

Трассировка силовых цепей на печатных платах FR4: рекомендации и ограничения

Александра ЛЕЗЕ (Alexandra LESE)
У. ШОЙЕРМАН
(U. SCHEUERMANN)
Перевод: Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Введение

Мощность компактных преобразовательных устройств, использующих печатные платы для промежуточных соединений и подводки силовых цепей, непрерывно растет. В качестве примера на рис. 1 показана сборка миниатюрного интеллектуального силового модуля MiniSKiiP, широко используемая в промышленных приводах мощностью до 20 кВт.

Протекание токов по проводникам печатной платы приводит к возникновению активных потерь мощности и перегреву. Величина активного сопротивления токонесущей трассы зависит от свойств материала проводника (меди), длины и площади поперечного сечения. Геометрическая форма трассы влияет на распределение тепла и эффективность его передачи на саму печатную плату и в окружающую среду.

Топология разводки платы, на которой размещены мощные элементы, чрезвычайно важна для обеспечения надежности работы

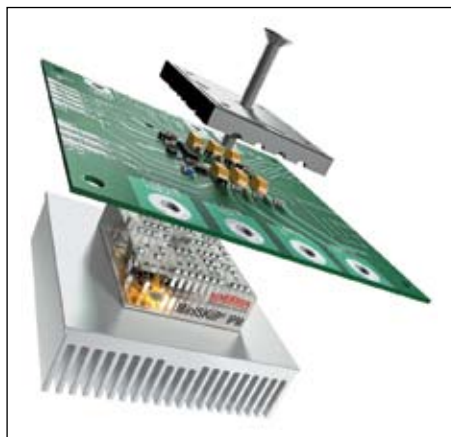


Рис. 1. Сборка миниатюрного интеллектуального силового модуля MiniSKiiP

В компактных конвертерах малой и средней мощности разводка цепей питания и выходов, как правило, осуществляется по печатной плате (PCB). При полной нагрузке токи печатных проводников могут достигать значения 50 А и более. В статье приводятся результаты исследования токонесущей способности плат широко распространенного типа FR4. Анализируются существующие правила нормирования размеров трасс для мощных применений, приводится их сравнение с экспериментальными результатами тестов, обсуждается влияние геометрии трассировки и толщины слоя меди.

системы. Существующие правила нормирования размеров проводников PCB основаны на анализе зависимости температуры медной трассы по ее сечению от протекающего тока. В различных источниках [1–3] приводятся методики расчета, основанные на данной зависимости и определяющие перегрев меди относительно окружающей среды. Базы данных для подобных вычислений получены с помощью двух независимых моделей, описанных в [4].

На рис. 2 приведены два варианта топологии печатных плат и диаграммы, демонстрирующие измеренные и расчетные значения температуры как функции тока. Как видно на графиках, оценочные величины, полученные с помощью базовых моделей (модель 1,

модель 2), не дают точного отображения температуры соответствующей структуры PCB. Причиной малой достоверности является высокая степень упрощения, присущая данным моделям. В них не учтены такие важные факторы, как характеристики системы охлаждения, свойства окружающей среды, структура ламината и эффект взаимного теплового влияния. Открытым также остается вопрос о допустимости использования стандартных методик для токов выше 35 А, поскольку все опубликованные данные относятся к меньшим значениям [5, 6]. Именно поэтому исследование тепловых режимов печатных плат при работе на больших токах является актуальным и рассматривается в данной статье.

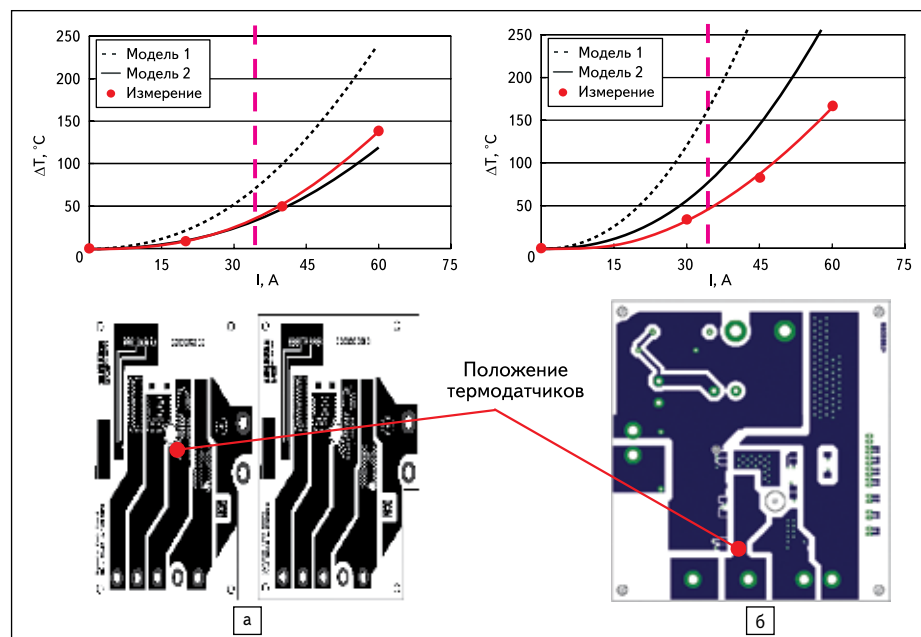


Рис. 2. Расчетные и измеренные значения температуры перегрева для двух топологий печатных плат

Дизайн тестовой платы и измерения

Для проведения испытаний было разработано несколько тестовых плат с различной топологией. С помощью РСВ, структура трасс которой показана на рис. 3, исследовалось влияние дополнительных медных слоев (А–D), ширины дорожек (Е и D) и геометрии токового пути (Е–D).

Плата была изготовлена в двух версиях с толщиной слоя меди 70 и 105 мкм. Положение термодатчиков, установленных с по-

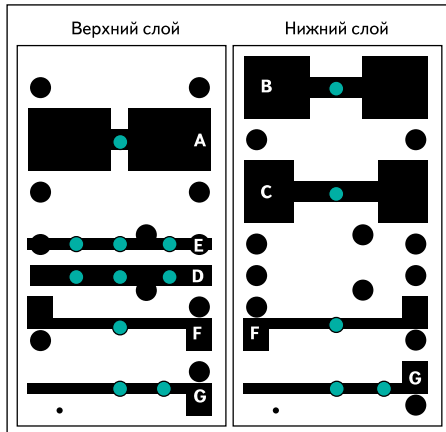


Рис. 3. Тестовая плата для исследования влияния топологии трассировки и положения термодатчика

мощью пайки, показано в правой части рис. 4. В ходе испытаний проводилась запись стационарного значения температуры в установившемся состоянии для заданного тока и исследовалось время отклика системы при изменении нагрузки. Мониторинг температуры осуществлялся на дорожках, проводящих ток, и соседних с ними, а также в окружающем пространстве внутри тестовой камеры; контролировался ток и напряжение между дорожками. В ходе измерений ток увеличивался с шагом 10 А (максимум 80 А) до наступления критического перегрева меди (125 °С).

Анализ установившегося состояния

Влияние сечения проводника

Трассы Е и D имеют постоянную ширину (соответственно, 5 и 10 мм). Различные комбинации ширины и толщины слоев дают следующие значения поперечного сечения: 0,35, 0,525, 0,7 и 1,05 мм². Значения температуры перегрева дорожек приведены на рис. 5: трасса с наименьшим сечением не способна пропускать ток более 40 А, но при увеличении площади сечения в 3 раза максимальная токовая нагрузка возрастает до 80 А при том же значении температуры.

В соответствии с рекомендациями производителей печатных плат [7] предельная

рабочая температура ламината FR4 не должна превышать 125 °С. Диаграммы на рис. 5 позволяют определить максимальную токовую нагрузку рассматриваемых типов трасс, удовлетворяющую этому условию. Горизонтальная линия на уровне 125 °С ограничивает значения предельных токов на уровне 30, 40, 48 и 62 А соответственно.

Влияние геометрии токового пути

В ходе испытаний исследовалась взаимная связь дорожек, расположенных на разных слоях РСВ. Как видно на рис. 3, трасса Е размещается на верхнем крае платы, а топология F включает оба слоя, однако ток пропускается только по верхней трассе. Структура G состоит из дорожек на обеих сторонах РСВ, соединенных между собой переходным отверстием на конце, что дает возможность исследовать тепловой режим платы при протекании тока по последовательному соединению проводников.

В ходе данного вида испытаний изучались трассы, имеющие толщину 70 и 105 мкм и одинаковую ширину, таким образом, поперечное сечение составляло 0,35 и 0,525 мм² соответственно.

На рис. 6 и 7 показана зависимость измеренной температуры от тока нагрузки для различных вариантов токовых трасс. Судя по графикам, влияние геометрии проводников идентично для обеих плат: темпе-

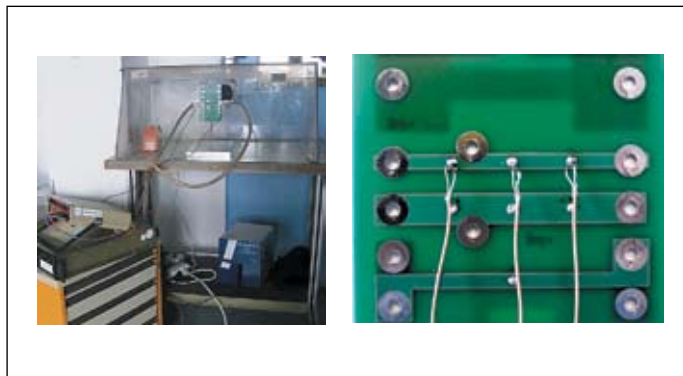


Рис. 4. Измерительный стенд: общий вид, тестируемая плата

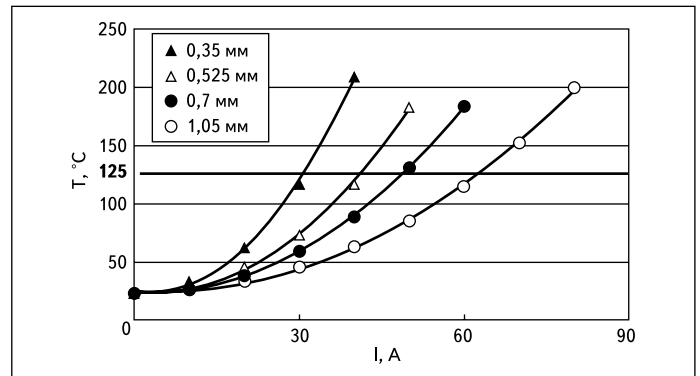


Рис. 5. Влияние площади сечения меди на токонесущую способность

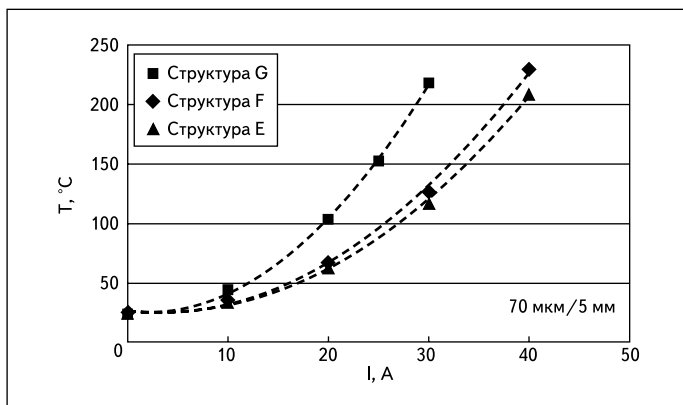


Рис. 6. Влияние геометрии дорожки на перегрев при одинаковой площади сечения (РСВ 70 мкм)

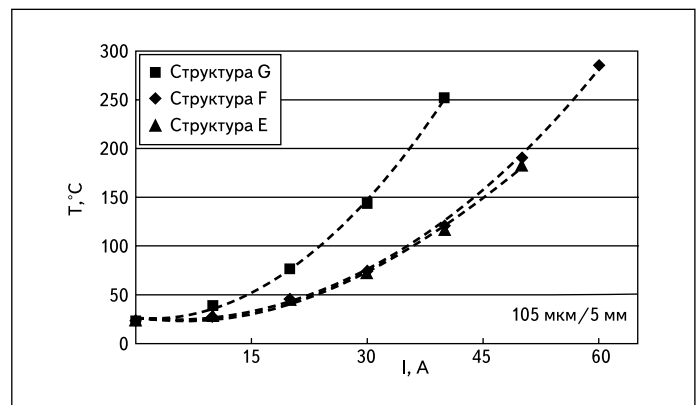


Рис. 7. Влияние геометрии дорожки на перегрев при одинаковой площади сечения (РСВ 105 мкм)

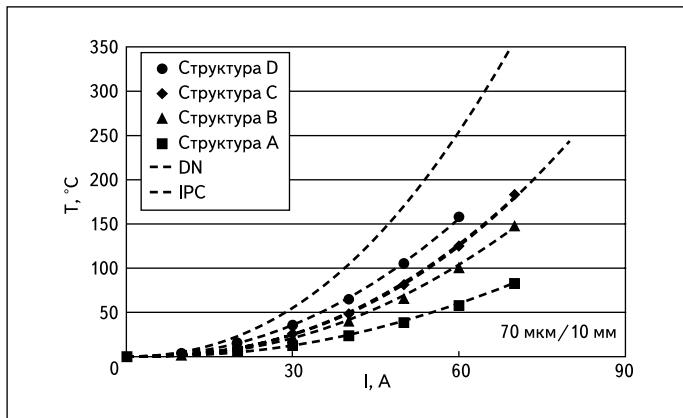


Рис. 8. Оценка зависимости температуры перегрева от тока для различных видов медных трасс с одинаковым поперечным сечением

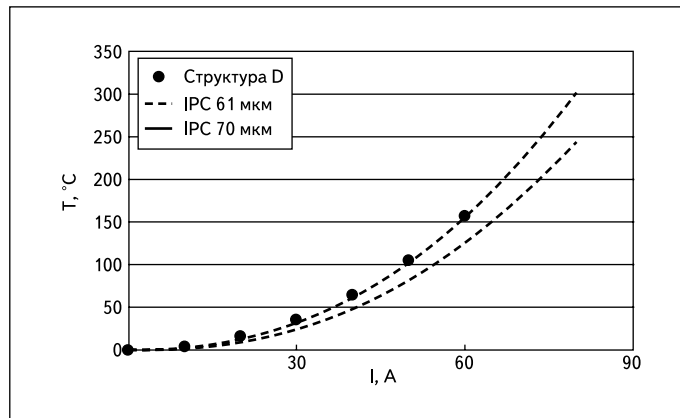


Рис. 9. Измеренные значения температуры при увеличении тока для номинальной и реальной толщины слоя меди

ратура каждой структуры для РСВ 70 мкм при заданном токе выше, чем для РСВ 105 мкм из-за меньшей площади сечения.

Сравнение результатов на рис. 6 и 7 для структур E–G показывает, что наименьшей токонесущей способностью обладает трасса G, проводящая ток на обоих слоях и имеющая, соответственно, в 2 раза больше омическое сопротивление, чем E и F. Температура односторонней дорожки E при максимальном токе нагрузки оказывается несколько меньше, чем у двусторонней F. Очевидно, что «пассивный» медный слой структуры F практически не влияет на тепловое равновесие токонесущего слоя. С точки зрения уровня генерируемых потерь тепловые режимы трасс E и F оказываются практически идентичными, так как одинаковы их активные сопротивления и пропускаемые токи.

Влияние площади сечения меди

В данной главе делается попытка приближения к реальным параметрам РСВ, трассировка которых, как правило, выполняется без учета всех тепловых режимов. В частности, здесь проводится сравнение дорожек с одинаковым сечением в точке измерения температуры, но находящихся под влиянием близко расположенных трасс с различной площадью сечения меди.

При переходе от структуры A к C сечение дорожки уменьшается, для трассы D оно минимально. Эпюры на рис. 8 демонстрируют перегрев проводников платы 70 мкм в зависимости от тока нагрузки для этих четырех случаев. Как показывают графики, увеличение площади сечения дорожки позволяет существенно снизить температуру перегрева, и с ростом тока этот эффект становится еще более выраженным.

Оценка действующих правил трассировки

Для правильного выбора сечения трассы, обеспечивающего достаточную токонесущую способность, необходимо средство расчета,

позволяющее определять температуру перегрева дорожки в зависимости от ее сечения и тока нагрузки. Наиболее корректным путем нахождения этого соотношения является использование термодинамической модели, описываемой следующим образом:

$$I = k \times \Delta T^x \times A^y,$$

где I — ток нагрузки, А; ΔT — градиент температуры, °C; A — сечение трассы, мм²; k , x , y — специфические константы.

Таблица. Константы для вычислений

Модель	k	x	y
IPC	100,75	0,43	0,68
DN	62,00	0,45	0,69

Коэффициенты k , x , y определяются экспериментально; два набора констант, полученных в результате измерений (DN и IPC [4]), приведены в таблице. Расчет температуры перегрева меди относительно окружающей среды производится на основе значения тока и площади сечения трассы. В качестве определяющего фактора используется наименьшее значение ширины дорожки. Оценка качества модели была проведена с помощью обоих наборов коэффициентов для структуры D с толщиной слоя меди 70 мкм при ширине дорожки 10 мм.

На рис. 8 показана зависимость температуры перегрева от тока для трасс A и D с использованием моделей DN и IPC. Приведенные данные нормализованы по отношению к температуре окружающей среды. Модель DN дает преувеличенные значения температуры для всех трасс, модель IPC позволяет получить хорошее приближение для структуры C и преувеличенное — для A и B. Температура дорожек для обоих значений толщины слоев с одинаковой шириной при использовании модели IPC оказывается заниженной (кривая D на рис. 8).

Полученные результаты позволяют объяснить разницу между измеренными и рас-

четными значениями на рис. 2. Трасса на тестовой плате (рис. 2а) имеет постоянную ширину, а модель 2 (соответствующая IPC) дает заниженное значение. Температура в примере на рис. 2б измеряется в самой узкой зоне трассы, где модель IPC дает завышенное значение.

При оценке абсолютных значений, получаемых с помощью описанных моделей, необходимо учитывать реальную толщину слоя меди. Стандартные правила проектирования позволяют выбрать размер проводника и рассчитать температуру перегрева для номинального значения толщины слоя меди. Действительная же величина с учетом производственных допусков может оказаться существенно меньше.

Измерения показали, что при номинальном значении 70 мкм действительное среднее значение толщины слоя меди на верхнем слое платы составляет 61 мкм. На рис. 9 приведена зависимость температуры перегрева от тока для структуры D в сравнении с расчетными значениями на базе модели IPC при номинальной и минимальной толщине слоя. Очевидно, что результаты вычислений для второго случая (61 мкм) оказываются в области более высоких температур, чем для первого (70 мкм), при одинаковом токе.

Девиация ширины печатных трасс из-за дефектов травления не превышает 0,1%, и ей можно пренебречь.

Анализ переходных режимов

Приведенные выше рассуждения относятся к случаю установившегося теплового равновесия при протекании по трассе РСВ фиксированного постоянного тока. Однако для анализа реальных рабочих режимов большое значение имеют переходные состояния, вызванные изменением нагрузки. Поскольку уровень тока DC при испытаниях увеличивается с дискретным шагом (10 А), это дает возможность оценить тепловую постоянную времени печатной платы.

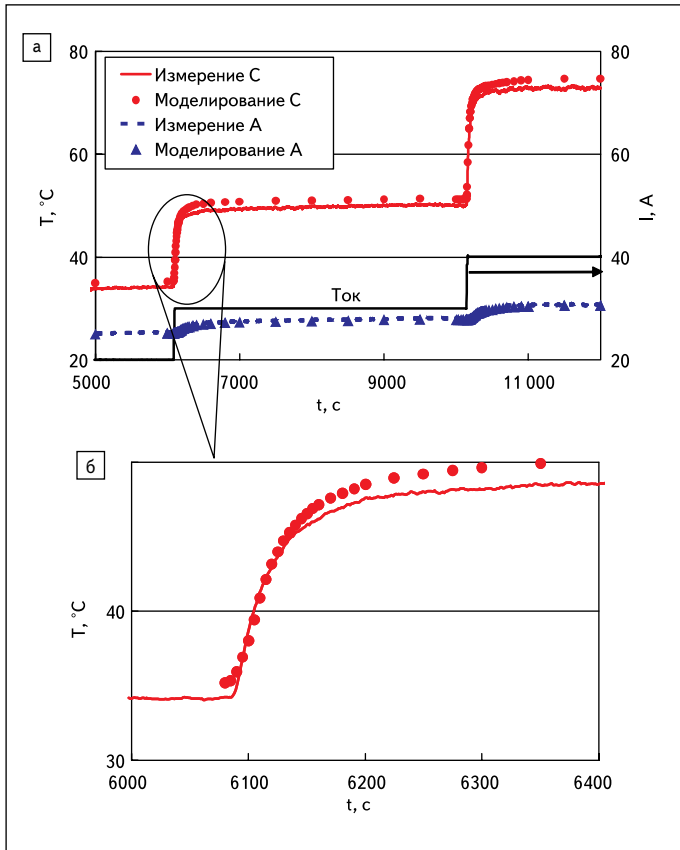


Рис. 10.
а) Измеренные и расчетные значения температуры;
б) определение тепловой постоянной времени

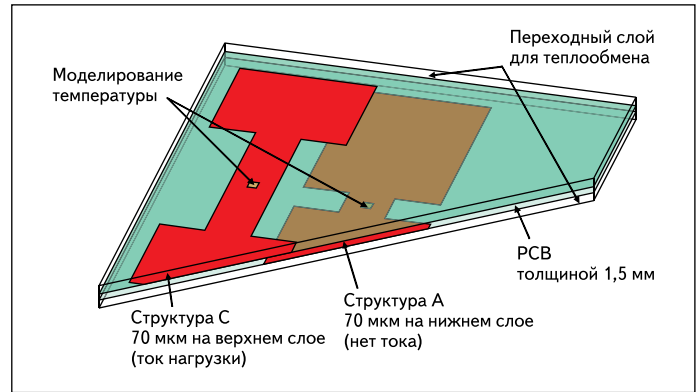


Рис. 11. Поперечное сечение моделируемой структуры

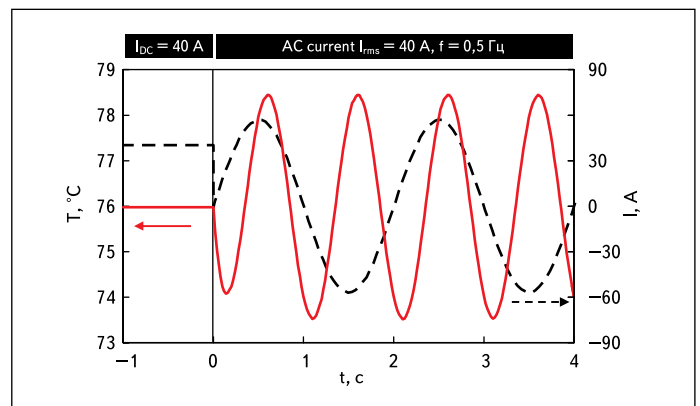


Рис. 12. Моделирование теплового режима при протекании низкочастотного переменного тока при окружающей температуре 25 °С

На рис. 10 показаны результаты изменения температуры, проведенные в центре дорожек А и С (рис. 3) на плате 70 мкм. Мониторинг температуры также проводился на ненагруженной трассе А при протекании тока по проводнику С.

Для анализа динамических тепловых режимов была создана простая 3D-модель РСВ, представленная на рис. 11. Потери, определяемые произведением падения напряжения и тока нагрузки, рассеиваются в структуре С, имеющей постоянную ширину и известное сечение слоя меди. Печатная плата помещается между двумя идеальными радиаторами с переходным слоем, моделирующим передачу тепла в окружающую среду. Параметры интерфейсного слоя выбирались таким образом, чтобы модель обеспечивала достоверное значение установившейся температуры при различных значениях тока нагрузки. Чтобы корректно задать тепловую связь токонесущей трассы и ненагруженной дорожки А, теплопроводность материала FR4 задана на уровне 1,5 Вт/мК. Как показано на рис. 10, созданная таким образом модель позволяет получить хорошее приближение при анализе тепловых переходных процессов.

Протестированная тепловая модель печатной платы может быть использована для исследования динамических тепловых характеристик на частотах, где медленные термодат-

чики не способны дать корректные результаты. Моделирование подтвердило, что пульсации температуры на частоте 50Гц составляют около 0,1%, и ими можно пренебречь. Как показано на рис. 12, переходные тепловые процессы на печатных дорожках наиболее ярко выражены на частотах ниже 1 Гц. При 0,5Гц амплитуда изменения температуры составляет примерно ±5% от среднего значения перегрева трассы относительно окружающей среды.

Заключение

В преобразователях малой и средней мощности силовые транзисторы и модули, как правило, размещаются на печатных платах, а высокоточные соединения цепей питания и выходов осуществляются с помощью печатных трасс. Для обеспечения надежной работы системы в этих условиях большое значение приобретает правильный выбор ширины и толщины дорожек РСВ.

Экспериментальные исследования тестовых печатных плат, созданных на стандартном материале FR4, показали, что существующие правила трассировки и методики теплового расчета могут быть использованы только для установившихся состояний при токах, не превышающих 35 А. Модель IPC [4] дает хорошие результаты только для длинных трасс с постоянной площадью сечения.

Вопреки некоторым рекомендациям размещение параллельной дорожки на обратной стороне РСВ не увеличивает токонесущую способность трассы. Значительного повышения допустимой токовой нагрузки можно добиться только за счет увеличения сечения меди в проводящих слоях, а значит, при разводке силовых трасс следует максимально использовать свободную площадь печатной платы.

Анализ динамических тепловых режимов, проведенный с помощью созданной модели РСВ, подтвердил, что колебания температуры дорожки относительно среднего значения вносят существенный вклад при частоте изменения тока ниже 1 Гц.

Литература

1. <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/9643/TraceWidth.htm>
2. <http://www.ultracadm.com/calc.htm> PCBTemp.exe
3. <http://www.pcbstandards.com>
4. Brooks D. Temperature Rise in PCB Traces // Reprinted from the Proceedings of the PCB Design Conference. West. 23–27 March, 1998.
5. http://www.pontro.com/current_cap.htm
6. IPC-2221. General Standard on Printed Board Design. Figure 6-4.
7. <http://www.ksg.de>