

SEMISEL 3.1 —

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Тенденции современного рынка силовой электроники: сокращение сроков проектирования, рост плотности мощности и повышение требований к надежности — делают невозможным процесс разработки без специализированного программного обеспечения. Компьютерные средства анализа режимов работы мощных преобразовательных устройств предлагаются практически всеми основными производителями силовых модулей, но наибольшей популярностью пользуются программы SEMIKRON (SEMISEL), Infineon (IPOSIM), Mitsubishi (MELCOSIM) [1–3]. Данная статья посвящена возможностям новой версии SEMISEL V3.1, которая с недавнего времени появилась на сайте SEMIKRON.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

**немного об истории
создания программы**

Компания SEMIKRON предложила для массового применения программу автоматизированного расчета и выбора компонентов [4] в 2001 году. С тех пор постоянно обновляемая on-line версия SEMISEL доступна на сайте www.semikron.com.

Программа может быть использована для анализа основных конфигураций схем в реальных условиях эксплуатации, она способна помочь разработчику практически на всех этапах проектирования: от формирования технического задания и выбора компонентов до оптимизации системы охлаждения.

SEMISEL предлагает пользователю несколько режимов работы, включающих тепловой расчет, выбор силового ключа (Device Proposal), готовой сборки (StackSel), устройства управления (DriverSel). Самым важным этапом проектирования является расчет потерь мощности и температуры перегрева, в интернет-версии он носит название **Step by Step Design**. Стартовое меню SEMISEL, включающее все возможные варианты вычислений, показано на рис. 1.

Естественно, что для правильного задания исходных данных, получения корректных результатов и их грамотной оценки пользователь должен достаточно хорошо представлять себе задачу, понимать физический смысл параметров и систему их обозначений. Однако это несоизмеримо с той массой знаний, которую необходимо иметь разработчику для «ручного» расчета режимов работы схемы.

Обновление базы данных

Постоянное обновление и пополнение базы данных является обязательным требованием для любой подобной программы. Разработчик должен иметь возможность производить анализ схемы с применением новейших поколений силовых ключей, с учетом особенностей их параметров и конструктивов.

В библиотеку элементов SEMISEL V3.1 включены модули четвертой генерации Trench 4 IGBT. Особенностям этих силовых ключей, являющихся на сегодняшний день наиболее универсальными для приводных применений, посвящено достаточно много публикаций [4]. Теперь при анализе схем инверторов пользователь имеет возможность выбрать модули поколения T4 следующих серий:

- SEMITRANS,
- SEMiX,
- SKiiP,
- MiniSKiiP,
- SKiM.

В конструктиве SEMIPONT, который ранее использовался только для производства выпрямительных мостов, теперь доступна схема, содержащая 3-фазный выпрямитель и чоппер IGBT. Такие модули могут быть использованы в приводах, где чоппер играет роль тормозного каскада, и в DC/DC-преобразователях. Серия диодных и тиристорных мостов дополнена новыми выпрямителями в корпусах SEMiX. Необходимо отметить, что, как и ранее, существует возможность анализа схем с применением устаревших типов модулей, для чего необходимо пометить окно «Add Former Generations» (рис. 2).

Новые конфигурации схем

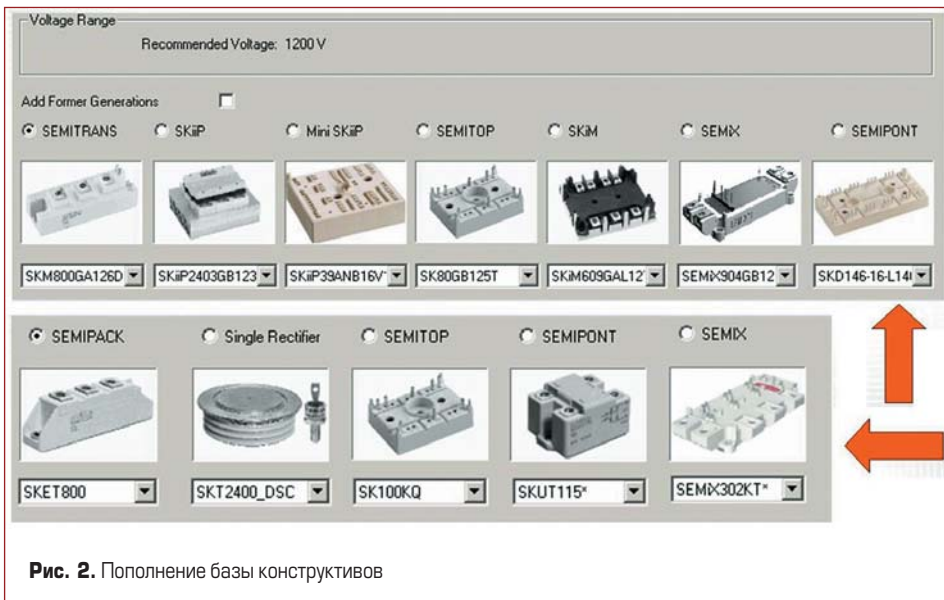
Одним из главных достоинств программы SEMISEL по сравнению с аналогичными средствами расчета является широкий выбор схем AC/DC, AC/AC DC/AC и DC/DC-преобразователей:

1. AC/DC

- B2U — однофазный выпрямительный мост.



Рис. 1. Режимы работы SEMISEL



- Pulse Width t_{pw} — ширина импульсного пакета;
- Cycle Duration T_p — период повторения импульсов;
- Switching frequency f_{sw} — частота ШИМ.

Новые возможности: Z_{th} экстрактор

Главным критерием правильности выбора элемента, позволяющим оценить запас по предельным режимам и спрогнозировать показатели надежности, является температура кристаллов T_j в статических и динамических режимах. Она рассчитывается на основании величины мощности потерь, методика определения которой подробно описана в [1–4].

Для анализа динамических тепловых процессов модель силового ключа представляется в виде эквивалентной электрической схемы, состоящей из некоторого количества RC цепочек. Источники тепла на электрической схеме заменяются источниками тока, а базовые значения температуры (например, T_a — температура окружающей среды) — источниками напряжения. Эквивалентные термодинамические и электрические параметры приведены в таблице 1. Расчет температуры кристалла IGBT T_{j_IGBT} в установившемся состоянии производится в соответствии со следующим выражением:

$$T_{j_IGBT} = P_{v_IGBT} \times R_{th(j-s)} + \sum P_{v-n} \times R_{th(s-a)} + T_a$$

где P_{v-n} — суммарная мощность потерь всех элементов, установленных на общем радиаторе.

Таблица 1. Соответствие тепловых и электрических параметров

Электрические параметры	Ед. изм.	Термодинамические параметры	Ед. изм.
Заряд Q	К	Тепловая энергия Q_{th}	Дж
Ток I	А	Тепловой поток P	Вт
Напряжение U	В	Разность температур ΔT	°C
Сопrotивление R	Ом	Тепловое сопротивление R_{th}	°C/Вт
Емкость C	Ф	Теплоемкость C_{th}	Дж/°C

Анализ номинальных режимов и температур является базовым для оценки состояния перегрузки, оказывающего наибольшее влияние на надежность работы преобразовательного устройства. Расчет предельных режимов в SemiSel производится для двух случаев, определяемых в окне **overload parameter**, — это перегрузка по току, заданная коэффициентом и длительностью режима (factor, duration), и перегрев, обусловленный низкой частотой выходного напряжения (min output frequency).

Естественно, что увеличение тока нагрузки приводит к росту потерь и повышению температуры кристалла. Наибольший интерес представляет оценка динамики этого процесса, особенно если перегрузка носит кратковременный характер и температура не успевает достичь установившегося значения. В этом случае перегрев определяется по приведенной выше формуле, в которой тепловое сопротивление

- В2Н — однофазный тиристорный мост с управлением в верхнем плече.
 - В2С — однофазный полностью управляемый тиристорный мост.
 - В6U — трехфазный выпрямительный мост.
 - В6Н — трехфазный тиристорный мост с управлением в верхнем плече.
 - В6С — трехфазный полностью управляемый тиристорный мост.
2. AC/AC
- W1C — тиристорный ключ.
 - W1C — трехфазный тиристорный ключ.
3. DC/AC
- Inverter_1_phases — полный мостовой каскад (в режиме разрывного и непрерывного тока).
 - Inverter_3_phases — 3-фазный инвертер.
4. DC/DC
- Buck — чоппер верхнего плеча.
 - Boost — чоппер нижнего плеча.

Приводная техника не стоит на месте, появляются новые виды электрических машин, для управления которыми зачастую требуются нестандартные типы или режимы работы конвeрторов. В библиотеку схем SEMISEL 3.1 включен несимметричный однофазный преобразователь, предназначенный для управления током пары полюсов вентильного индукторного двигателя (ВИРД или SRM — Switch Reluctance Machine). Схема устройства и задаваемые параметры приведены на рис. 3.

В отличие от обычного чопперного каскада данный инвертер позволяет формировать пакки импульсов с высокочастотным заполнением, при этом пользователь может задать следующие исходные данные:

- Input voltage V_d — входное напряжение постоянного тока;
- Duty Cycle during pulse — коэффициент заполнения;
- Current I_{out} — выходной ток;

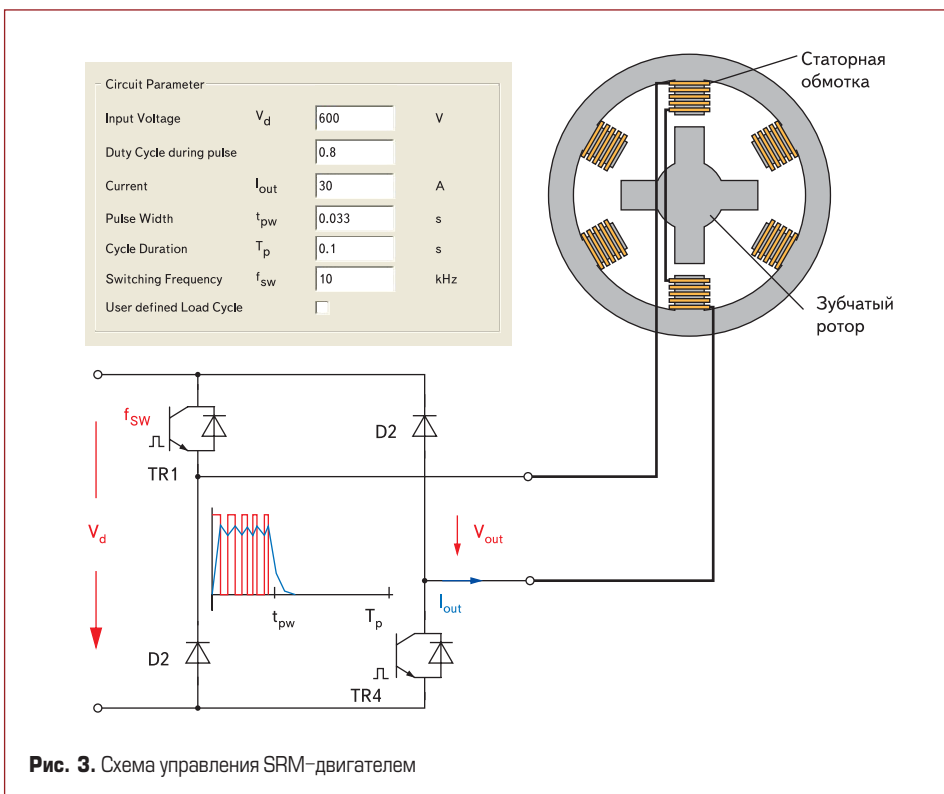


Рис. 3. Схема управления SRM-двигателем

ление R_{th} заменяется на динамический импеданс Z_{th} , что позволяет получить мгновенное значение T_j в зависимости от длительности режима.

$$T_{j_IGBT}(t) = P_{v_IGBT}(t) \times Z_{th(j-s)}(t) + \sum_n P_{v_n}(t) \times Z_{th(s-a)}(t) + T_a$$

Как уже было сказано, программа SEMISEL производит расчет температуры перегрева с помощью эквивалентных электрических схем. Для аппроксимации сложного графика зависимости $Z_{th} = f(t_p)$ используется последовательное соединение 3 и более RC-звеньев (рис. 4), каждое из которых отвечает за свой участок характеристики. Для всех модулей и радиаторов SEMIKRON величины соответствующих элементов рассчитаны и включены в базу данных программы, таблицы со значениями R_n и τ_n (Transient Thermal Impedance Analytical Elements) можно найти в каталогах продукции, выпускаемых фирмой. Однако, начиная с 3-й версии SEMISEL, ее разработчики поставили своей целью сделать программу пригодной для анализа преобразовательных схем, созданных на основе любых компонентов, независимо от производителя. С этой целью в меню выбора силового ключа **Device Parameter** включено окно **Create User Defined Device**, с помощью которого можно описать характеристики силового модуля и создать его тепловую модель.

Данная возможность расширена в версии 3.1 с помощью инструмента Z_{th} extractor, позволяющего определять параметры модели по графику динамического теплового импеданса. Семейства кривых Z_{th} для различных длительностей импульсов проводимости и коэффициентов заполнения (Duty Cycle) приводятся в документации все серьезные производители силовых модулей и теплоотводов. Новая опция дает возможность ввести эти графики в табличной форме или с помощью нескольких щелчков левой кнопкой мыши в окне Z_{th} Data. После задания данных и нажатия кнопки Result (синяя стрелка на рис. 4) происходит автоматическая генерация параметров R и τ .

Новые возможности: сравнение характеристик

Одной из главных проблем проектирования преобразовательного устройства является выбор силового ключа, обеспечивающего минимальный уровень потерь при заданных условиях эксплуатации. С помощью программы SEMISEL эта задача и раньше решалась вполне успешно: достаточно было задать рабочие режимы, провести расчет схемы для нескольких подходящих типов модулей и сопоставить результаты.

Версия SEMISEL 3.1 содержит опцию, позволяющую упростить процесс сравнения и сделать его более наглядным. Теперь, проведя вычисления для одного из выбранных силовых ключей, можно щелкнуть правой кнопкой мыши на окне результатов, задать режим **Device Comparison** и выбрать любой из альтернативных модулей. В результате этого по-

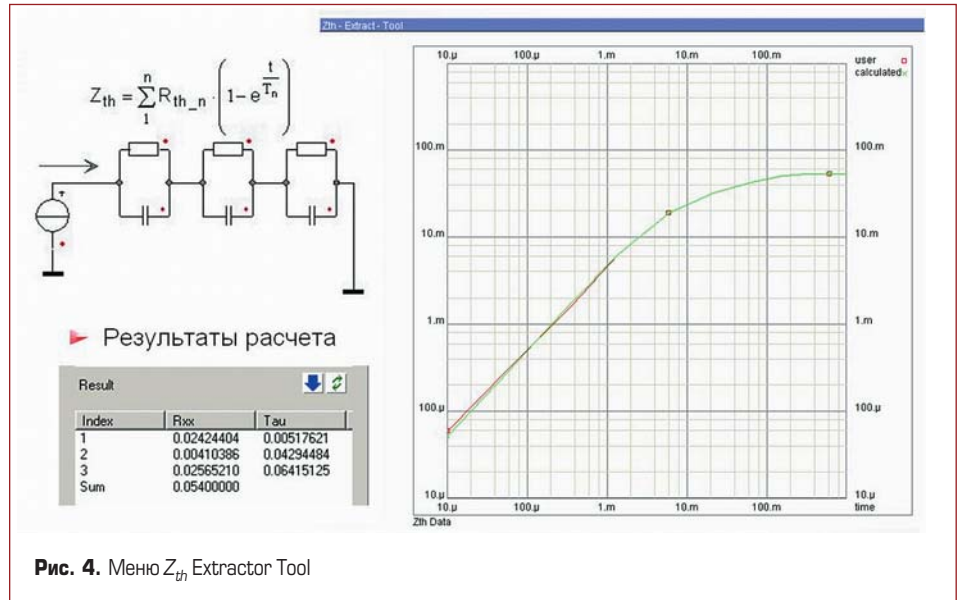


Рис. 4. Меню Z_{th} Extractor Tool

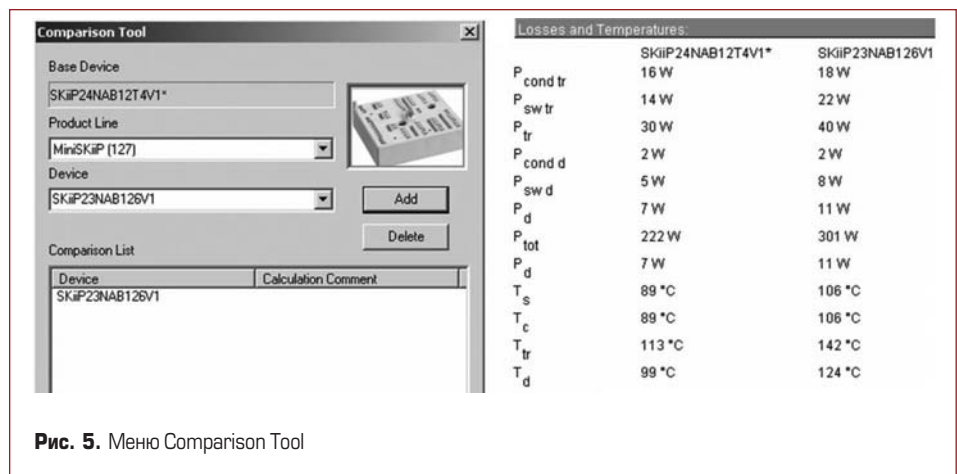


Рис. 5. Меню Comparison Tool

явится окно **Losses and Temperatures**, в котором будут указаны значения рассеиваемой мощности и температуры перегрева в номинальном и пиковом режиме для рассматриваемых вариантов (рис. 5).

Повышение точности расчета: задание формы импульса

При моделировании режимов работы однофазного инвертора важно учитывать форму тока, протекающего через ключевой транзистор. Кривая его изменения в течение импульса проводимости оказывает существенное влияние на величину динамических потерь IGBT. Особенно актуальным это является при рабо-

те инвертора на нагрузку, имеющую достаточно низкую индуктивность, когда ток нагрузки меняется с частотой коммутации, что характерно, например, для установок индукционного нагрева.

Программа SEMISEL V3.1 позволяет задавать три формы импульса (рис. 6): прямоугольную (Rectangular), трапецидальную (Trapezoid) и треугольную (Triangular). В результате при расчете коммутационных потерь IGBT и антипараллельного диода значение энергии включения и выключения корректируется с учетом соответствующей кривой, что позволяет получить значение температуры перегрева чипов IGBT и диода с более высокой точностью.

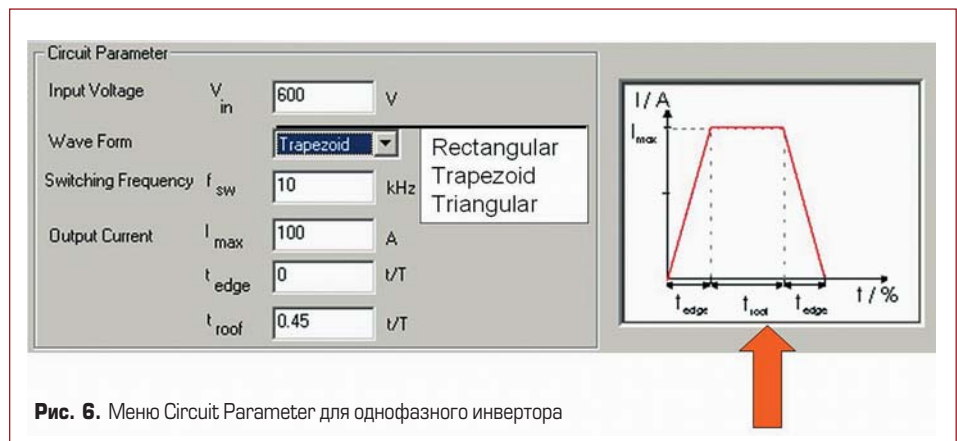


Рис. 6. Меню Circuit Parameter для однофазного инвертора

Повышение точности расчета: перегрузка при низких частотах работы привода

При анализе схемы 3-фазного приводного инвертора программа SEMISEL рассматривает два предельных состояния, приводящих к повышению температуры чипов относительно среднего значения. Первое из них вызывается токовой перегрузкой, которая задается с помощью коэффициента (Overload factor) и длительности (Duration).

Наиболее сложным тепловым режимом является работа привода на низких частотах огибающей или пуск с нулевой частоты, особенно если это происходит при повышенном моменте/токе. На самом деле ситуации, когда $f_{out} = 0$, не существует, поскольку даже первое колебание выходного напряжения имеет период конечной длительности T_1 . Соответственно, стартовая частота должна определяться как $f_{out} = 1/T_1$, при этом T_1 может быть намного больше тепловой постоянной времени всей системы. Проблемы оценки данного режима связаны как с низкой корректностью стандартных формул теплового расчета инвертора, так и с тем, что программа предполагает более-менее равномерное распределение тепла по поверхности теплоотвода. Однако при очень низких частотах может оказаться, что один из шести ключей инвертора работает практически на постоянном токе и является основным источником потерь.

На рис. 7а показано отклонение пиковой температуры чипа IGBT $T_{j,IGBT}$ от среднего значения при различных частотах работы привода. Нормированная кривая изменения тока, в соответствии с которой производились расчеты перегрева, приведена в правой части рисунка. Следует обратить внимание на то, что при этом соотношении I_{out}/I_{nom} не превышает единичного значения, т. е. перегрузка по току отсутствует. Причиной увеличения амплитуды пульсаций dT_j при той же величине рассеиваемой мощности P_j является недостаточная тепловая инерция теплоотвода, не способного с понижением частоты обеспечить равномерное распределение тепла между транзисторами полумостового каскада.

Для учета перегрева, вызванного этим эффектом (рис. 8а), в SEMISEL используется поправочный коэффициент $K(f)$, график зави-

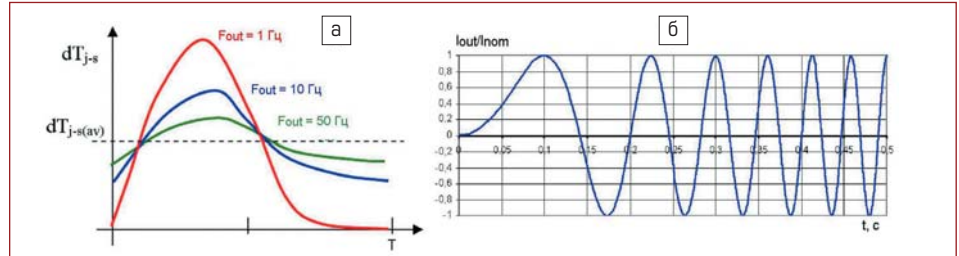


Рис. 7. а — колебания температуры кристалла относительно среднего значения при разных частотах F_{out} , б — нормированная кривая изменения тока при пуске асинхронного двигателя

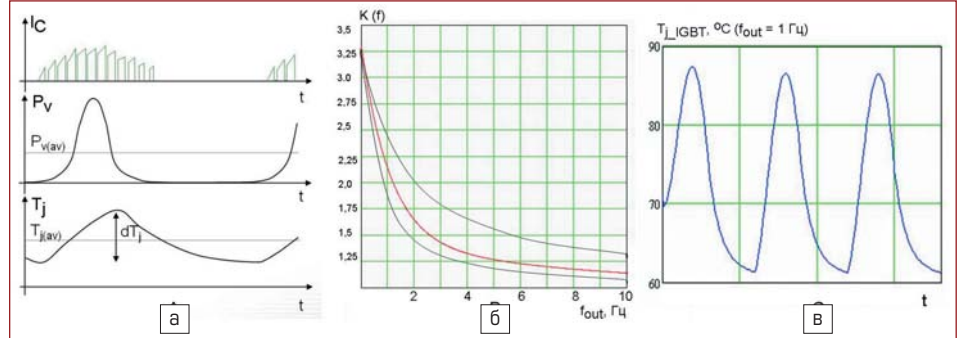


Рис. 8. а — изменение рассеиваемой мощности и пиковой температуры кристалла; б — зависимость коэффициента коррекции от частоты f_{out} ; в — изменение температуры чипа IGBT модуля MiniSKiiP при $f_{out} = 1$ Гц

симости которого от частоты показан на рис. 8б. Вплоть до версии 3.1 для каждого значения f_{out} применялась фиксированная величина K независимо от типа компонента (красный график на рис. 8б). Это вносило определенные погрешности в расчеты, поскольку в реальности колебания температуры зависят от теплового импеданса модуля.

Теперь данная проблема решена, и поправка вносится индивидуально в зависимости от тепловых характеристик конкретного силового ключа. Более того, методика определения градиента отличается для модулей базовой и «безбазовой» конструкции. В первом случае $dT_{j(max)} = dT_{(j-c)av} \times K(f_{out}) + T_c$, во втором — $dT_{j(max)} = dT_{(j-c)av} \times K(f_{out}) + T_s$, где T_c — температура корпуса модуля, T_s — температура радиатора. Соответственно, для расчетов переходных состояний применяется кривая динамического теплового импеданса $Z_{th(j-c)}$ или $Z_{th(j-s)}$ в зависимости от конструкции ключа. Две черные эпюры на рис. 8б

определяют зону возможных изменений величины $K(f)$.

На рис. 8в показана кривая изменения температуры чипа IGBT $T_{j,IGBT}$ модуля прижимной конструкции MiniSKiiP, полученная в соответствии с уточненной методикой. Результаты расчетов мощности рассеяния и температуры перегрева при трех вариантах сочетания коэффициента перегрузки K_o и изменении частоты огибающей приведены на рис. 9. В первом случае перегрузка отсутствует, привод работает на фиксированной частоте 50 Гц, во втором f_{out} изменяется от 2 до 50 Гц, в третьем, кроме изменения частоты огибающей, привод работает в условиях 20% токовой перегрузки.

Режим 1. Средние значения потерь не зависят от частоты выходного сигнала. Пульсациями температуры кристалла (105–102 °C) в данном случае можно пренебречь. При увеличении частоты выше номинального значения ($f_{out} > f_{nom}$) градиент может быть определен как $dT \approx 2 \times (T_{max} - T_{av})$.

Losses and Temperatures: $K_o = 1, f_{out} = f_{min} = 50$ Гц			$K_o = 1, f_{out} = 50$ Гц $> f_{min} = 2$ Гц			$K_o = 1.2, f_{out} = 50$ Гц $> f_{min} = 2$ Гц		
	Rated Current	Overload	Min. Frequency and Overload	Overload	Min. Frequency and Overload	Overload	Min. Frequency and Overload	
$P_{cond tr}$	69 W	69 W	69 W	69 W	69 W	91 W	62 W	
$P_{sw tr}$	109 W	109 W	110 W	109 W	110 W	135 W	135 W	
P_{tr}	178 W	178 W	179 W	178 W	179 W	226 W	197 W	
$P_{cond d}$	21 W	21 W	21 W	21 W	21 W	26 W	59 W	
$P_{sw d}$	46 W	46 W	47 W	46 W	47 W	56 W	59 W	
P_d	67 W	67 W	68 W	67 W	68 W	81 W	118 W	
P_{tot}	978 W	978 W	987 W	978 W	987 W	1229 W	1259 W	
	Average Values	Average Values	Maximum Values	Average Values	Maximum Values	Average Values	Maximum Values	
T_s	70 °C	70 °C	70 °C	70 °C	70 °C	72 °C	72 °C	
T_c	89 °C	89 °C	89 °C	89 °C	89 °C	95 °C	96 °C	
T_{tr}	102 °C	102 °C	105 °C	102 °C	129 °C	112 °C	138 °C	
T_d	98 °C	98 °C	101 °C	98 °C	116 °C	107 °C	143 °C	

Рис. 9. Результаты расчетов температуры перегрева для различных состояний перегрузки

Режим 2. Мощность, рассеиваемая кристаллом, в этом случае такая же, как в предыдущем варианте, причем она не зависит от f_{out} . Температура максимальна при $f_{out} = f_{min}$, ее перепад (129–102 °C) при $f_{out} = 2$ Гц вносит существенный вклад в определение состояния перегрузки.

Режим 3. Увеличение мощности потерь пропорционально току IGBT, среднее значение P_{tot} не зависит от f_{out} . Температура повышается из-за состояния перегрузки, она максимальна при $f_{out} = f_{min}$, чипы успевают остыть до температуры корпуса: $dT = T_{j,max} - T_c$ (138–112 °C).

Сравнение прежнего и нового методов расчета пульсаций температуры в перегрузочных режимах показывает, что использование «адаптированного» значения К (f) позволяет получить более корректные результаты, особенно в диапазоне частот 1...10 Гц, где перегрев может достичь критических значений. Сказанное поясняется приведенными в таблице 2 результатами анализа 3-фазного инвертора на базе модуля IGBT SKM400GB128D при следующих условиях эксплуатации:

- тип радиатора — P16/200;
- напряжение питания $V_{dc} = 650$ В;
- частота ШИМ $f_{sw} = 4$ кГц;
- ток нагрузки $I_{out} = 125$ А;
- перегрузка — 50%, 60 с;
- изменение частоты выходного сигнала $f_{out} = 0,1-50$ Гц ($V_{out} = 41-400$ В).

Столь высокий уровень перегрева чипов при низкой частоте огибающей объясняется тем фактом, что динамический тепловой импеданс $Z_{th(j-c)}$ стандартных модулей IGBT достигает установившегося значения при длительности импульса проводимости $t_p \approx 100$ мс. При частоте выходного сигнала $f_{out} = 1$ Гц силовой ключ проводит ток в течение 500 мс, соответственно температура чипа практически успевает достичь установившегося состояния при максимальной рассеиваемой мощности.

Необходимо отметить, что во всех рассмотренных режимах величина dT не является градиентом рабочего цикла, поскольку длительность состояния перегрузки гораздо меньше продолжительности стандартного цикла. Определение перепада температуры в последнем случае должно производиться с помощью опции «User Defined Load Cycle».

Для повышения точности вычислений и корректности отображения результатов

Таблица 2. Сравнение максимальной температуры кристалла при использовании универсального и «адаптированного» коэффициента коррекции

f_{out} Гц	$T_{j(max)IGBT}$ °C	$T_{j(max)Dr}$ °C	$T_{j(max)IGBT}$ °C	$T_{j(max)Dr}$ °C	dT, °C
	SEMISEL V3.0		SEMISEL V3.1		
0,1	139	144	137	141	-3
1	129	132	135	140	+8
2	129	132	135	140	+12
5	121	122	127	132	+10
10	120	120	125	126	+6
20	120	118	124	121	+4
50	122	116	124	116	+2

в SEMISEL 3.1 сделано еще несколько важных доработок. Например, при проведении вычислений для маломощных модулей, таких как SEMITOR или MiniSKiiP, вычисление значений потерь для номинального и перегрузочного режимов осуществляется с двумя десятичными знаками.

Ранее независимо от типа использованных силовых ключей нормальным условием эксплуатации считался режим, при котором в номинальном режиме температура кристаллов T_j не превышала порога в 125 °C, а при кратковременной перегрузке — 155 °C. В противном случае программа выдавала в окне результатов резюме «This configuration does not work!». С появлением новых модулей IGBT Trench 4 [5] границы безопасной работы расширились примерно на 25 °C: теперь ограничения по перегреву в номинальном и перегрузочном режимах составляют соответственно 150 и 175 °C, и эти значения учитываются при выработке рекомендаций в версии SEMISEL 3.1.

Дружественный интерфейс: новые функции курсора и мыши

Рассказ о новой версии программы SEMISEL был бы неполон, если бы мы не упомянули о «полезных мелочах» — новых возможностях мыши и курсора при работе с графикой.

- Нажатие правой кнопки мыши, как и прежде, вызывает контекстное меню, в котором кроме прежних пунктов Characteristics (подстройка графиков) и Properties (переход к другим разделам меню) появились новые — Full Size Graphic и Device Comparison (рис. 10). Первая опция позволяет увеличить график до размеров экрана, вторая — вызывает меню «Сравнение характеристик», возможности которого были рассмотрены в предыдущих разделах статьи.
- Теперь, если подвести стрелку курсора к любой точке на кривой, можно получить ее координаты в окне, расположенном в правом нижнем углу, как показано на рис. 10.
- Усовершенствована функция помощи при работе с программой: соответствующие пояснения появляются при установке курсора в любое окно задания исходных данных.
- SEMISEL 3.1 производит автоматический контроль предельной рабочей частоты модуля и пикового значения тока I_{CRM} .
- SEMISEL 3.1 способен проводить анализ режимов при отрицательных рабочих температурах.
- В режиме Device proposal (выбор типа модуля) возможно задание количества предлагаемых модулей и ограничение по предельной рабочей температуре T_{jmax} .

Заключение

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 расчет тепловых режимов, важность которого обус-

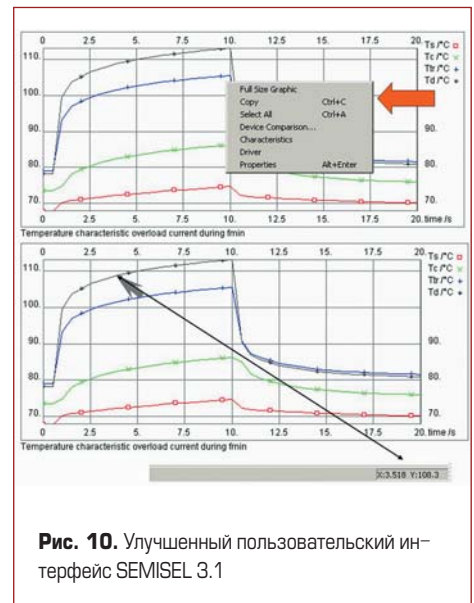


Рис. 10. Улучшенный пользовательский интерфейс SEMISEL 3.1

ловлена непрерывным увеличением плотности мощности.

Растущее многообразие решений, применяемых в силовой электронике, специализация типов компонентов привели к тому, что сравнение близких по назначению силовых модулей на основании только справочных данных стало серьезной проблемой. Сложность выбора компонента заключается и в том, что желательно максимально использовать его мощностные характеристики, чтобы не платить лишних денег за неоправданный запас по мощности.

Проектирование силового каскада является сложным многоступенчатым процессом, требующим от современного разработчика большого объема знаний и опыта. Автоматизированные средства разработки, позволяющие решать большинство поставленных задач, способны оказать неоценимую помощь при разработке и свести к минимуму ошибки проектировщика.

Возможности новой версии SEMISEL V3.1 делают эту программу наиболее универсальным на сегодняшний день средством расчета тепловых режимов и выбора компонентов для решения конкретной задачи. Постоянные клиенты SEMIKRON могут получить локальные версии SEMISEL у официальных дистрибьюторов и в центрах технической поддержки компании в С.-Петербурге и Новосибирске.

Литература

1. Колпаков А. И. MELCOSIM? IPOSIM? SEMISEL! О выборе и замене модулей IGBT // Силовая электроника. 2005. № 1.
2. Wintrich Arendt. Free Help with Your Converter Design // Semikron Elektronik. 2006.
3. 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.
4. Колпаков А. И. Программа SEMISEL — скорая помощь разработчику // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
5. Колпаков А. И. Trench 4 — руководство по эксплуатации // Силовая электроника. 2008. № 2.