях эксплуатации температура кристалла ниже. Следует отметить, что точность указанных средств расчета, как правило, очень высока, так как тепловые модели силовых модулей, сами модули и программы разрабатываются одной и той же фирмой-производителем.

Программы автоматического теплового расчета

Программы для теплового анализа режимов работы силовых ключей предлагаются в настоящее время большинством ведущих фирм — производителей силовых компонентов. Они предназначены, в первую очередь, для определения рассеиваемой мощности и предельной температуры силовых кристаллов при заданных режимах работы. Все предлагаемые в настоящее время программы имеют общий (и неизбежный) недостаток — они рассчитаны на анализ тепловых режимов только модулей, производимых данной фирмой. Это вполне понятно, так как такие программы решают важные маркетинговые зада-

чи. Однако в любом случае у разработчика всегда есть универсальный инструмент — методика расчета, упомянутая в начале статьи.

Если подойти к программе теплового расчета творчески, понять ее сильные и слабые стороны, то она может оказать неоценимую пользу разработчику, избавить его от длительной и тяжелой работы.

Наиболее известные и эффективно работающие программы можно найти на сайтах крупнейших компаний, выпускающих силовые электронные модули, — это в первую очередь SEMISEL (SEMIKRON — www.semikron.com), MelcoSim (Mitsubishi — www.mitsubishichips.com), IPOSIM (EUPEC — www.eupec.com). Кроме того, на указанных сайтах также находится детальное описание данных программ и способы работы с ними. А принципы работы программы SEMISEL и ее особенности достаточно подробно были изложены ранее [4, 5].

На рис. 4 и 5 показаны рабочие окна программ IPOSIM и Melcosim, в которых производится ввод параметров, необходимых для расчета. Как видно из рисунков, эти две программы имеют интересную возможность построения различных кривых, например IPOSIM показывает распределение температуры по тепловым переходам модуля, а Melcosim позволяет получить графики зависимости:

- температуры кристалла от рабочего тока;
- температуры кристалла от частоты ШИМ;
- рассеиваемой мощности от рабочего тока;
- рассеиваемой мощности от частоты ШИМ;
- максимально допустимого тока от частоты ШИМ.

Однако следует признать, что данные инструменты имеют весьма существенный недостаток — в качестве исходной температуры для расчета в Melcosim используется температура радиатора, а в IPOSIM — температура окружающей среды, но при заданном тепловом сопротивлении радиатора R_{thsa} . Таким образом, обе программы не позволяют выбрать способ охлаждения и оптимизировать режимы работы охлаждающей системы. А ведь именно эта проблема часто является одной из наиболее сложных, встающих перед разработчиком в процессе анализа силового каскада.

Указанные проблемы полностью устранены в программе SEMISEL (SEMIKRON), которая производит расчет на основании температуры окружающей среды T_a и позволяет выбрать и оптимизировать режим охлаждения. Кстати, в данной программе предусмотрена возможность расчета при фиксированной температуре радиатора. Сравнительные характеристики трех рассматриваемых программ приведены в таблице 2. Кроме того, SEMISEL позволяет учесть такие важнейшие тепловые параметры конструкции, как:

- способ охлаждения (естественный, принудительный воздушный, принудительный жидкостный) и режим охлаждения (скорость потока охлаждающей среды);
- тип и характеристики теплоотвода;
- количество установленных на радиаторе модулей;
- параллельное соединение модулей на радиаторе;
- наличие дополнительного источника тепла на радиаторе.

Таблица 2. Характеристики программ теплового расчета

Производитель	SEMIKRON	EUPEC	Mitsubishi
Программа	SEMISEL	IPOSIM	MelcoSim
Тип анализируемой схемы	3-фазный инвертор, полумост, полный мост, чоперы, выпрямители (управляемые и неуправляемые)	3-фазный инвертор	3-фазный инвертор
Ввод исходных данных: рабочей частоты, напряжения шины, выходного напряжения, выходного тока	+	+	+
Расчет пиковой температуры кристаллов и элементов модуля	+	+	—
Построение графиков	—	+	+
Учет длительности и коэффициента перегрузки	+	—	—
Учет перегрузки при пусковых режимах и частотном регулировании	+	+	—
Динамический анализ режима перегрузки	+	—	—
Расчет рабочего цикла, заданного пользователем	+	—	—
Ввод поправочных коэффициентов для расчета потерь	+	—	—
Учет зависимости энергии потерь от резистора затвора	—	+	+
Выбор способа охлаждения и ввода параметров режима охлаждения	+	—	—
Возможность описания параметров теплоотвода	+	—	—
Учет количества модулей, установленных на радиаторе, и количества параллельно соединенных модулей	+	—	—
Учет дополнительного источника тепла на теплоотводе	+	—	—

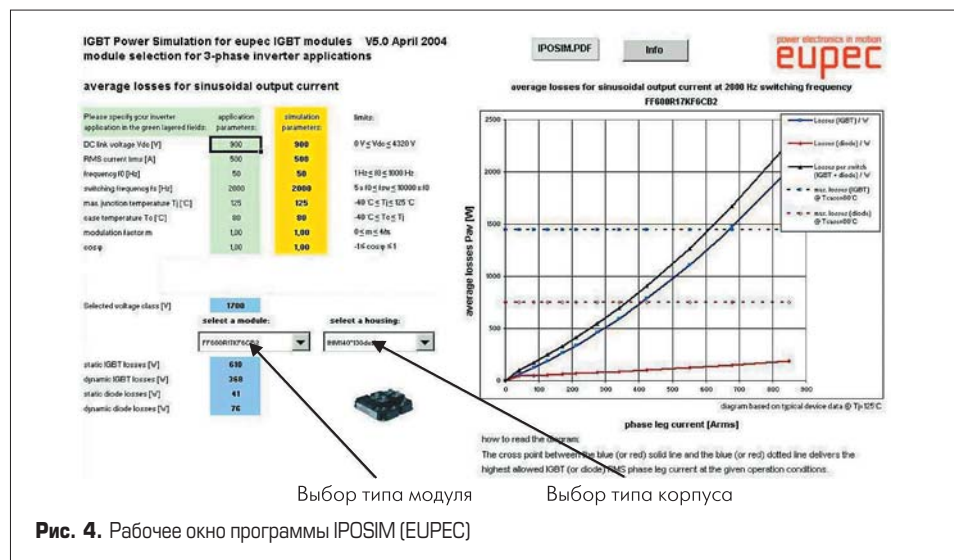


Рис. 4. Рабочее окно программы IPOSIM (EUPEC)

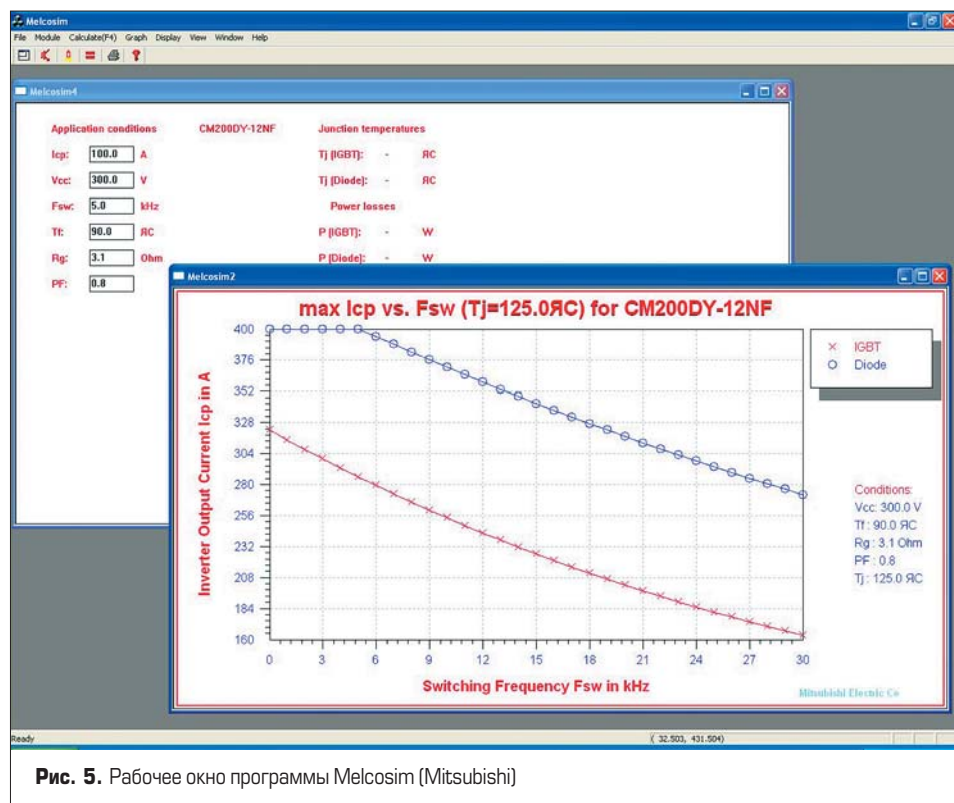
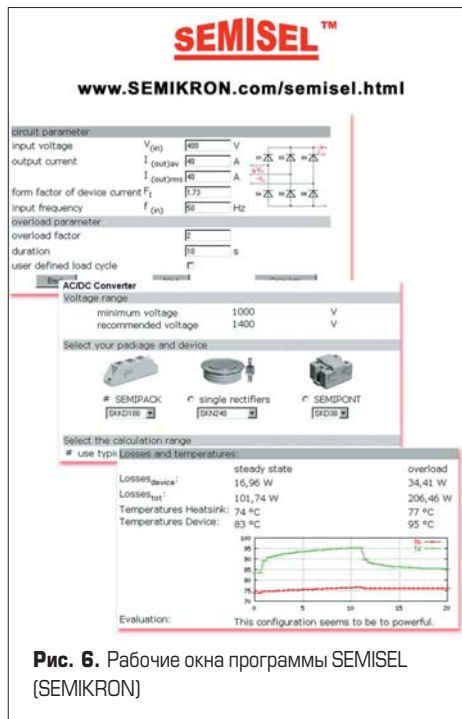


Рис. 5. Рабочее окно программы Melcosim (Mitsubishi)



Напомним, как происходит работа с программой SEMISEL, основные рабочие окна которой (ввод исходных данных, выбор типа элемента, результаты расчета), показаны на рис. 6, а последовательность действий приведена на рис. 7.

В отличие от программ, разработанных EUPEC и Mitsubishi, ориентированных на расчет потерь отдельного силового ключа, SEMISEL позволяет осуществлять тепловой расчет для следующих конфигураций схем:

1. AC/DC

- B2U — однофазный выпрямительный мост;
- B2H — однофазный тиристорный мост с управлением в верхнем плече;
- B2C — однофазный полностью управляемый тиристорный мост;
- B6U — трехфазный выпрямительный мост;
- B6H — трехфазный тиристорный мост с управлением в верхнем плече;
- B6C — трехфазный полностью управляемый тиристорный мост.

2. AC/AC

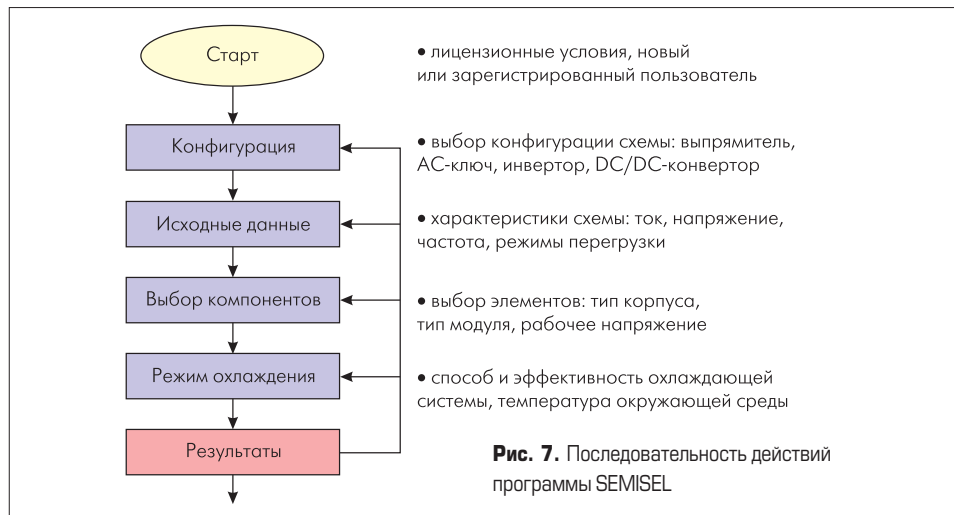
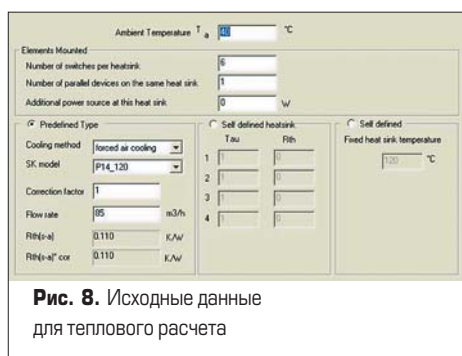
- W1C — тиристорный ключ;
- W1C — трехфазный тиристорный ключ.

3. DC/AC

- Inverter_1_phases — полный мостовой каскад;
- Inverter_3_phases — 3-фазный мостовой каскад.

4. DC/DC

- Buck — чоппер верхнего плеча;
- Boost — чоппер нижнего плеча.



Следует отметить, что все указанные схемы реализованы в модулях, производимых SEMIKRON. После выбора конфигурации вводятся исходные данные — режимы эксплуатации модуля, необходимые для расчета мощности потерь.

Далее выбирается конструктив модуля и конкретный его тип. Следующий этап — расчет мощности потерь и температуры кристалла. На этой стадии, наиболее интересной, окно которой показано на рис. 8, вводятся следующие параметры:

- T_a — температура окружающей среды.
- Number of switches per heatsink — количество силовых ключей на кристалле, number of parallel devices on the same heatsink — количество параллельно соединенных на одном радиаторе модулей.
- Cooling method — способ охлаждения. Расчет может производиться для естественного (natural air) режима, режима принудительной вентиляции (forced air) и режима водяного охлаждения (water).
- SK model — тип теплового сопротивления SEMIKRON, после выбора автоматически заполняется графа теплового сопротивления R_{thsa} .
- Correction factor — с помощью этого коэффициента можно изменять значение теплового сопротивления «тепlostок — окружающая среда» R_{thsa} .
- Flow rate — скорость протекания воздуха или жидкости в режиме принудительного охлаждения.
- Self defined heatsink — вводятся параметры теплоотвода пользователя.
- Fixed heatsink temperature — расчет перегрева кристалла относительно температуры окружающей среды при отсутствии радиатора.

В результате расчета программа формирует таблицу, в которой указаны исходные данные, значение мощности, рассеиваемой всеми активными элементами модуля, и температура на каждом кристалле и конструктивном элементе модуля. Очень важно, что кроме статического значения температуры SEMISEL производит динамический тепловой расчет в режиме перегрузки (результаты анализа этого режима видны на рис. 6), учитывается также перегрев в пусковых режимах при низкой частоте огибающей.

Для иллюстрации сказанного произведем выбор стандартного модуля IGBT SEMIKRON для

заданных рабочих режимов. В таблице 3 приведены результаты расчетов суммарной рассеиваемой мощности P_{TOT} , максимальной температуры кристалла IGBT T_{j1} и антипараллельного диода T_{jD} , температуры корпуса модуля T_c и температуры теплооттока T_s модулей IGBT SEMITRANS с одинаковым номинальным током в схеме трехфазного преобразователя частоты при двух значениях частоты огибающей f_{OUT} и следующих условиях эксплуатации:

- напряжение шины питания $V_{DC} = 600$ В;
- выходное напряжение $V_{OUT} = 400$ В;
- выходной ток $I_{OUT} = 50$ А;
- $\cos \varphi = 0,85$;
- частота ШИМ, $f_{sw} = 8$ кГц;
- охлаждение — принудительное воздушное, 85 м³/ч;
- температура окружающей среды — 40 °С;
- тепловое сопротивление теплооттока $R_{thsa} = 0,11$ °С/Вт.

Анализ, произведенный с помощью программы SEMISEL, дает нам однозначный ответ: для заданных условий эксплуатации минимальный перегрев кристаллов обеспечивается при использовании модуля SKM400GB128 с транзисторами IGBT, изготовленными по технологии SPT.

Как сравнить?

Наличие программ теплового расчета дает пользователю уникальную возможность не только выбрать наилучший элемент данного производителя, но и сравнить его с аналогами других фирм. Соответственно, на основании теплового анализа вы можете не только определить, какой силовой ключ является оптимальным для решения задачи, но и при необходимости найти ему замену.

Для наглядности проведем выбор компонентов и сравнительный расчет температуры кристаллов модулей IGBT производства SEMIKRON и EUPEC для следующих условий эксплуатации:

- напряжение шины питания — 600 В;
- выходное напряжение (эффективное значение) — 400 В;
- выходной ток (эффективное значение) — 100 А;
- $\cos \varphi = 0,85$;
- частота ШИМ — 3 кГц;
- частота выходного напряжения — 50 Гц;
- температура окружающей среды — 40 °С.

Поскольку заданная рабочая частота довольно низка (3 кГц), то лучшим выбором являются IGBT-транзисторы, выполненные по технологии Trench, обеспечивающие самые низкие потери проводимости, то есть 126-я серия SEMIKRON или серия KE3 — EUPEC.

В таблице 3 приведены основные технические характеристики модуля FF200R12KE3G (EUPEC), который предварительно выбран для решения задачи, и альтернативного модуля SEMIKRON — SKM200GB126D. Как показывает таблица, цифры, имеющиеся в названии модуля и обозначающие рабочий ток при определенных условиях эксплуатации, *никак не могут быть использованы для поиска замены, а это является одной из самых распространенных ошибок*. Обратите внимание, что для модуля EUPEC цифра 200 обозначает постоянный ток коллектора при температуре радиатора 80 °С, а у SEMIKRON эта связь довольно условна. Многие производители приводят в названии модуля ток при температуре 25 °С, кроме того, точка измерения температуры радиатора у различных фирм может быть разной, что весьма существенно сказывается на результате. В настоящее время нормирование тока при 80(85) °С является наиболее распространенным методом, поскольку такой температурный режим более всего соответствует реальным условиям эксплуатации — при данной температуре радиатора температура кристалла, как правило, близка к предельной.

Таким образом, информации о номинальном токе (столбец I_C в табл. 3) не следует придавать особого значения. Лучше сразу обратить внимание на параметры, определяющие величину рассеиваемой мощности: напряжение насыщения V_{CEsat} и значение энергии потерь включения/выключения E_{on}/E_{off} . Для всех сравниваемых модулей номинальная величина V_{CEsat} одинакова — 1,7 В, поэтому в данном столбце приведены гораздо более интересные для сравнения значения напряжения насыщения при одинаковом токе (здесь — 200 А) и температуре 125 °С, определенные по графику зависимости $V_{CE} = f(I_C)$. В результате ситуация еще более запутывается — у модуля SKM200GB126D больше напряжение насыщения, но меньше энергия потерь. Не будем забывать также о мощности, рассеиваемой на сопротивлении силовых выводов R_{CC+EE} , которое у SEMIKRON в два раза ниже, и о потерях схемы управления, определяемых рабочей частотой и зарядом затвора Q_g .

Следующий тонкий момент — это выбор режима охлаждения и расчет теплового сопротивления радиатора. Мы уже упоминали, что программа IPOSIM не имеет такой возможности, поэтому воспользуемся меню COOLING программы SEMISEL. При режиме охлаждения, рекомендованном для данного случая (принудительное воздушное со скоростью потока 85 м³/час), тепловое сопротивление $R_{thsa} = 0,11$ °С/Вт, и именно это значение вводится в соответствующее окно программы IPOSIM.

Последний нюанс, на который необходимо обратить внимание, — IPOSIM производит расчет только для одного транзистора полумостового модуля и не учитывает взаимную тепловую связь. Поэтому для того, чтобы

Таблица 3. Выбор типа модуля IGBT SEMITRANS

Тип модуля	SKM400GB123 Standard NPT		SKM400GB124 Low Loss NPT		SKM400GB125 Ultrafast NPT		SKM400GB128 SPT	
f_{OUT} , Гц	50	2	50	2	50	2	50	2
P_{TOT} , Вт	607	582	533	528	519	480	454	456
T_{ID} , °С	117	120	108	111	107	111	98	101
T_{ID} , °С	118	120	109	110	107	107	99	100
T_{cr} , °С	114	114	105	105	104	103	96	96
T_{cr} , °С	107	107	99	99	97	97	90	90

Таблица 4. Сравнительные характеристики модулей Trench IGBT EUPEC/ SEMIKRON (полумост, рабочее напряжение 1200 В)

Тип элемента	I_C , А (25/80 °С)	$V_{CEsatnom}/V_{CEsat}$, В (200 А, 125 °С)	R_{thjc} , °С/Вт	R_{CC+EE} , мОм	$E_{on} + E_{off}$, мДж	Q_g , нКл
FF200R12KE3G	295/200	1,7/2,0	0,12	0,70	15 + 35	1900
SKM200GB126D	260/190	1,7/2,2	0,13	0,35	18 + 24	1100

Таблица 5. Результаты расчетов IPOSIM/SEMISEL

Тип элемента	P_{IGBT} , Вт		P_{FWD} , Вт		P_{TOT} , Вт		T_{Jr} , °С	
	3 кГц	10 кГц	3 кГц	10 кГц	3 кГц	10 кГц	3 кГц	10 кГц
FF200R12KE3G	104	193	26	60	135	258	73	102
SKM200GB126D	96		20		119		74	
SKM200GB128D		163		30		193		91

«уравнять условия», в меню COOLING программы SEMISEL в окне Number of switches per heatsink необходимо поставить цифру 1.

Проделав все описанные выше (не такие уж и сложные) действия, вы можете быть уверены, что труд будет вознагражден, поскольку дальнейшую, самую тяжелую часть работы программы расчета сделают за вас. Результаты расчетов приведены в таблице 5 — там вы можете увидеть значение мощности, рассеиваемой на кристалле транзистора P_{IGBT} , антипараллельного диода P_{FWD} , суммарную мощность потерь P_{TOT} (с учетом потерь на силовых выводах) и температуру кристалла транзистора — то, ради чего все вышеописанное и затевалось.

Результат оказался очень интересным — при заданных нами условиях эксплуатации модуль SEMIKRON SKM200GB126 является абсолютно адекватной заменой модулю EUPEC. Большая мощность, рассеиваемая модулем EUPEC, компенсируется меньшим значением теплового сопротивления. Разница в 1 °С не превышает погрешность расчета, которая может составлять 3–5 °С.

Для «чистоты эксперимента» произведем аналогичные расчеты для частоты $f_{sw} = 10$ кГц. На этой частоте использование Trench-технологии уже нецелесообразно, и анализ произведен для модуля SKM200GB128N, выполненного по высокочастотной технологии SPT. Результат налицо — как показывают данные, приведенные в таблице 4, мощность рассеяния и температура кристалла высокочастотного модуля SPT заметно ниже, чем у рассматриваемого модуля EUPEC.

Заключение

Автоматизация процесса теплового расчета силовых каскадов и выбора компонентов давно стали насущной потребностью специалистов, работающих в области силовой электроники. На сегодняшний день программу SEMISEL следует признать наиболее автоматизированной, точной и простой в использовании, так как 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. Удобный интерфейс, пояснения, данные для всех режимов работы, позволяют использовать программу разработчикам средней квалификации.

Главным ограничением для использования SEMISEL является то, что эта программа позволяет осуществлять корректный тепловой расчет только компонентов производства SEMIKRON, так как все коэффициенты, использованные в формулах и выражениях, рассчитаны применительно к данным компонентам. Однако такое же ограничение имеют все аналогичные средства расчета, в том числе и упомянутые в статье MelcoSim и IPOSIM.

Следует признать, что это не является проблемой, поскольку производственная программа фирмы SEMIKRON насчитывает более 10000 наименований, а диапазон мощностей распространяется от десятков ватт до единиц мегаватт. Эти изделия широко используются в приводах, устройствах электропитания, промышленной автоматизации и энергетики, при производстве автомобилей. Поэтому потребитель всегда может найти среди изделий SEMIKRON подходящий элемент для своих разработок.

Программа SEMISEL доступна на сайте фирмы SEMIKRON www.semikron.com.

Литература

1. Sven Konrad. Тепловые параметры силовых модулей в широтно-импульсных преобразователях. Technical University of Ilmenau, Germany.
2. Goldman W. E. An Introduction to the Art of Heat Sinking. Electronic Packaging and Production. 1966.
3. Колпаков А. IGBT или MOSFET? Практика выбора // Компоненты и технологии. 2002. № 1.
4. Колпаков А. Программа теплового расчета SEMISEL // Компоненты и технологии. 2002. № 9.
5. Колпаков А. И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SEMISEL // Электронные компоненты. 2004. № 6.
6. Колпаков А. SEMITRANS — один в пяти лицах // Компоненты и технологии. 2003. № 8.