

Программа теплового расчета SEMISEL фирмы SEMIKRON

Тепловой расчет силового каскада является одним из важнейших этапов процесса разработки, позволяющим подтвердить правильность выбора и применения электронного компонента и во многом определяющим надежность работы устройства. Предельные данные тока и напряжения транзистора или модуля, обычно вынесенные в заголовок технических характеристик, не дают разработчику никаких данных для расчета, а лишь позволяют в первом приближении сравнить один элемент с другим.

Андрей Колпаков

kai@megachip.ru

Сложность выбора компонента заключается и в том, что желательно максимально использовать его мощностные характеристики, чтобы не платить лишних денег за неоправданный запас по мощности. Большие значения допустимых импульсных токов (они могут в 5–10 раз превышать значения среднего тока) создают 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. Существуют специализированные пакеты программ для теплового моделирования электронных устройств, например, Sauna, BETAsoft, АСОНИКА-Т. Однако все эти программы предназначены для теплового анализа конструкции и неприменимы для расчета перегрева полупроводниковых кристаллов.

Только сложный многовариантный расчет [1] позволяет получить достаточно корректные результаты, однако он представляет известную проблему, особенно для начинающих пользователей. Поэтому уже неоднократно делались попытки автоматизировать процесс теплового расчета. Одной из наиболее удачных реализаций является программа HEXRISE — International Rectifier [2–3].

Данная статья посвящена описанию полностью автоматизированной программы SEMISEL (Semikron Semiconductor Selection), разработанной специалистами фирмы SEMIKRON. Эта программа позволяет в интерактивном режиме рассчитать потери мощности и температуру кристалла для конкретной схемы применения. Интересной особенностью программы является то, что она дает возможность не только произвести расчет, но и оптимально подобрать силовой модуль на основании исходных данных: тока, напряжения, мощности.

Общие положения

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.

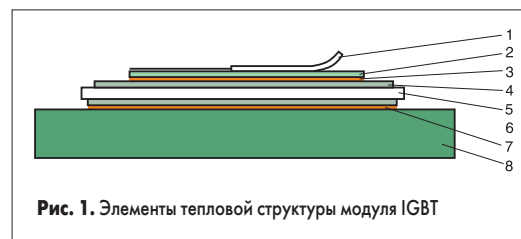


Рис. 1. Элементы тепловой структуры модуля IGBT

На рис. 1 показаны в разрезе слои стандартного модуля IGBT, участвующие в процессе теплопередачи: 1 — вывод чипа (Al), 2 — чип (Si), 3 — припой, 4 — металлизация (Cu), 5 — керамика (Al_2O_3), 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 сращивания. 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 расчете. Кроме того, для правильного анализа динамических тепловых процессов необходимо знать теплоемкость соответствующих слоев.

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

$$\Delta T(t) = P \times Z_{thJC} = P \sum_{i=1}^n R_i [1 - e^{-t/\tau_i}] \quad (1)$$

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

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

A. Одиночный кратковременный импульс (температура не достигает установившегося значения).

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

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

B. Последовательность одиночных прямоугольных импульсов. Этот режим используется для аппроксимации импульсов произвольной формы. Формула дана для последовательности из Q импульсов.

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

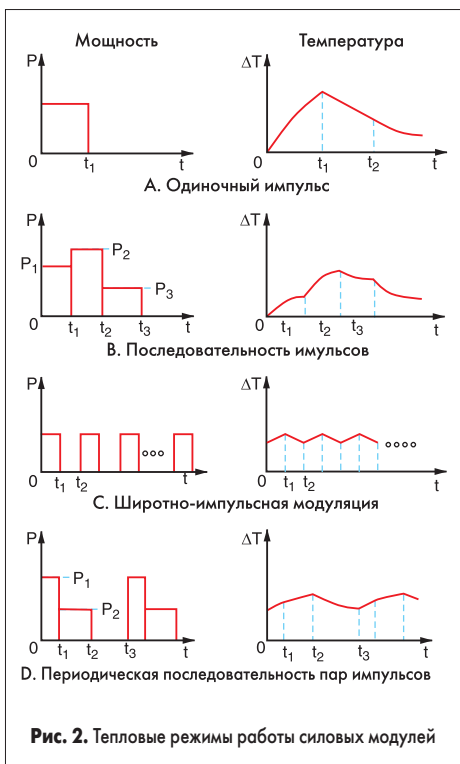


Рис. 2. Тепловые режимы работы силовых модулей

C. Широтно-импульсная модуляция с постоянным коэффициентом заполнения.

$$\Delta T = P \sum_{i=1}^n R_i \frac{1 - e^{-t_1/\tau_i}}{1 - e^{-t_2/\tau_i}}$$

D. Периодическая последовательность пар различных импульсов.

$$\Delta T = P_1 \sum_{i=1}^n R_i \frac{[1 - e^{-t_1/\tau_i}]e^{-(t_2-t_1)/\tau_i}}{1 - e^{-t_3/\tau_i}} + P_2 \sum_{i=1}^n R_i \frac{1 - e^{-(t_2-t_1)/\tau_i}}{1 - e^{-t_3/\tau_i}}$$

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

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

$$t_p = \frac{\Theta}{360} \times \frac{1}{f} \quad (3)$$

где t_p — длительность импульса, выраженная в формуле (3) через угол отсечки Θ , а f — рабочая частота.

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

Приведенные выше формулы даны отнюдь не для того, чтобы испугать 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 расчета.

Далее мы рассмотрим, как непосредственно работает программа SEMISEL.

Трехфазный выпрямительный мост

Программа позволяет осуществлять 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 — трехфазный мостовой каскад.
4. DC/DC:
 - Buck — чоппер верхнего плеча;
 - Boost — чоппер нижнего плеча.

Следует отметить, что все указанные схемы реализованы в модулях, производимых SEMIKRON.

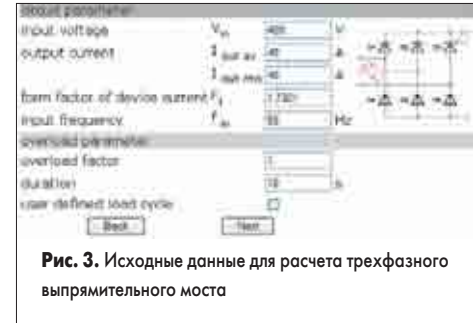


Рис. 3. Исходные данные для расчета трехфазного выпрямительного моста

Рассмотрим вариант расчета трехфазного выпрямителя. После выбора соответствующей конфигурации (B6U) 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 трехфазного выпрямителя. Если введены значения I_{av} и I_{rms} , F_1 вычисляется автоматически;
- f_{in} — значение частоты входного сигнала (учитывается при расчете потерь для быстрых диодов);
- Overload factor — по умолчанию SEMISEL производит расчет для 50-процентной перегрузки (Overload factor = 1,5). При расчете 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.

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

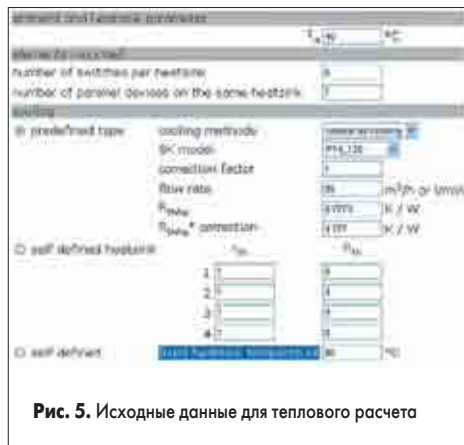


Рис. 4. Предлагаемые типы выпрямителей

работы, предельные значения (maximum values) необходимы для расчета режима перегрузки.

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

- T_a — температура окружающей среды;
- number of switches per heatsink — количество элементов модуля, в нашем случае (трехфазный выпрямитель) — 6, number of parallel devices on the same heatsink — количество параллельно соединенных на одном радиаторе модулей — 1;
- 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 теплоотвода производства SEMIKRON, после выбора автоматически заполняется графа теплового сопротивления R_{thha} ;
- correction factor — с помощью этого коэффициента можно изменять значение теплового сопротивления «теплоотвод — окружающая среда» R_{thha} ;
- 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.



Результаты расчетов можно увидеть в таблице 1. В таблице результатов кроме входных данных и конфигурации схемы приводятся следующие параметры:

- $V_{TO25(125)}$ — прямое падение напряжения;
 - $r_{T25(125)}$ — динамическое прямое сопротивление;
 - $Losses_{device}$ — потери на одном диоде;
 - $Losses_{TOT}$ — суммарные потери.
- С помощью соответствующих кнопок можно вернуться в любую точку программы, изменить исходные данные и повторить расчет. В конце расчета программа сообщит свое 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 ($100\text{ °C} < T_j < 125\text{ °C}$).
 - **This configuration seems to be too powerful** — выбран неоправданно мощный эле-

мент, запас по мощности слишком велик ($T_j < 100\text{ °C}$).

- **Recommendation by SEMIKRON: Do not use SEMIKRON devices over 125 °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.



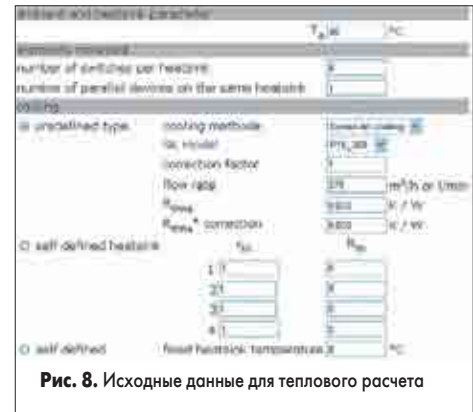
Трехфазный инвертор

Далее мы рассмотрим гораздо более интересный и сложный случай выбора и расчета параметров трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах. Форма исходного экрана для этого случая приведена на рис. 6. Для данного случая нам потребуется ввести следующие исходные данные:

- $V_{(d)}$ — максимальное напряжение шины питания;
- V_{out} — среднеквадратичное значение выходного напряжения;
- \cos_{phi} — коэффициент мощности (косинус угла между первой гармоникой выходного напряжения и тока);
- P_{out} — выходная мощность: $P_{out} = I_{out} \times V_{out} \times \cos \phi$. При вводе P_{out} или I_{out} , недостающий параметр генерируется автоматически;
- f_{sw} — частота ШИМ;
- f_{out} — частота выходного напряжения;
- overload factor, overload duration — коэффициент перегрузки и длительность перегрузки;



- $f_{min\ out}$, $V_{min\ out}$ — минимальная частота и минимальное среднеквадратичное значение выходного напряжения. По умолчанию $V_{min\ out} = V_{out} \times (0,1 + 0,9 \times f_{min\ out}/f_{out})$.



Как и в предыдущем случае, после выбора конструктива и типа модуля необходимо ввести данные для теплового расчета (рис. 8). В нашем случае мы выбрали интеллектуальный силовой модуль SKiiP2013GB122, имеющий теплоотвод, рассчитанный на режим принудительного воздушного охлаждения (forced air cooling). Значение коэффициента коррекции потерь переключения (correction factor) может отличаться от 1 для применений, работающих не в стандартном режиме «жесткого переключения», а, например, в резонансном режиме.

После выбора типа радиатора в графе **SK model** (в нашем случае P16_360) значения теплового сопротивления R_{thha} появляются автоматически. В данном меню необходимо указать температуру окружающего воздуха T_a (в нашем случае $T_a = 40\text{ °C}$). В меню (рис. 8) также определяется количество силовых транзисторов в модуле (number of switches per heatsink = 6) и количество модулей, соединенных параллельно на одном радиаторе (number of parallel devices on the same heatsink = 1).

Если используется стандартный модуль, например, типа SEMITRANS и радиатор собственного изготовления, то для него необходимо определить характеристики теплового сопротивления в графах **self defined heatsink**. Тепловое сопротивление определяется для четырех точек и рассчитывается в соответствии с формулой:

$$Z_{thha} = \sum_{n=1...4} (R_{thha_n} \times (1 - e^{t/\tau_n}))$$

Таблица 1. Результаты расчета трехфазного выпрямителя

		Project: Topology: AC/DC Circuit: B6U	
Circuit:			
$V_{in} = 400\text{ V}$	$I_{out} = 40\text{ A}$	Form factor = 1,7321	
	$I_{out\ rms} = 40\text{ A}$	$f_{in} = 50\text{ Hz}$	
Overload: factor = 1,5, duration = 10 s			
Device:			
device: SKKD700	recommended voltage: 1400 V		
	number of parallel devices on the same heatsink: 1		
	Max. junction temperature: 150 °C		
	use maximum values: no		
$V_{T0,25} = 0,81\text{ V}$	$V_{T0,125} = 0,59\text{ V}$		
$r_{T,25} = 0,13\text{ mOhm}$	$r_{T,125} = 0,19\text{ mOhm}$		
$R_{thjc} = 0,09\text{ K/W}$			
Cooling:			
	Ambient temperature = 40 °C		
	SK-Heatsink: P14_120, correction factor: 1		
	forced air cooling, flow rate: 85 m³/h		
	$R_{thha} = 0,11\text{ K/W}$		
Losses and temperatures:			
	steady state	overload	
Lossesdevice:	10,20 W	15,32 W	
Losses tot:	61,19 W	91,94 W	
Heatsink Temperature:	47 °C	47 °C	
Device Temperature:	48 °C	48 °C	

Последняя графа fixed heatsink temperature используется в случае, когда модуль используется без теплоотвода.

Результаты расчета представлены в таблице 2. Кроме исходных данных, вводимых пользователем в процессе работы, в таблице приводятся следующие характеристики:

- P_{cond_tr} — потери проводимости на транзисторе;
- P_{sw_tr} — потери переключения на транзисторе;
- $P_{tr} = P_{cond_tr} + P_{sw_tr}$ — суммарные потери на транзисторе;
- P_{cond_d} — потери проводимости на диоде;
- P_{sw_d} — потери переключения на диоде;
- $P_d = P_{cond_d} + P_{sw_d}$ — суммарные потери на диоде;
- $P_{tot} = n \times (P_{tr} + P_d)$ — суммарные потери модуля, n — количество элементов в схеме;
- $T_h = n_h \times (P_{tr} + P_d) \times R_{thha} + T_a$ — температура теплостока, n_h — количество силовых ключей на теплостоке;
- $T_c = n_c \times (P_{tr} + P_d) \times R_{thch} + T_h$ — температура корпуса, n_c — количество элементов в корпусе;
- $T_j = P_{tr/d} \times R_{thjc} + T_c$ — температура кристалла.

Обратите внимание, что в таблице 2 указан иной тип радиатора (NWK40_390), чем в задании на расчет (P16_360). Дело в том, для указанных исходных данных радиатор P16_360 имеет слишком высокое тепловое сопротивление, и рассчитанная температура кристалла оказывается выше 125 °C. Соответственно, программой было выдано замечание: **This configuration does not work!** После замены теплоотвода

Таблица 2. Результаты расчета трехфазного инвертора

		Project: Topology: DC/AC Circuit: Inverter_3_phases	
Circuit:			
$V_d = 600\text{ V}$	$I_{out} = 500\text{ A}$	$P_{out} = 294\text{ kW}$	$f_{out} = 50\text{ Hz}$
$V_{out} = 400\text{ V}$	$\cos\phi_{ph} = 0.85$		$f_{sw} = 8\text{ kHz}$
	$V_{min\ out} = 54\text{ V}$	$f_{min\ out} = 2\text{ Hz}$	
Overload: factor = 2, duration = 1 s			
Device:			
device: SKiiP2013GB122	Max. junction temperature: 150 °C		
transistor		diode	
$E_s = 360,00\text{ mJ}$	$E_r = 96,00\text{ mJ}$		
$V_{CE0,125} = 1\text{ V}$	$V_{T0,125} = 0,7\text{ V}$		
$r_{c,125} = 1,247\text{ mOhm}$	$r_{T,125} = 0,715\text{ mOhm}$		
$V_{CE,sat} = 2,4964\text{ V}$	$V_f = 1,558\text{ V}$		
$I_c = 1\ 200,00\text{ A}$	$I_f = 1\ 200,00\text{ A}$		
$R_{thjc} = 0,01\text{ K/W}$	$R_{thjc} = 0,03\text{ K/W}$		
Cooling:			
SK-Heatsink: NWK40_390, correction factor: 1		$R_{thha} = 0,009\text{ K/W}$	
water cooling, flow rate: 8 m³/h		$T_a = 40\text{ °C}$	
Calculated losses and temperatures with rated current, at overload and at minimum output frequency:			
	rated current	overload	min. frequency and overload
P_{cond_tr}	331 W	949 W	599 W
P_{sw_tr}	510 W	1094 W	1121 W
P_{tr}	842 W	2043 W	1720 W
P_{cond_d}	33 W	82 W	295 W
P_{sw_d}	176 W	297 W	336 W
P_d	209 W	379 W	631 W
P_{tot}	6306 W	14532 W	14106 W
T_h	97 °C	107 °C	107 °C
T_c	97 °C	107 °C	107 °C
T_{tr}	107 °C	129 °C	138 °C
T_j	104 °C	118 °C	138 °C
Recommendation by SEMIKRON: Do not use SEMIKRON devices over 125 °C			

температура T_j стала превышать рекомендуемое значение 125 °C только в режиме перегрузки, поэтому в последней строке таблицы появилось указание: **Recommendation by SEMIKRON: Do not use SEMIKRON devices over 125 °C.**

Заключение

Автоматизация процесса теплового расчета силовых каскадов и выбора компонентов уже давно стала насущной потребностью разработчиков. Программа HEXRISE, разработанная International Rectifier, имеет очень ограниченную область применения, так как пригодна только для расчета усилителей на MOSFET-транзисторах. Кроме того, достаточно корректно HEXRISE работает только в режиме импульсов с постоянной скважностью.

На данный момент программу SEMISEL SEMIKRON следует признать наиболее автоматизированной, точной и простой в использовании, так как она охватывает практически все существующие схемы и требует от пользователя ввода только числовых исходных данных (для работы с HEXRISE необходимо определять форму сигнала). Удобный интерфейс, пояснения, данные для всех режимов работы, позволяют использовать программу разработчикам средней квалификации.

Главным ограничением для использования SEMISEL является то, что эта программа предназначена для выбора и расчета компонентов производства SEMIKRON, так как все коэффициенты, использованные в формулах и выражениях, рассчитаны применительно к данным компонентам.

Это не удивительно, поскольку производственная программа фирмы насчитывает более

10 тыс. наименований, а диапазон мощностей распространяется от десятков ватт до единиц мегаватт. Эти изделия широко используются в приводах, устройствах электропитания, устройствах промышленной автоматизации и энергетики, в производстве автомобилей. Основное направление деятельности SEMIKRON — интеллектуальные модули IGBT, которые выпускаются во всех возможных конфигурациях в диапазоне напряжений до 1700 В и токов до 2800 А! Поэтому потребитель всегда может найти среди изделий SEMIKRON подходящий элемент для своих разработок.

Кроме того, практика показывает, что данную программу можно использовать и для расчета тепловых режимов других компонентов, если учесть разницу в тепловых сопротивлениях.

Программа SEMISEL доступна на сайте фирмы SEMIKRON [w www.semikron.de](http://www.semikron.de). 

1. А. И. Колпаков. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов // Компоненты и Технологии. 2002. № 1.
2. Doug Butchers. Calculating Temperature Gradients In Power MOSFETS With The «HEXRISE» Program. International Rectifier GB Ltd.
3. А. И. Колпаков. Расчет тепловых режимов MOSFET-транзисторов с помощью программы HEXRISE // Компоненты и Технологии. 2002. № 5.
4. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer's Manual. 1991.
5. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.