

Анализ теплового режима силового транзистора в схеме корректора коэффициента мощности

Сергей Овчинкин, Василий Голиков (Москва)

Известно, что надёжность работы полупроводниковых приборов зависит от температуры кристалла. Максимальная рабочая температура кристалла обычно даётся производителями в справочном листе. Эта температура является определяющей для установления предельных режимов работы полупроводниковых приборов.

Грамотный расчёт устройств силовой электроники для обеспечения их надёжной работы должен включать в себя анализ тепловых режимов полупроводниковых приборов, в особенности силовых. Для расчёта тепловых режимов необходимо иметь:

- тепловую модель прибора и всей охлаждающей конструкции;
- методику расчёта греющей мощности;
- способ расчёта температуры кристалла T_j с использованием тепловой модели.

Изложенные в статье соображения носят достаточно общий характер, однако числовые примеры привязаны к схеме корректора коэффициента мощности (ККМ, см. рис. 1), рабо-

тающего с частотой 100 кГц и мощностью, потребляемой от сети, 1 кВт. Особенность ККМ состоит в том, что мгновенная греющая мощность на ключе VT1 изменяется по периоду сетевого напряжения.

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА

Предполагается анализировать тепловой режим с помощью четырёхзвенной тепловой модели силовых транзисторов. Модель позволяет оценить температуру кристалла при любой форме импульса рассеиваемой мощности.

Использована методика, предложенная на кафедре ПЭ МЭИ (доц. Недолужко И.Г.). Методика состоит в приближенном вычислении значений R и C модели (см. рис. 2), которые хорошо аппроксимируют характеристику теплового сопротивления прибора. Исходя из характеристики переходного теплового сопротивления и задавая начальные приближения, можно получить параметры тепловой модели (см. таблицу 1). Модель – в любых режимах – при определении температуры даёт отклонения от приводимых производителем характеристик не более 5%.

Для оценки теплового режима транзисторов корректора приняты следующие определения и допущения:

- тепловая модель транзистора дополнена тепловым сопротивлением корпус-прокладка $R5 = 2^\circ\text{C}/\text{Вт}$ и теплоотводом $R6C6$ (см. рис. 2);
- тепловое сопротивление $R6$ радиатор – окружающая среда измерено экспериментально и составляет $1,0^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

- греющая мощность P состоит из термозависимой составляющей $P_{\text{стат}}$ (потери открытого состояния) и коммутационной термозависимой составляющей $P_{\text{к}}$. Термозависимая мощность $P_{\text{стат}}$ определяется при R_{dson} для 25°C , а термозависимость моделируется выражением:

$$P_{\text{стат}}(T) = P_{\text{стат}}(25^\circ\text{C}) \frac{R_{\text{dson}}(T^\circ)}{R_{\text{dson}}(25^\circ\text{C})},$$

где $R_{\text{dson}}(T)$ берётся из справочного листа на транзистор.

- мощность P_{add} на рис. 2 – это мощность потерь в сетевом выпрямительном мосте и диоде корректора, укрепленных на том же теплоотводе;
- температура окружающей среды T_{ambient} считается постоянной.

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В МОП-КЛЮЧЕ И ДИОДЕ В СХЕМЕ КОРРЕКТОРА

Средняя мощность потерь в открытом состоянии $P_{\text{стат}}$ на коммутационном интервале (период 100 кГц) равна:

$$P_{\text{стат}} = I_{\mu}^2 \gamma R_{\text{dson}}, \quad (1)$$

$$I_{\mu} = I_{\text{max}} \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\gamma = 1 - k \sin \varphi. \quad (3)$$

При этом $k = U_m/U_0$, где U_m – амплитуда сети; R_{dson} – сопротивление канала при $T_j = 25^\circ\text{C}$; U_0 – выходное напряжение корректора; φ – текущий угол ωt , где ω – круговая частота сети 50 Гц.

Подставляя в (1) выражения (2) и (3), получим для мгновенной мощности потерь $P_{\text{стат}}(t)$ на полупериоде сетевого напряжения:

$$P_{\text{стат}}(t) = I_{\text{max}}^2 R_{\text{dson}} \sin^2 \varphi (1 - k \sin \varphi). \quad (4)$$

Величина мощности, рассеиваемой во включенном состоянии, равна среднему интегралу от $P_{\text{к}}(t)$ по пе-

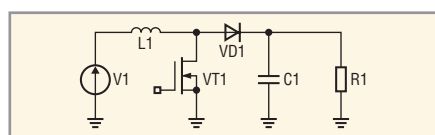


Рис. 1. Схема корректора коэффициента мощности

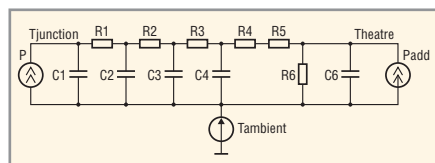


Рис. 2. Тепловая модель транзистора ККМ

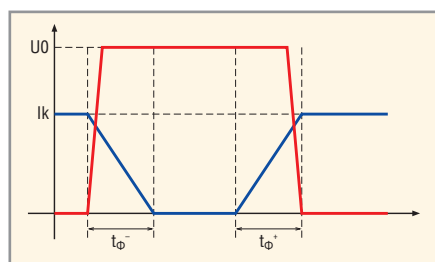


Рис. 3. Переключение транзистора

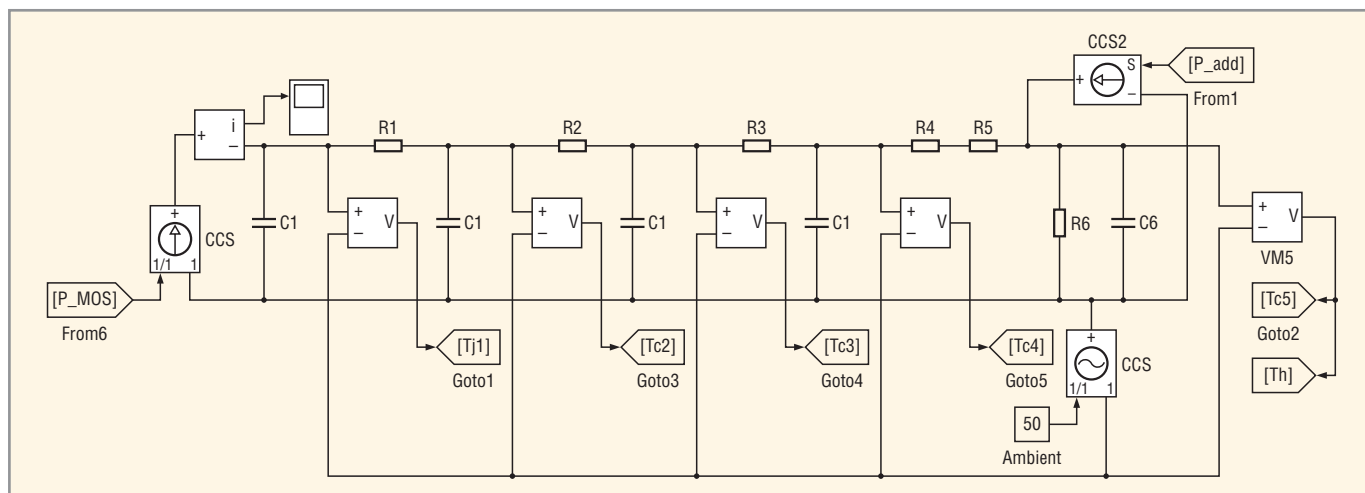


Рис. 4. Тепловая модель ключа корректора в среде Matlab

риоду (полупериоду) сетевого напряжения:

$$P_{\text{стат}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} P(\varphi) d\varphi = \frac{I_{\text{max}}^2 R_{\text{дson}}}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - k \times \frac{4}{3} \right). \quad (5)$$

Коммутационные потери (на фронтах) могут быть оценены следующим образом. На рисунке 3 представлены диаграммы тока и напряжения на корректорном ключе. Поскольку формирование фронтов тока происходит при полном выходном напряжении на ключе и линейном фронте тока, средняя мощность рассеяния на ключе на фронте составит:

$$P_{\Phi} = \frac{I_{\text{к}} U_0}{2}.$$

Средняя мощность рассеяния на любом коммутационном интервале (с учётом двух фронтов) описывается выражением:

$$P_{\text{к}} = \frac{I_{\text{кmax}} U_0 t_{\Phi}}{T_{\text{к}}} \sin(\varphi). \quad (6)$$

Средняя мощность коммутационных потерь за период сетевого напряжения:

$$P_{\text{к}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} P_{\text{к}}(\varphi) d\varphi = \frac{2 I_{\text{кmax}} U_0 t_{\Phi}}{T_{\text{к}} \pi}. \quad (7)$$

Потери в диоде на периоде сетевого напряжения можно оценить по формуле:

$$P_{\text{диода}} = \frac{I_{\text{max}} k U_{\text{ак}}}{2}, \quad (8)$$

где I_{max} – амплитуда потребляемого тока при минимальном напряжении сети $U_{\text{с}} = 175 \text{ В}$, $k = (175\sqrt{2})/420$, $U_{\text{ак}}$ – напряжение на проводящем диоде

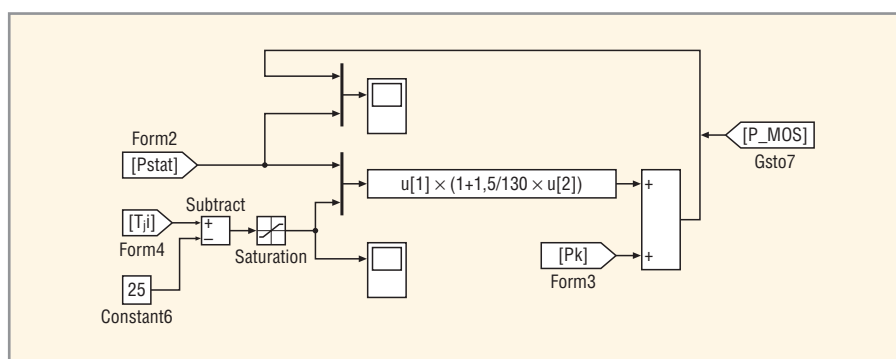


Рис. 5. Модель температурной зависимости потерь

(1,7...2,1 В для диода типа SDT06S60 при $I_{\text{f}} = 6 \text{ А}$ и $T_{\text{j}} = 150^{\circ}\text{C}$).

С учётом термозависимости $P_{\text{стат}}(T)$, мощность рассеяния представляется суммой:

$$P = P_{\text{стат}}(t) + P_{\text{к}}(t). \quad (9)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB

На рисунке 4 представлена функциональная схема решения задачи анализа в среде MatLAB. Мощность потерь в транзисторе корректора имитируется управляемым источником тока CCS1. Источник тока CCS1 управляется сигналом P_MOS, эквивалентным греющей мощности в транзисторе. Теплоотвод имитирует цепь R6C6. Температура окружающей среды представлена управляемым источником напряжения Ambient. Потери на выпрямительном мосте и диоде представлены управляемым источником тока CCS2, подключенным непосредственно к теплоотводу. Блоки VM1-VM5 позволяют контролировать тепловой режим в различных точках модели.

На рисунке 5 представлена упрощённая модель, имитирующая темпе-

ратурную зависимость потерь проводимости на транзисторе корректора. В данной модели мощности статических и динамических потерь представлены $P_{\text{к}}(t)$ и $P_{\text{стат}}(t)$. В модели для расчёта температуры кристалла вместо этих источников подключается управляемый генератор, выдающий последовательности импульсов греющей мощности в соответствии с исследуемым режимом работы схемы. Температурная зависимость реализована аппроксимирующим выражением, учитывающим превышение мгновенной температуры кристалла уровня 25°C .

Таблица 1. Параметры тепловой модели для силового транзистора IRFP460

R1, Ом	$1,49 \times 10^{-2}$
C1, Ф	$1,58 \times 10^{-3}$
R2, Ом	$1,31 \times 10^{-1}$
C2, Ф	$1,5 \times 10^{-2}$
R3, Ом	$1,5 \times 10^{-1}$
C3, Ф	$1,09 \times 10^{-1}$
R4, Ом	$1,48 \times 10^{-1}$
C4, Ф	$2,03 \times 10^{-1}$
R5, Ом	2

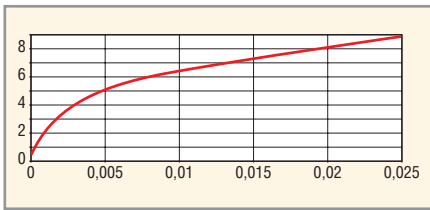


Рис. 6. Зависимость температуры кристалла от импульсов греющей мощности разной формы, но одинаковой энергии

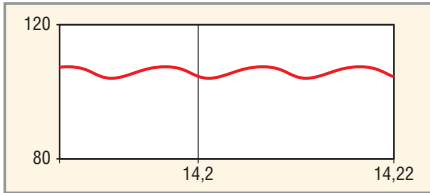


Рис. 8. Температура кристалла при греющей мощности синусоидальной формы

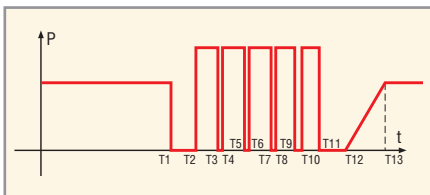


Рис. 9. Диаграмма работы корректора

Для моделирования тепловых режимов необходимо иметь импульсы требуемого вида. Система MATLAB предлагает широкий выбор средств для их получения, но чем сложнее вид импульса мощности, тем дольше идёт расчёт. Инерционность тепловой модели позволяет усреднять импульсы мощности за период коммутации. Справедливость этого допущения проверена на модели. На рисунке 6 представлена зависимость температуры кристалла от импульсов греющей мощности различной фор-

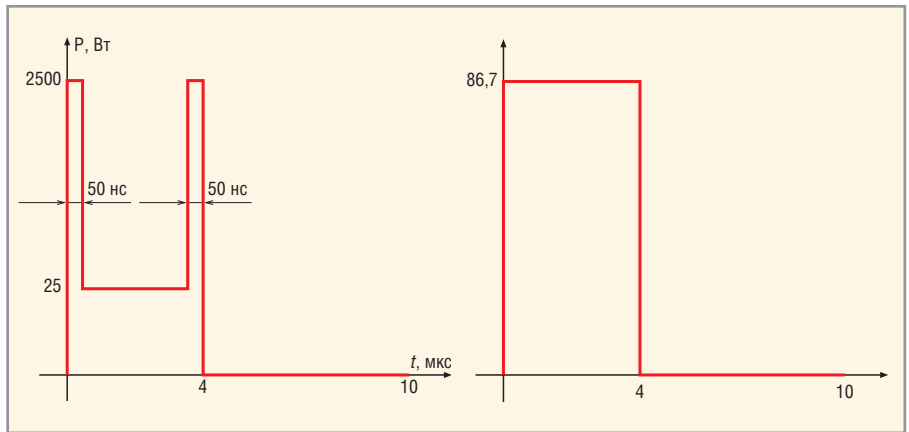


Рис. 7. Различные формы импульса греющей мощности

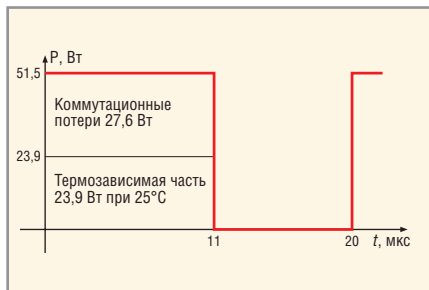


Рис. 10. Форма импульсов мощности на ключе на интервале T2 – T11

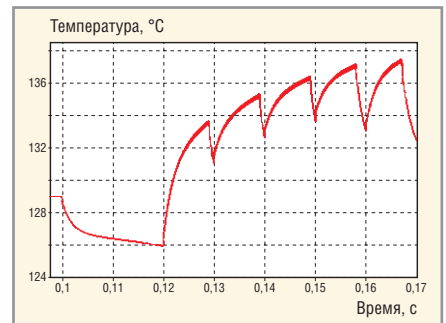


Рис. 11. Температура кристалла транзистора

мы (рисунок 7) при равенстве их площадей (энергий). Интервалы 50 нс (рис. 7а) моделируют коммутационные потери на фронтах. Различия в характере изменения температуры для обоих случаев практически отсутствуют.

Мощность на транзисторе в ККМ изменяется также и внутри периода сетевого напряжения в соответствии с выражениями (4), (6) и (9). Расчёт на модели показывает (рис. 8), что пульсации температуры с частотой 100 Гц на фоне установившегося зна-

чения составляют примерно 1,5%. Это означает, что установившийся температурный режим ключа в схеме ККМ может быть рассчитан по величине средней мощности рассеяния за период сетевого напряжения.

Представляет интерес оценка теплового режима в нештатных ситуациях. Ниже с помощью тепловой модели рассматривается режим, в который попадает ключ корректора при кратковременном пропадании сетевого напряжения (на один-два полупериода).

За это время защита от пропадания сети не успевает сработать, и при появлении напряжения ток через ключ определяется только схемой ограничения, т.к. напряжение на выходном конденсаторе корректора ниже стабилизируемого уровня. Количество полупериодов сети, за которое выходной конденсатор восстанавливает свой заряд, зависит от конкретной схемы ККМ, его мощности, номинала конденсатора и т.п.

Схематично диаграмма работы корректора мощностью 1 кВт в этом режиме показана на рисунке 9. Длительности временных интервалов приведены в таблице 2.

Мощность потерь в транзисторе ключа на интервале до провала напряжения в сети определялась по

Таблица 2. Длительности временных интервалов

Интервал	Длительность, мс	Описание
0 – T1		Нормальный режим работы
T1 – T2	20	Пауза
T2 – T3	9	Импульсы тока 30 А
T3 – T4	1	Пауза
T4 – T5	9	Импульсы тока 30 А
T5 – T6	1	Пауза
T6 – T7	9	Импульсы тока 30 А
T7 – T8	1	Пауза
T8 – T9	8	Импульсы тока 30 А
T9 – T10	2	Пауза
T10 – T11	7	Импульсы тока 30 А
T11 – T12	13	Пауза
T12 – T13	15	Перезапуск
T13		Нормальный режим работы

Таблица 3. Тепловые сопротивления прокладок фирмы Laird Technologies

Тип прокладки	R_T для TO220, °C/Вт	R_T для TO247, °C/Вт
K177	2,82	1,59
T-gard 20	4,39	2,48
K52-1	0,94	0,53
K52-2	1,55	0,87
K52-3	2,23	1,26
T-gard 3000	3,71	2,09
T-guard 500	4,08	2,30
T-guard 5000	3,66	2,06

формулам (5) и (7), потери в диоде – по формуле (8); начальная температура для расчёта $P_{стат}$ принята равной 25°C.

На этапах T2 – T11 (см. рис. 10) мощность потерь определялась по осциллограммам. Измеренное время коммутации ключа $t_{ф}$ составило 30 нс. Полученный при расчёте график температуры кристалла приведён на рисунке 11.

Максимальная температура кристалла составила 137°C в момент T11. Очевидно, что данный режим не приведёт к отказу ключа из-за перегрева. В противном случае пришлось бы уменьшать уставку схемы ограничения тока.

Изолирующие прокладки

Установка силовых полупроводниковых приборов на общий теплоотвод через изолирующую прокладку – известный и широко применяемый конструкторский приём. Тепловое сопротивление R_T этой прокладки в ряде случаев является определяющим в установлении теплового режима транзистора или диода. В таблице 3 приведены значения тепловых сопротивлений прокладок из различных материалов фирмы Laird Technologies, согласованных с размерами корпусов TO220 и TO247 при усилии сжатия 10 ф/кв. дюйм (69 кПа). Следует отметить, что уменьшение R_T со-

провождается повышением стоимости прокладки, что следует учитывать при массовом производстве.

Выводы

- Тепловой режим полупроводниковых приборов может быть достаточно просто оценен с помощью тепловой модели, параметры которой определяются из характеристики переходного теплового сопротивления;
- При расчёте установившегося теплового режима ключа КKM импульсы греющей мощности могут быть заменены источником средней мощности по периоду сети;
- Тепловое моделирование позволяет определить перегрев кристалла в нештатных режимах работы схемы по осциллограммам тока и напряжения на ключе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ануфриев И. MATLAB 7.0 Наиболее полное руководство. БХВ-Петербург, 2005.
2. Llew Edmunds, International Rectifier AN-1057: Heatsink Characteristics. <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1057.pdf>.



Микросхемы для счётчиков электроэнергии:

Точность измерения, простота использования



Основные достоинства

- Высокая точность и стабильность
- Минимум внешних компонентов
- Низкая цена конечного устройства
- Простота калибровки
- Большое количество контролируемых параметров
- Расширенный диапазон температур -40...+85 °C

Наименование	Каналов	Линейность в диапазоне 1000:1	Импульсные выходы	Последовательный интерфейс	Текущий I и V	Активная мощность	iRMS, VRMS	Полная мощность	Реактивная мощность	Температ. датчик	Корпус
CS5451A	6	—	—	+	+	—	—	—	—	—	28 SSOP
CS5460A	2	0,1% от значения	+	+	+	+	+	—	—	—	24 SSOP
CS5461A	2	0,1% от значения	+	+	+	+	+	+	—	+	24 SSOP
CS5462	2	0,1% от значения	+	—	—	+	—	—	—	—	24 SSOP
CS5463	2	0,1% от значения	+	+	+	+	+	+	+	+	24 SSOP
CS5466	2	0,1% от значения	+	—	—	+	—	—	—	—	24 SSOP

Официальный партнёр компании Cirrus Logic на территории России



ПРОСОФТ — АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (495) 232-2522 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.prochip.ru