

ВЫБОР И ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ MagI³C

РАНЖИТ БРАМАНПАЛЛИ (RANJITH BRAMANPALLI), Würth Elektronik eiSos

В статье рассматриваются практические вопросы выбора и разработки с помощью силовых модулей MagI³C компании Würth Elektronik eiSos. В частности, описываются их основные функции, приводится пример расчета параметров схемы, анализируется топология платы, и даются основные рекомендации по реализации оптимального теплового режима.

Силовые модули MagI³C (Magnetic Integrated Intelligent IC) от компании Würth Elektronik eiSos применяются для проектирования встраиваемых импульсных источников питания с очень высокой плотностью энергии, крайне малым числом внешних компонентов и высокой электромагнитной совместимостью (ЭМС). Модули семейства VDRM (Variable Step Down Regulator Module – понижающий преобразователь с регулируемым коэффициентом) в литых корпусах состоят из управляющей схемы, силовых MOSFET, выходной катушки индуктивности и нескольких дискретных резисторов и конденсаторов, которые установлены на металлической подложке. Монтаж силовых модулей MagI³C в корпуса отвечает требованиям стандарта TO-263, отражая идею использования этих устройств в качестве линейных

регуляторов, но с намного большей эффективностью. Схема и внешний вид этих силовых модулей представлены на рисунке 1.

СТАНДАРТНЫЕ ФУНКЦИИ

У силовых модулей MagI³C имеет много общих функций с другими импульсными регуляторами. Рассмотрим эти функции по порядку.

Отключение при пониженной мощности

Если разрешающий вывод EN переходит в низкое логическое состояние, модуль отключается и начинает потреблять минимальный ток с шины V_{IN} . Вывод EN также используется для точного определения порогового значения низкого напряжения питания для защиты от защелкивания путем уста-

новки резисторного делителя между выводами V_{IN} и AGND (см. резисторы R_{ENT} и R_{ENB} на рис. 2).

Плавный пуск

Эта функция предотвращает протекание большого пускового тока с шины V_{IN} путем контроля скорости нарастания выходного напряжения включенного модуля. Чем больше емкость конденсатора на выводе плавного пуска SS, тем больше времени требуется, чтобы выходное напряжение V_{OUT} достигло заданного значения, и, следовательно, тем меньше пиковый пусковой ток.

Эмулированный режим прерывистой проводимости

Как только величина выходного тока перестает превышать 450 мА, силовые модули MagI³C отключают нижнее плечо

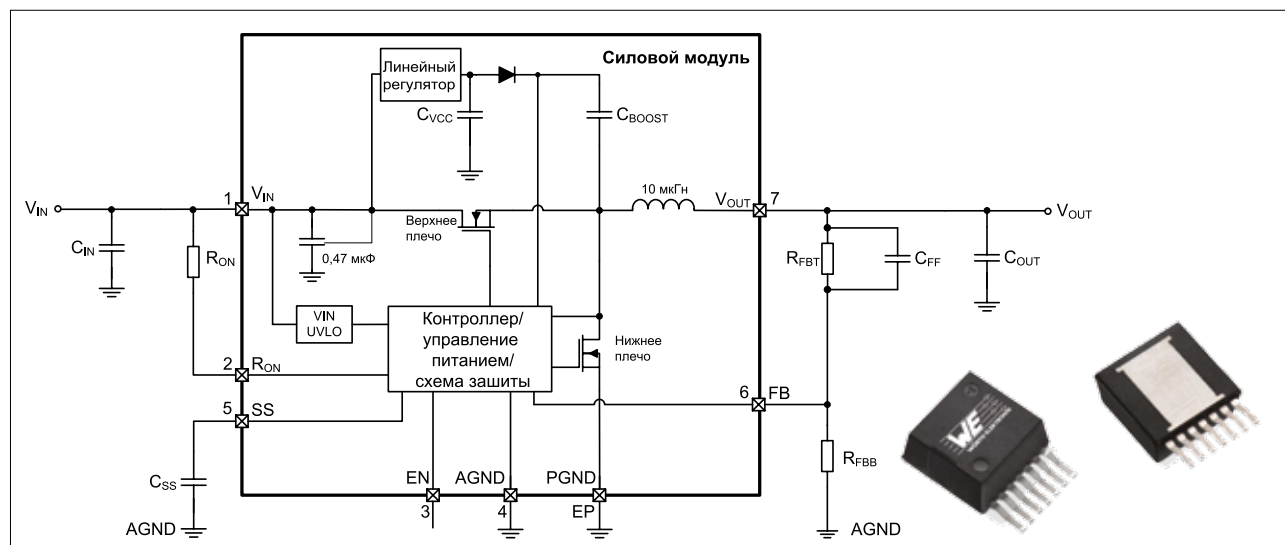


Рис. 1. Схема и внешний вид силовых модулей MagI³C семейства VDRM

и синхронный MOSFET, эмулируя функцию диода, что предотвращает протекание тока с вывода V_{OUT} на землю. Благодаря этому эмулированному режиму прерывистой проводимости (DCM) на выводах модулей отсутствует втекающий ток. Главное преимущество эмулированного режима DCM проявляется при плавном пуске, когда при включении модуля на его выходе уже имеется предустановленное напряжение. Это условие часто наблюдается, когда несколько источников питания подключены к одной и той же нагрузке, например к микропроцессору или ПЛИС. Из-за паразитных диодов внутри цифрового устройства ток может течь с активного источника питания на выход отключенного источника питания, предварительно заряжая выходной конденсатор. Эмулированный режим DCM предотвращает возникновение проблем с переходными или высокими пиковыми токами благодаря предварительно смещенному напряжению питания.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИОННОГО УЗЛА

Коммутационный узел представляет собой электрическую цепь, которая соединяет два силовых ключа с индуктивным компонентом в импульсном источнике питания. Зондирование этого узла с помощью осциллографа – первый шаг для проверки работоспособности, который, однако, невозможно сделать при использовании силовых модулей Magi³C. Для тестирования коммутационной функции Magi³C применяются два следующих метода.

Измерение излучаемого электромагнитного поля

Это достаточно простой метод (см. рис. 3). Чтобы им воспользоваться, заземляющий пружинный вывод, снятый со стандартного щупа осциллографа, помещается над корпусом модуля. Зонд позволяет измерять электромагнитное поле вокруг коммутационного узла.

Измерение с помощью токового зонда

Данный метод является более инвазивным, но с его помощью можно измерить ток через катушку индуктивности. Стабильное напряжение прямоугольного сигнала на коммутационном узле свидетельствует о том, что его преобразователь работает корректно, что подтверждается и стабильной последовательностью треугольных импульсов тока через индуктивность. Для этого тестирования вывод модуля V_{OUT} очищается от припоя и приподнимается, а петля из провода устанавливается последовательно, как показано на рисунке 4.

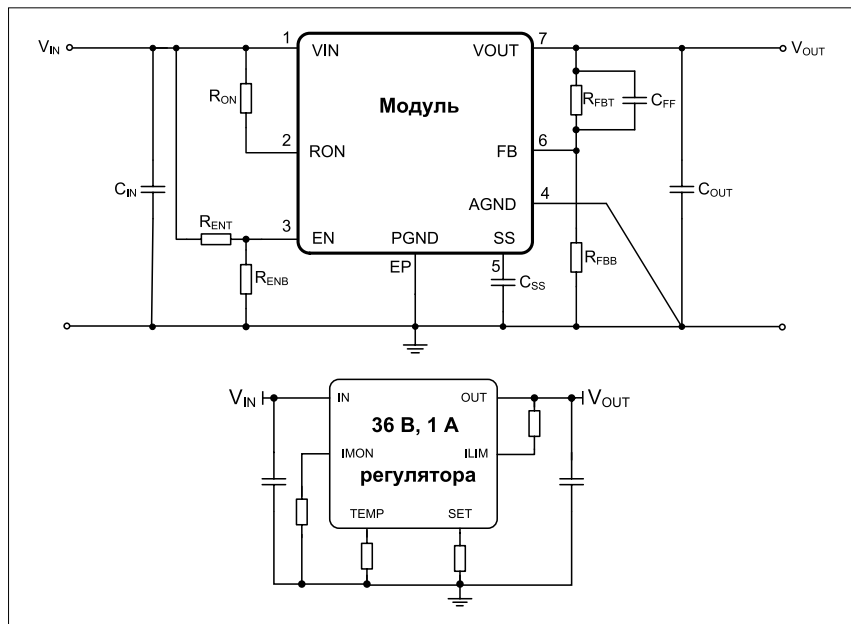


Рис. 2. Сравнение количества внешних компонентов у силового модуля Magi³C и стандартного

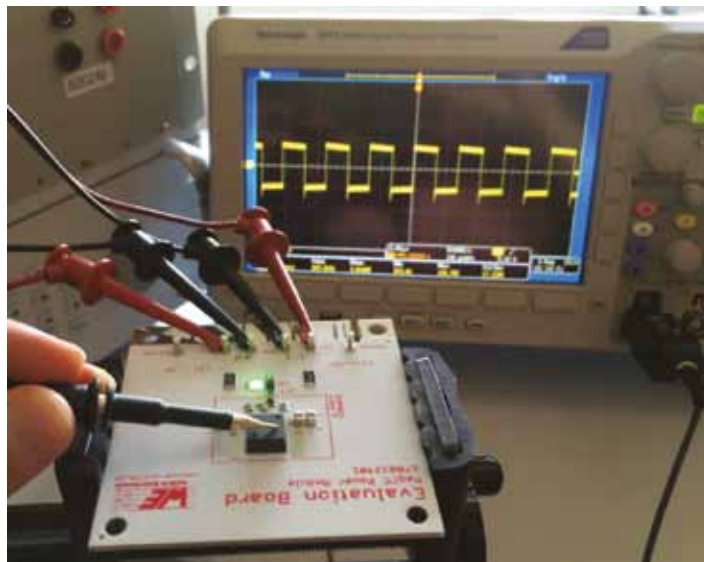


Рис. 3. Испытание коммутационного узла и измерение его электромагнитного излучения с помощью вольтметрового щупа. В измерениях использовалась оценочная плата WPMDH1302401JT EVB; $V_{IN} = 24$ В, $V_{OUT} = 12$ В, $I_{OUT} = 2$ А

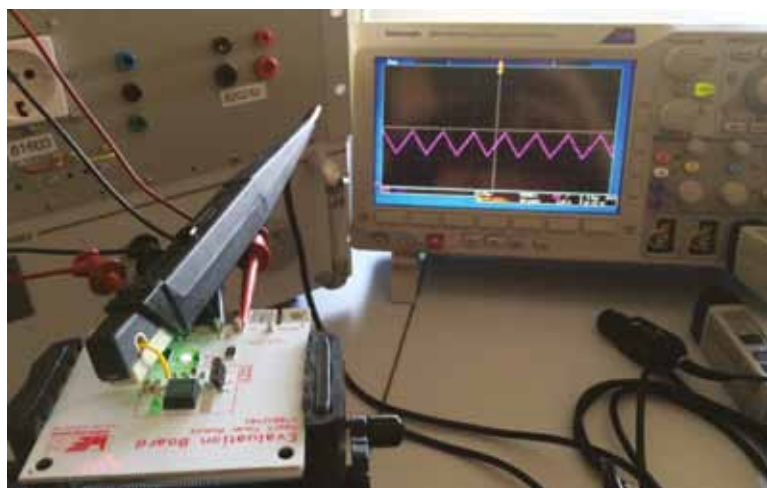


Рис. 4. Тестирование коммутационного узла с помощью токового зонда, который установлен последовательно с выходом. В измерениях использовалась оценочная плата WPMDH1302401JT EVB; $V_{IN} = 24$ В, $V_{OUT} = 12$ В, $I_{OUT} = 3$ А

ВЫБОР МОДУЛЯ Magi³C ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ

Семейства изделий

В таблице 1 представлены некоторые основные параметры силовых модулей Magi³C семейства VDRM.

Ограничение тока и отключение при перегреве

Силовые модули семейства Magi³C оснащены защитными функциями ограничения выходного пикового тока и отключения от перегрева. Пороговые значения, при которых срабатывают токоограничивающие цепи, превышают максимальные выходные токи, указанные в таблице 1. Однако необходимо учитывать, что защита от перегрева имеет более высокий приоритет, чем ограничение по току. Защита от перегрева включается при типовой температуре перехода 165°C. Перезапуск после срабатывания этой защиты осуществляется автоматически с учетом того, что стандартное значение гистерезиса составляет 15°C. На практике защитное отключение при перегреве срабатывает до ограничения пикового тока, когда устройства Magi³C работают вблизи максимального выходного напряжения и максимального выходного тока. В разделе «Рекомендации по тепло-

Таблица 1. Параметры силовых модулей Magi³C семейства VDRM в корпусе T0263

Наименование компонента семейства VDRM	Номер изделия	V _{IN} , В	V _{OUT} , В	I _{OUT} (макс.), А	f _{SW} , кГц
WPMDH1200601JT	171 020 601	6–42	0,8–6,0	2,0	200–800
WPMDM15006021JT	171 050 601	6–36	0,8–6,0	5,0	650–950
WPMDH1102401JT	171 012 401	6–42	5,0–24,0	1,0	200–800
WPMDH1152401JT	171 012 402	6–42	5,0–24,0	1,5	200–800
WPMDH1302401JT	171 032 401	6–42	5,0–24,0	3,0	200–800

вому режиму» предлагаются способы, позволяющие уменьшить тепловое сопротивление между источником тепла и окружающей средой, которые обеспечивают отдачу модулями Magi³C всей необходимой мощности без ограничения тока или защиты от перегрева.

ИЗБЕГАЙТЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ПОРОГА ПО ТОКУ

Таблица 1 упрощает корректный выбор модуля, основанный на величине выходного тока и выходного напряжения. Например, если требуется, чтобы выходное напряжение модуля равнялось 12 В при максимальном токе 1,2 А, наилучшим выбором станет устройство WPMDH1152401JT. Для выходного напряжения 3,3 В при максимальном токе 4 А разумнее остановить свой выбор на модуле WPMDM1500602JT. Возможно, у разработчиков появится искушение

задействовать модули, рассчитанные на большие токи, чтобы уменьшить рассеиваемую мощность и рост температуры, однако имеются две веские причины избежать такого выбора.

Во-первых, величина собственной катушки индуктивности тщательно подобрана таким образом, чтобы обеспечить корректные соотношения между током пульсации (пик-пик) и средним током исходя из максимального значения выходного тока. Во-вторых, выбор модуля с более высоким значением тока означает необходимость использовать MOSFET-ключи большего размера. При малом выходном токе более высокий заряд затвора и большее время коммутации перечеркивают любой выигрыш в эффективности за счет меньшей величины $R_{DS(on)}$. Баланс этих потерь определяется с помощью зависимости КПД от выходного тока в каждом техниче-

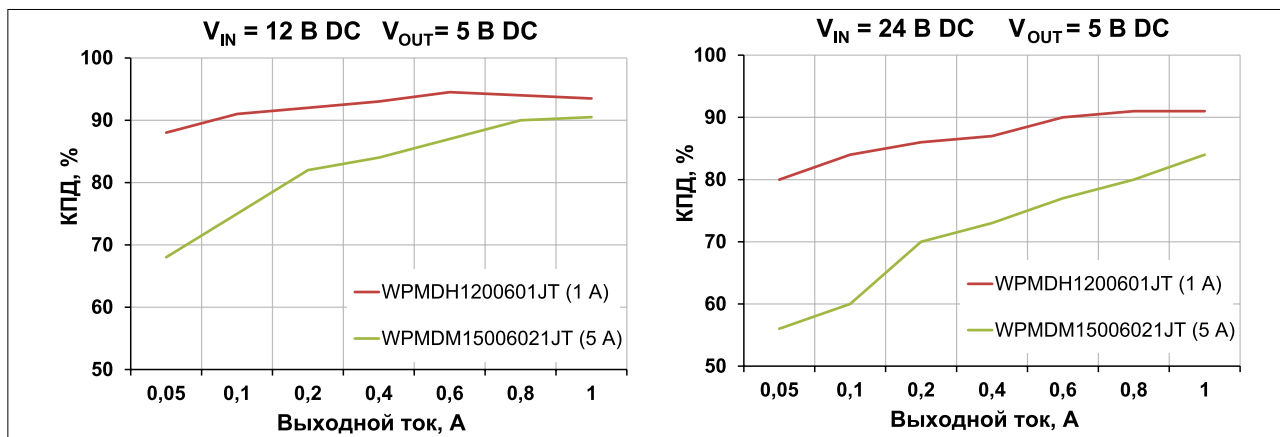


Рис. 5. Силовые модули Magi³C не позволяют повысить КПД при малом выходном токе

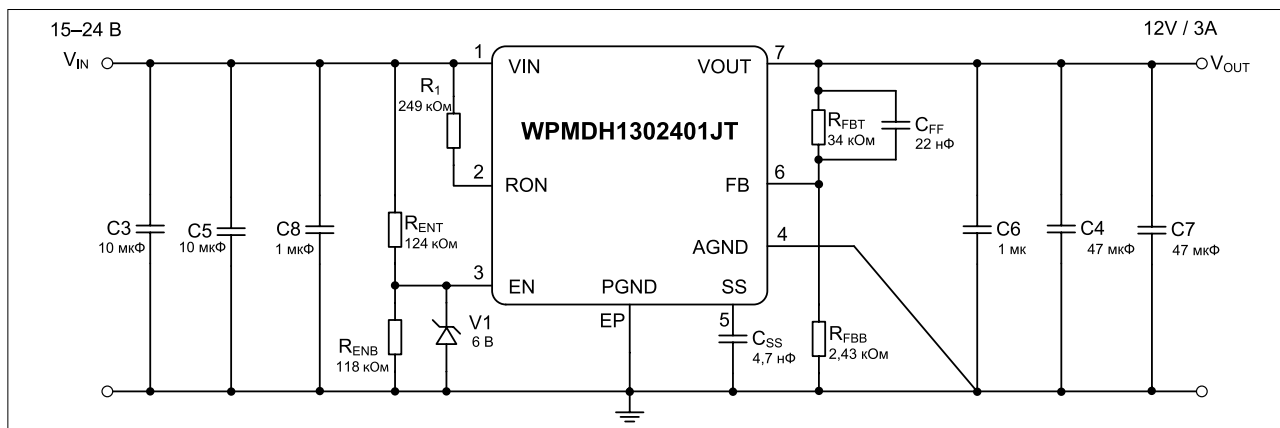


Рис. 6. Схема модуля WPMDH1302401JT из технического описания

ском описании силового модуля MagI³C (см. рис. 5). Из этих графиков следует, что пиковый КПД достигается, как правило, в средней трети каждой кривой. Таким образом, следует выбирать модуль, у которого максимальный выходной ток немного превышает наибольший выходной ток, определяемый конкретным приложением.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ

Рассматриваемый в этом разделе пример расчета основан на схеме из технического описания модуля WPMDH1302401JT (3 А, 42 В, корпус TO263) из семейства VDRM. На рисунке 6 показана схема модуля, обеспечивающая его соответствие требованиям EN55022 Class B к излучаемым ЭМП. В таблице 2 представлен перечень компонентов из технического описания модуля WPMDH1302401JT.

Коммутационная частота

Рабочая частота импульсного преобразователя – важный параметр, который следует учесть в самом начале проектирования. У преобразователей с внешними магнитными компонентами компромиссное решение определяется зависимостью КПД от физического размера и стоимости: чем выше рабочая частота, тем меньше размеры и стоимость, но меньше и КПД. Чем ниже рабочая частота, тем больше размеры, стоимость и КПД. Поскольку у модулей со встроенными магнитными компонентами величина индуктивности и размер катушек уже выбраны, компромисс определяется несколько иначе: при фиксированном значении индуктивности уменьшение рабочей частоты повышает КПД, но при этом увеличивается размах тока пульсаций катушки индуктивности.

Увеличение тока пульсаций в катушке индуктивности приводит к росту тока пульсаций во входных и выходных конденсаторах, что повышает размах напряжения пульсаций на входе и выходе источника питания, а также увеличивает СКЗ токов во входных и выходных конденсаторах. Таким образом, величина коммутационной частоты не выбирается произвольно низкой или высокой, а является компромиссным решением. Модули MagI³C серии VDRM определяют диапазон программируемых пользователем частот в таблице электрических характеристик соответствующих технических описаний, т. к. уровень рассеиваемой мощности в значительной мере меняется в зависимости от выходного напряжения. При более высоком выходном напряжении увеличивается выходная мощность, и, следовательно, возрастает рассеиваемая модулем мощность. Чем выше расчетная величина

Таблица 2. Перечень компонентов из технического описания модуля WPMDH1302401JT

Исходный проект	Описание	Размер корпуса	Компонент
WPMDH1302401JT	силовой модуль MagI ³ C	TO263-7EP	силовой модуль MagI ³ C
V1	6,0 В, 1 мА	SOD-323	стабилитрон
C6, C8	1 мкФ, 50 В, X7R, ±10%	1206	конденсатор
C3, C5	10 мкФ, 50 В, X5R, ±20%	1210	конденсатор
C4, C7	47 мкФ, 16 В, ±20%	1210	конденсатор
C _{FF}	0,022 мкФ, X7R, 50 В,	0603	конденсатор
C _{SS}	4700 пФ, X7R, 25 В	0603	конденсатор
R _{ENV}	11,8 кОм, ±1%	0603	резистор
R _{ENT}	124 кОм, ±1%	0603	резистор
R _{FBT}	34 кОм, ±1%	0603	резистор
R _{FBB}	2,43 кОм, ±1%	0603	резистор
R _{ON}	249 кОм, ±1%	0603	резистор

этой мощности, тем ниже должна быть коммутационная частота.

Демпфирующий входной LC-фильтр

Понижающие преобразователи потребляют прерывистый ток от внутреннего источника. Даже если используются входные конденсаторы хорошего качества, с которых переменный ток подается на понижающий регулятор, источник питания неизбежно становится причиной возникновения кондуктивных электромагнитных помех во входных линиях. Чем длиннее соединительные провода, проводники печатных плат и электропроводка, с помощью которых эти DC/DC-преобразователи подключаются к входным источникам питания, тем выше вероятность, что часть кондуктивных ЭМП станет излучаемыми электромагнитными помехами,

т. к. соединительные провода ведут себя как антенна. Входной LC-фильтр, установленный рядом с DC/DC-преобразователем, позволяет снизить уровень кондуктивных ЭМП, а фильтрация шума, который создает помехи на входных соединительных проводах, уменьшает также излучаемые ЭМП.

Не у всех лабораторий имеется доступ к специализированному оборудованию, предназначенному для измерения кондуктивных помех и тестирования, не говоря уже о наличии специальных антенн и безэховых камер, которые применяются для измерения излучаемых ЭМП. Ниже мы рассмотрим методику, основанную на корреляции сигналов тока во временной области, параметры которых можно рассчитать и измерить с помощью стандартного

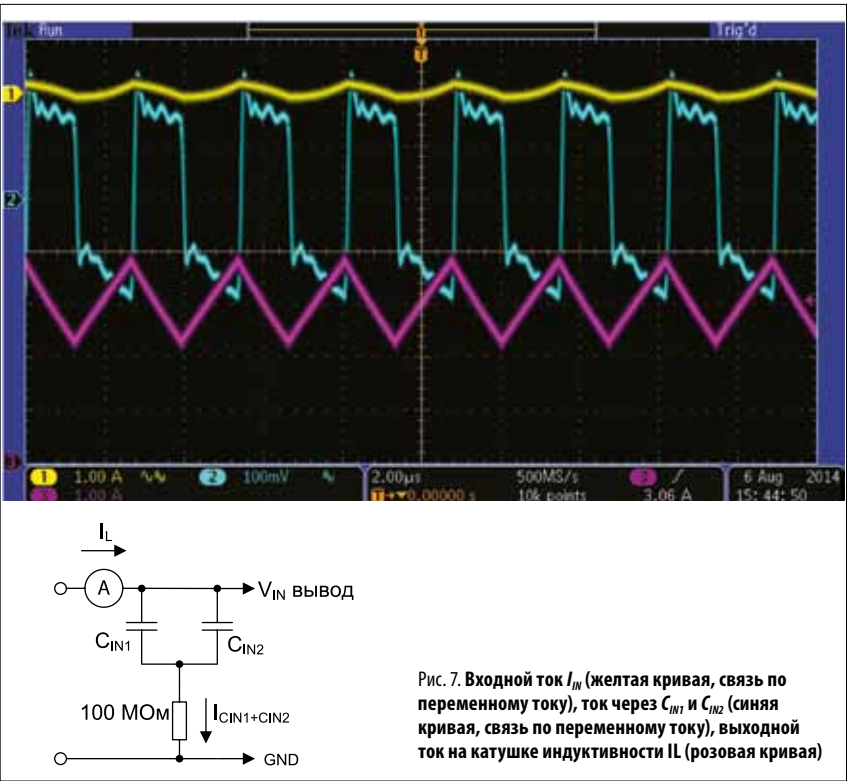


Рис. 7. Входной ток I_{IN} (желтая кривая, связь по переменному току), ток через C_{IN1} и C_{IN2} (синяя кривая, связь по переменному току), выходной ток на катушке индуктивности I_L (розовая кривая)

осциллографа на наличие дифференциального кондуктивного шума в частотной области.

Расчет амплитуды шума

Для расчета амплитуды первой гармонической составляющей дифференциального кондуктивного шума используется следующее уравнение с учетом сигнала входного тока:

$$A_{IST} = 20 \lg \left(\frac{I_{CIN-AVG} \sin(\pi D_{MAX})}{\pi^2 \cdot C_{IN} \cdot f_{SW}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 \text{ мкВ}} \right) \quad (1)$$

На рисунке 7 показан сигнал входного тока от источника питания, а также ток пульсаций через входные конденсаторы при максимальной нагрузке и минимальном входном напряжении, что является наихудшим случаем возникновения ЭМП. Ток через C_{IN1} и C_{IN2} измерялся на шунтирующем резисторе 100 мОм, которое было установлено последовательно с двумя конденсаторами. Сигнал синего цвета $I_{CIN1+CIN2}$ обусловлен индуктивностью шунтирующего резистора.

Средний входной ток, равный средней высоте оснований сигналов входного тока трапецеидальной формы (см. рис. 7), рассчитывается следующим образом:

$$I_{CIN-AVG} = \frac{I_{IN-MAX}}{D_{MAX}}; \quad (2)$$

$$I_{IN-MAX} = \frac{V_{OUT} \cdot I_{O-MAX}}{V_{IN-MAX} \cdot \eta}; \quad (3)$$

$$D_{MAX} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN-MIN}}. \quad (4)$$

Из технического описания модуля WPM1302401JT следует, что значение КПД при $V_{IN} = 15 \text{ В}$, $V_{OUT} = 12 \text{ В}$, 3 А составляет 92,5%. Исходя из этого значения, получаем, что максимальный входной ток равен 2,6 А, при этом коэффициент заполнения 12 В/15 В = 80%, а средний ток конденсатора – 3,25 А.

Прежде чем приступить к расчету напряжения шума первой гармоники A_{IST} , следует учесть одну важную характеристику многослойных керамических конденсаторов – их активные потери, обусловленные смещением по постоянному току. Компания Würth Elektronik eiSos по запросу предоставляет кривые потерь с учетом приложенного напряжения. В данном случае при напряжении 15 В DC величина емкости C8 уменьшается до 0,7 мкФ, каждое значение C3 и C5 становится равным 8,0 мкФ,

а суммарная входная мощность составляет 16,7 мкФ. С учетом этих значений уравнение (1) дает следующий результат:

$$A_{IST} = 20 \lg \cdot \left(\frac{3,25 \text{ А} \cdot \sin(\pi \cdot 0,8)}{\pi^2 \cdot 16,7 \text{ мкФ} \cdot 400 \text{ кГц}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 \text{ мкВ}} \right) = 89 \text{ дБмкВ}$$

Предельным значением среднего синфазного шума во многих стандартах для кондуктивной ЭМС, например в соответствии со стандартом EN55022, является 46 дБмкВ в диапазоне 400 кГц. Величина требуемого ослабления определяется величиной первой гармоники за вычетом предельного значения. В рассматриваемом примере величина ослабления с учетом расчетных значений составляет 89–46 = 43 дБмкВ.

Выбор индуктивности и емкости фильтра

Один из двух параметров – индуктивность или емкость входного фильтра – выбирается произвольно. Как правило, поскольку диапазон значений индуктивностей меньше, чем емкостей, чаще выбирается индуктивность из диапазона 1 мкГн...10 мГн. Такой выбор обеспечивает хорошее соотношение между размером, стоимостью и соответствующей резонансной частотой входного LC-фильтра. Номинальный ток I_L катушки индуктивности, или т. н. СКЗ номинального тока, должен быть больше максимального входного тока I_{IN-MAX} , чтобы температура катушки индуктивности оставалась в рекомендуемом диапазоне рабочих значений.

Поскольку в данном примере максимальный входной ток составляет 2,6 А, предлагается использовать катушку 744 089 430 33 серии WE-SPC 4838 от компании Würth Elektronik eiSos с индуктивностью 3,3 мкГн в малом корпусе (4,8×4,8×3,8 мм), сопротивлением по постоянному току (DCR) равным 31 мОм и номинальными токами $I_{RMS} = 2,6 \text{ А}$ и $I_{SAT} = 3,6 \text{ А}$, что вполне отвечает требованиям в рассматриваемом случае. Исходя из выбранного значения индуктивности, с помощью двух уравнений можно рассчитать необходимую емкость. Первое из них основано на использовании величины резонансной частоты фильтра, которая не должна превышать 1/10 от значения коммутационной частоты:

$$C_{F-MIN1} = \frac{C_{IN}}{C_{IN} L_F \left(\frac{2\pi f_{SW}}{10} \right)^2 - 1}; \quad (5)$$

$$C_{F-MIN1} = \frac{16,7 \text{ мкФ}}{16,7 \text{ мкФ} \cdot 3,3 \text{ мкГн} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 400 \text{ кГц}}{10} \right)^2 - 1} = 6,7 \text{ мкФ}$$

Полученное с помощью (5) значение может оказаться отрицательным. Это указывает на то, что выбранное значение катушки индуктивности не обеспечивает в 10 раз меньшую резонансную частоту фильтра по сравнению с коммутационной частотой. При необходимости значение катушки индуктивности можно увеличить, но за счет меньшего КПД или увеличения ее размеров, что обусловлено более высоким сопротивлением по постоянному току и большими потерями в сердечнике. Итак, необходимо, чтобы резонансная частота была в 10 раз меньше коммутационной, но это не жесткое требование. Уравнение (6), накладывающее строгое ограничение, позволяет рассчитать минимальную емкость, необходимую для того, чтобы пульсации напряжения на входе преобразователя были ниже предельного значения, определяемого условием ослабления шума (АТТ):

$$C_{F-MIN2} = \frac{1}{L_F} \left(\frac{10^{\frac{ATT}{40}}}{2\pi f_{SW}} \right)^2 = \frac{1}{3,3 \text{ мкГн}} \left(\frac{10^{\frac{43}{40}}}{2\pi \cdot 400 \text{ кГц}} \right)^2 = 7,0 \text{ мкФ}. \quad (6)$$

Емкость выбранного конденсатора должна превышать наибольшее из двух значений C_{F-MIN1} и C_{F-MIN2} . Наилучшим выбором являются многослойные керамические конденсаторы. Чтобы сократить перечень расходуемых компонентов, можно воспользоваться другим конденсатором, идентичным C3 и C5 (10 мкФ, 1210, 50 В, X5R, малое ESR), что определяет выбор емкости 8 мкФ при 15 В DC. Этого более чем достаточно для построения хорошего фильтра на входе.

ДЕМПФИРУЮЩИЙ ФИЛЬТР

Всякий раз при установке LC-фильтра в импульсный регулятор могут возникнуть колебания, или т. н. «звон», обусловленный выходным импедансом фильтра и входным импедансом преобразователя. Хорошо подобранные преобразователи обеспечивают высокий КПД во всем диапазоне входного напряжения. В частности, одним из результатов применения такого преобразователя является уменьшение входного тока при возрастании входного напряжения, и наоборот. Эффективный входной импеданс стано-

вится отрицательным. Если величина $|-Z_{IN}|$ меньше или равна величине Z_{OUT} LC-фильтра, во входной линии могут появиться нежелательные колебания.

Даже если на входе отсутствует катушка индуктивности, паразитную индуктивность вносят входные соединительные провода. Если на входах преобразователей применяются только многослойные керамические конденсаторы с очень малым эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), вероятностью возникновения осцилляций пренебрегать ни в коем случае нельзя. В рассматриваемом примере используется дискретная катушка с известными значениями индуктивности и DCR . Исходя из этих двух значений, можно определить величину емкости демпфирующего конденсатора C_D , который установлен параллельно C_{IN} (см. рис. 8).

Конденсатор C_D не только позволяет устранить любые осцилляции на входе, но и уменьшить напряжение пульсаций на входе, а также уменьшить амплитуду A_{IST} , АТТ и, в свою очередь, емкость C_F . Следующие два уравнения определяют минимальную емкость и минимальное ESR , необходимое для того, чтобы фильтр из L_F и C_{IN} обеспечил демпфирование:

$$C_D \geq C_{IN} \cdot 4 = 16,7 \text{ мкФ} \cdot 4 = 67 \text{ мкФ}. \quad (7)$$

Коэффициент 4 в уравнении (7) является рекомендуемым значением с учетом размера и стоимости 68-мкФ конденсатора:

$$ESR_{MIN} \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_F}{C_{IN}}} - DCR = \\ = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3,3 \text{ мкГн}}{16,7 \text{ мкФ}}} - 0,031 \text{ Ом} = 0,19 \text{ Ом}.$$

Отрицательное значение минимального ESR может указывать на то, что омическое сопротивление DCR индуктивности обеспечивает достаточное демпфирование. Как правило, в качестве C_D выбирается алюминиевый электролитический конденсатор. Компания Würth Elektronik eiSos выпускает конденсаторы нескольких размеров под поверхностный монтаж с номинальным напряжением 50 В и емкостью 68 мкФ. Более того, для демпфирования годятся и конденсаторы с высоким значением ESR . Компонент 865 060 653 009 серии WCAP-ASLL от Würth Elektronik является алюминиевым электролитическим конденсатором для поверхностного монтажа. Этот компонент емкостью 68 мкФ обеспечивает отличное демпфирование. Его импеданс составляет 0,34 Ом, максимально напряжение – 50 В. Радиус основания этого компонента составляет 8 мм, а высота – 10,5 мм.

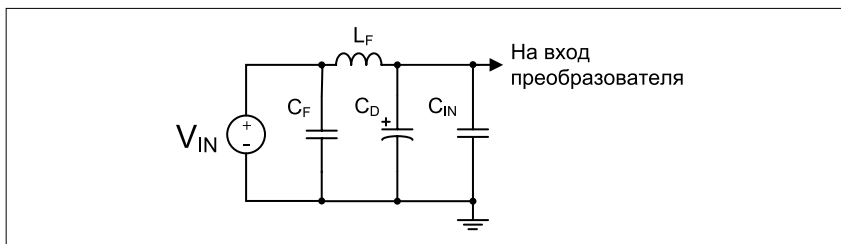


Рис. 8. LC-фильтр с демпфирующим конденсатором

ТОПОЛОГИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Определение ключевых токовых петель

Силовые модули с интегрированными MOSFET и магнитными элементами, безусловно, лучше дискретных решений, с точки зрения обеспечения ЭМП, поскольку позволяют уменьшить площадь контуров с крутыми фронтами тока (di/dt) до нескольких мм². Чем меньше площадь контура, тем меньше индуктивность. Величина шума, или наведенных ЭМП, определяется следующим образом:

$$V_{EMI} = L_{PARASITIC} \cdot \frac{di}{dt}. \quad (9)$$

Таким образом, чтобы обеспечить наилучшую ЭМС, необходимо уменьшить площадь контура и, соответственно, индуктивность. При протекании тока по импульсному регулятору образуются токовые петли, соответствующие двум частям коммутационного цикла.

На рисунке 9 показано, как протекает ток в понижающем преобразователе при включенном MOSFET (оранжевым цветом) и при включенном синхронном MOSFET (синим цветом).

К участкам с крутыми фронтами тока относятся следующие.

1. Одноцветные площади, например участки с каждым из ключей, а также площадь, охватывающая источник питания синхронного MOSFET и соединение с отрицательным выводом входного конденсатора.
2. Участки, где большой ток протекает в одном направлении в течение первой части коммутационного цикла, а затем меняет направление во второй части цикла.

Часто бывает полезным перерисовать схему, чтобы четко определить эти критические участки с большой величиной di/dt (см. рис. 10).

Зеленая площадь на рисунке 10 заслуживает особого внимания при работе над топологией печатной платы.

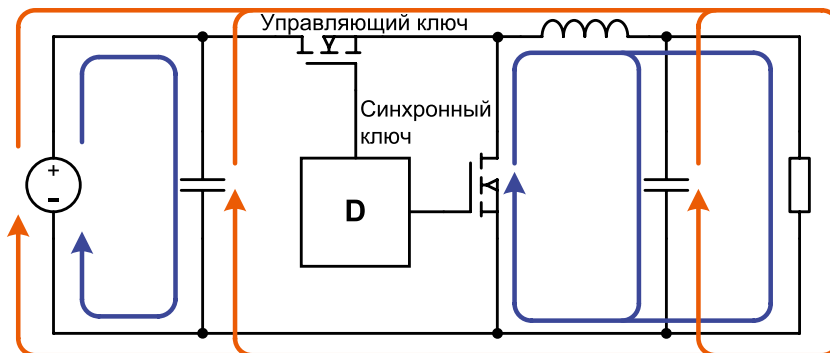


Рис. 9. Токовые петли синхронного понижающего преобразователя. Токовая петля при включенном управляющем MOSFET выделена оранжевым цветом, а при включенном синхронном MOSFET – синим

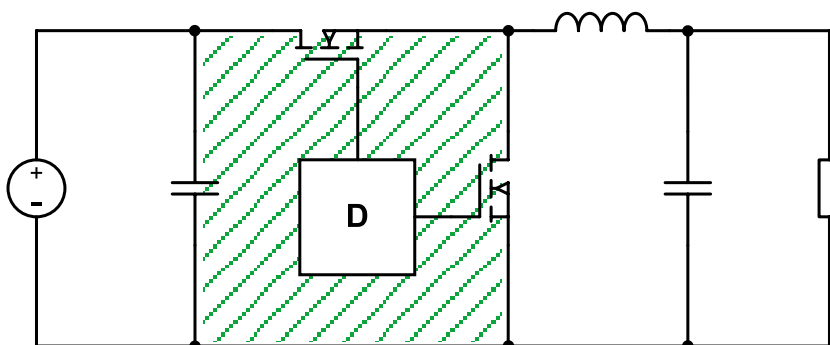


Рис. 10. Синхронный понижающий преобразователь с критическим участком, выделенным зеленым цветом

На этом рисунке также иллюстрируется способ наилучшего применения входных конденсаторов. Он состоит в непосредственном соединении истока синхронного MOSFET с отрицательным выводом входного конденсатора еще до соединения с заземлением системы. Таким образом, входной конденсатор с наименьшей величиной емкости может фильтровать любой ВЧ-шум, который генерируется при коммутации ключей. Из схемы на рисунке 1 видно, что эти два метода компоновки уже реализованы с помощью силового модуля MagI³C, поскольку многослойный керамический конденсатор емкостью 0,47 мкФ установлен на минимально возможном расстоянии от контура с управляющим

и синхронным ключами. Необходимо только установить внешние входные конденсаторы как можно ближе к выводам V_{IN} и P_{GND} или к открытой контактной площадке.

Простая раскладка контактов у модулей MagI³C позволяет свести к минимуму площадь критического участка между выходными конденсаторами и выводами V_{OUT} и P_{GND} или открытой контактной площадкой.

Монтаж компонентов

У стандартных импульсных регуляторов коммутационный узел (в котором соединяются силовые ключи и одна сторона катушки индуктивности или трансформатора) – самая критичная

часть схемы, поскольку в ней протекают быстро меняющиеся коммутационные токи при наличии паразитной индуктивности. Этот участок также имеет паразитную емкостную связь и высокое коммутационное напряжение. Коммутационные узлы в модулях MagI³C находятся внутри устройств, а расположение двух силовых ключей и катушки индуктивности полностью оптимизировано. При разработке внимание следует уделить только входным и выходным конденсаторам, которые являются внешними компонентами.

Поскольку во входной стороне понижающих регуляторов протекают коммутационные токи с высокой скоростью нарастания фронтов, в первую очередь необходимо заняться трассировкой входных конденсаторов. Чем меньше конденсатор и его емкость, тем выше частота помехи, которую фильтрует конденсатор. Следовательно, в самой малой петле с наименьшей паразитной индуктивностью следует использовать самые компактные конденсаторы с минимальной емкостью, чтобы в наилучшей мере фильтровать высокочастотный шум. На рисунке 11 показана такая петля с конденсатором С6, емкость которого составляет 1 мкФ. Рядом с С6 расположены конденсаторы С3, С5 большего размера и емкости, которые входят в петлю В. Сглаживающие конденсаторы, к которым относится и алюминиевый электролитический конденсатор, можно расположить подальше, поскольку их функция заключается в подавлении колебаний и фильтрации пульсаций на коммутационной частоте. Входной LC-фильтр на рисунке 6 устанавливается между конденсатором С3 и входными разъемами в нижней части оценочных плат силовых модулей MagI³C.

На рисунке 11 зеленая и красная стрелки обозначают границу между силовой частью устройства, где из-за коммутационных токов и быстрых переходных процессов генерируется много электромагнитных помех, и управляющей стороной, или аналоговой частью, где находятся чувствительные к помехам узлы с высоким импедансом, например выводы FB и EN . Все силовые части схемы рекомендуется размещать на одной стороне.

На рисунке 12 показана топология печатной платы с проводниками и медными площадками. Для протекания коммутационных токов с крутыми фронтами предусматриваются широкие и короткие соединения. Лучше, если проводящие участки выполнены в форме сплошной медной полосы. Для повышения технологичности производства часто в соединениях между контактными площадками компонентов

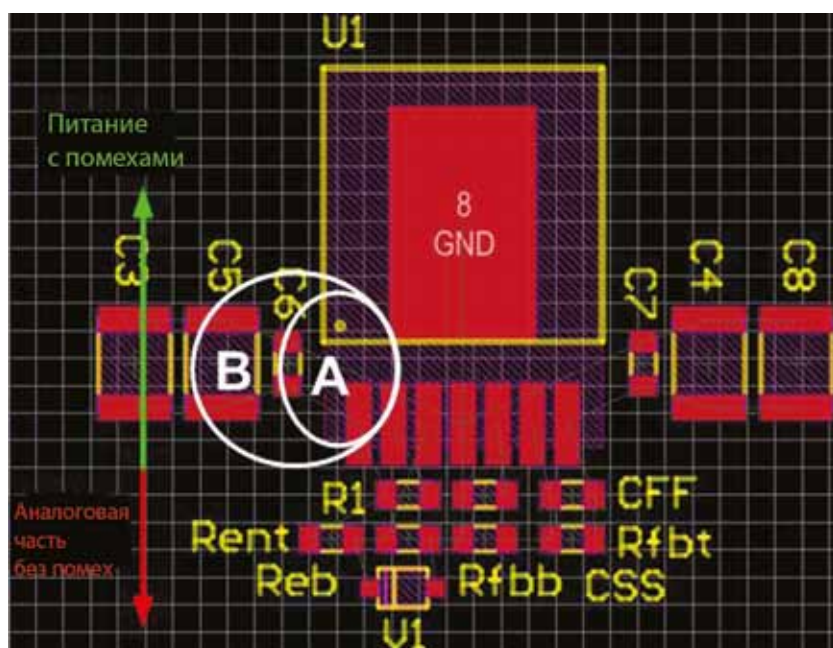


Рис. 11. Размещение компонентов по схеме на рисунке 4

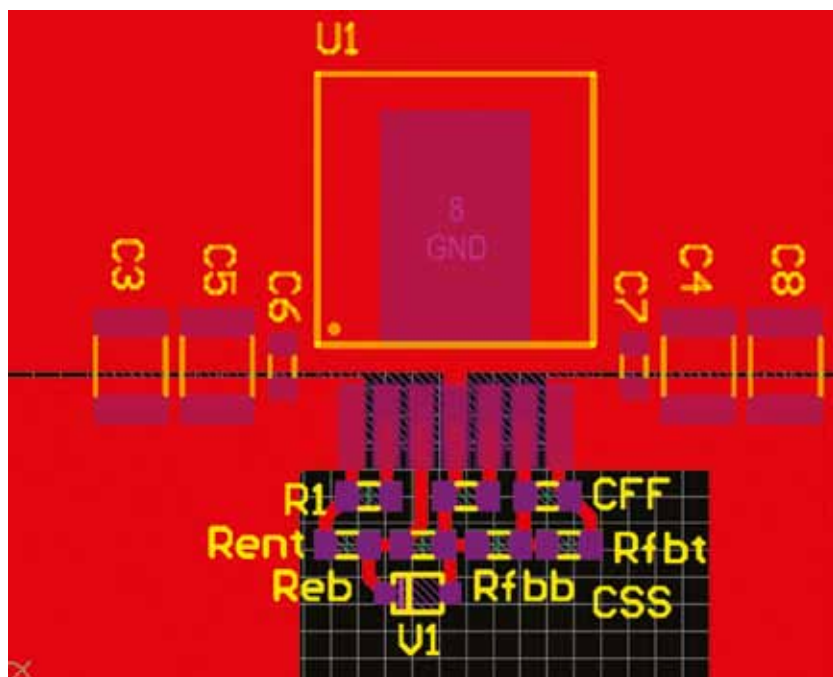


Рис. 12. Плоскости питания и соединительные проводники

и медными проводниками устанавливается тепловая разгрузка.

ПОЛЬЗА ОТ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТИ

Слово «паразитный» ассоциируется с отрицательными эффектами, однако при проектировании топологии печатных плат паразитные элементы могут быть полезными. В рассматриваемом примере к этим элементам относится, например, емкость между цепью V_{IN} и GND , а также между цепью V_{OUT} и GND . Положительный эффект достигается, если разместить края медных участков с этими цепями рядом друг с другом на одном слое и добавить сплошные плоскости на другие слои печатной платы. На рисунке 12 представлена топология простой двухслойной печатной платы. Весь нижний слой за исключением проводника с выводом FB для обратной связи коммутирован на вывод GND , а величина паразитной емкости между этой плоскостью и участками с V_{IN} и V_{OUT} , составляет 100–1000 пФ, благодаря чему происходит фильтрация ВЧ-шума. Заполнение неиспользуемых площадей платы медными участками, соединенными с низкоимпедансными цепями V_{IN} , V_{OUT} и GND , улучшает ЭМС и тепловую характеристику, не приводя к повышению стоимости печатной платы (см. рис. 13).

DC/DC-регуляторы, в качестве которых применяются модули Mag³C, работающие в нормальных условиях на гальванически развязанных от первичной стороны цепях, должны отвечать требованиям к функциональной изоляции, которые определяют минимальный зазор между разными цепями. Рекомендации по функциональному разделению, изложенные в таких стандартах по обеспечению безопасности как IEC60950, бывает трудно понять правильно. Стандарт UL796 предоставляет более практичный подход, определяя такие минимальные расстояния, которые позволяют предотвратить возникновение дуги. В частности, в этом документе предусматривается обеспечение изоляционного промежутка в 1 мм на каждые 1600 В (пиковое значение переменного или величина постоянного напряжения). Например, для верхнего слоя на рисунках 10–11 максимальная разность потенциалов между V_{IN} и GND составляет 42 В DC, что соответствует минимально-му расстоянию 0,026 мм.

При проектировании печатных плат следует обеспечить соответствие требованиям к технологичности, и хотя они могут варьировать от плат одного производителя к другому, существует достаточно четкий перечень рекомендаций. Чем толще слой меди, тем боль-

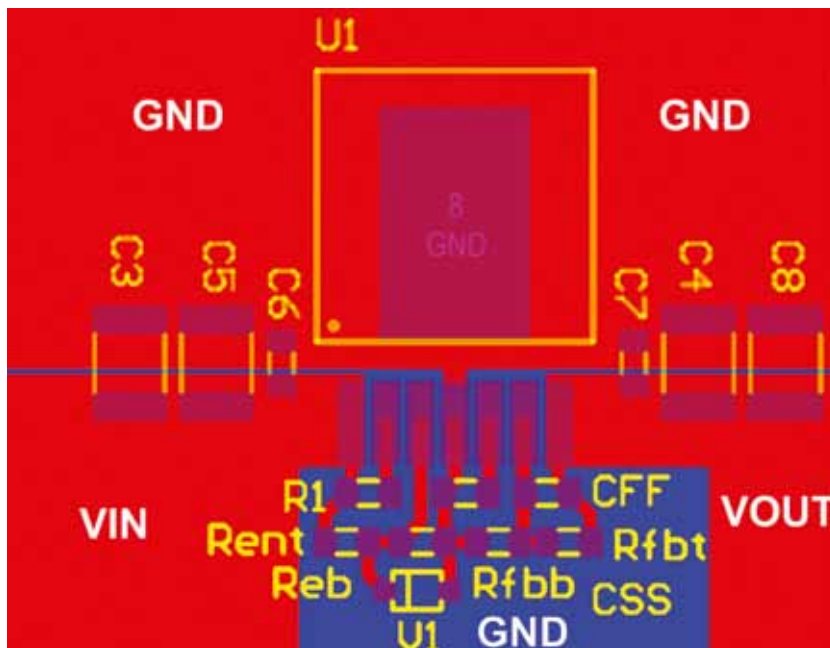


Рис. 13. Заполнение нижнего слоя (выделен синим цветом) добавляет паразитную емкость между цепью V_{IN} и GND , а также между цепью V_{OUT} и GND

ше должны быть изоляционные зазоры между проводниками. Например, у медных участков толщиной 35 мкм минимальный зазор, как правило, составляет 0,175 мм, а у участков толщиной 70 мкм – 0,25 мм. В соответствии с требованиями к изоляционным зазорам между проводниками и к технологичности изготовления промежутков между V_{IN} и GND , а также между V_{OUT} и GND на печатной плате (см. рис. 10–11) составил 0,4 мм. В результате была достигнута электрическая безопасность, технологичность и хорошая емкостная связь между входным, выходным напряжениями и системным заземлением.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕПЛОВОМУ РЕЖИМУ

Корпус TO263–7EP у модулей семейства VDRM является высокомоощным устройством для поверхностного монтажа. Поскольку во многих приложениях тепловой радиатор установить невозможно, наилучшим теплоотводом для модулей является сама печатная плата. Тепловое сопротивление θ_{JA} между источниками тепла (которыми, главным образом, являются силовые ключи) и окружающей средой можно уменьшить с помощью следующих методов проектирования печатных плат:

1. Увеличить толщину медного покрытия.
2. Увеличить площадь сплошной медной плоскости, соединенной с теплоотводящей площадкой.
3. Добавить теплоотводящие переходные отверстия, соединяющие теплоотводящую площадку со сплошными плоскостями на внутреннем и нижнем слоях.

4. Увеличить толщину покрытия теплоотводящих переходных отверстий, заполнить их припоем или вставить медные затычки.

5. Увеличить воздушный поток вдоль поверхности медных плоскостей, которые соединены с теплоотводящей площадкой.

Теплоотводящая площадка корпуса TO-263 и наружная площадка корпуса TO-263–7EP электрически соединены с PGND, что упрощает их соединение с большими медными участками и не ухудшает электрические характеристики или ЭМС модулей. На рисунках 12–13 показано, как расширяются медные участки на верхнем и нижнем слоях. На рисунке 14 иллюстрируется рекомендуемое размещение массива из 36 теплоотводящих переходных отверстий, которые соединяют силовую площадку с внутренними слоями и нижним слоем. Внутренний диаметр отверстия равен 0,254 мм, а внешний – 0,508 мм. Теплоотводящие переходные отверстия должны быть распределены по всей площади под теплоотводящим участком, но дополнительные переходные отверстия вне этой площади не способствуют улучшению теплоотвода.

Технологичность

При добавлении упомянутых теплоотводящих переходных отверстий всегда следует консультироваться с производителем печатных плат, чтобы обеспечить требуемую технологичность изделия. Например, стоимость дополнительных отверстий можно существенно уменьшить, увеличив их внутренний диаметр до 0,3 мм, а внешний диаметр – до 0,6 мм. Эти изменения практи-

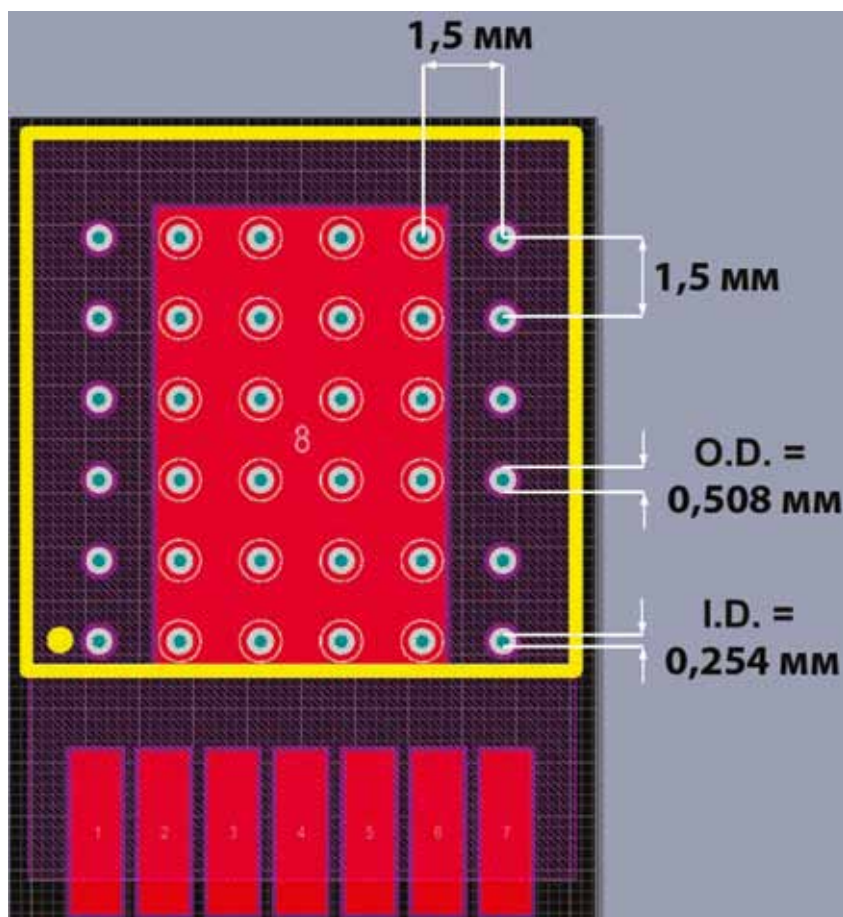


Рис. 14. Рекомендуемый размер и распределение теплоотводящих переходных отверстий при использовании корпуса TO-263-7EP

чески не скажутся на теплоотводящем эффекте. Увеличение толщины медного покрытия теплоотводящих отверстий, заполнение их припоем или медными затычками может существенно увеличить стоимость изготовления печатных плат. Таким образом, следует обеспечить наилучший компромисс между стоимостью и тепловыми характеристиками.

Пример теплового расчета

В этом примере мы рассмотрим тепловые требования к схеме и перечень используемых компонентов (см. рис. 6) с учетом следующих условий: $V_{IN} = 24$ В DC, $V_{OUT} = 12$ В DC, $I_{OUT-MAX} = 3$ А, $f_{SW} = 400$ кГц, $T_A = 50^\circ\text{C}$.

Из технического описания WPM1302401JT следует, что суммарная рассеиваемая мощность составляет 2,9 Вт. В данном примере максимальная допустимая температура перехода T_{J-MAX} (собственная температура модуля) равна 100°C . Максимальное допустимое тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой Θ_{JA-MAX} определяется следующим образом:

$$\Theta_{JA-MAX} = \frac{T_{J-MAX} - T_A}{P_D} = \frac{100^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{2,9\text{Вт}} = 17,2 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Этот результат свидетельствует о том, что обеспечить требуемый тепловой режим окажется довольно-таки трудной задачей, т.к. в таблице электрических характеристик указано значение $16^\circ\text{C}/\text{Вт}$ для четырехслойной печатной платы с медным покрытием толщиной 35 мкм и площадью $76,2 \times 76,2$ мм. В техническом описании величина теплового сопротивления между переходом и корпусом Θ_{JC} составляет $1,9^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Такое малое значение сопротивления говорит о том, что корпус TO263-7EP предназначен для работы высокоомощных модулей. Рассчитаем минимальную площадь печатной платы:

$$A_{PCB-MIN} = \frac{500 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}}{\Theta_{JA-MAX} - \Theta_{JC}} = \frac{500 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2}{\text{Вт}}}{17,2 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}} - 1,9 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}} = 33 \text{ см}^2.$$

Примечание. Коэффициент 500, используемый для данного расчета, является приблизительным числом, и не учитывает более сложные взаимосвязи.

Площадь в 33 см^2 получена для квадратной четырехслойной печатной платы размером $5,7 \times 5,7$ см. Толщина медного слоя этой платы с теплоотводящими переходными отверстиями составляет, по крайней мере, 35 мкм. Очевидно, что этот тепловой расчет не является точным.

Еще раз хотелось бы подчеркнуть необходимость проведения лабораторных испытаний. Кроме того, повышение толщины медного слоя, заполняющего теплоотводящие отверстия, или улучшение воздушного обдува платы позволит либо уменьшить ее размеры, сохранив прежнюю максимальную температуру перехода, или уменьшить эту температуру при той же площади печатной платы. ■