

Снижение электромагнитных помех в автомобильных источниках питания

Ж. Йе¹

УДК 621.314.1 | ВАК 05.27.01

При создании эффективного и компактного источника питания разработчики должны учитывать множество факторов, влияющих на выбор проектного решения. Для таких приложений, как автомобильные и промышленные системы, одно из критичных требований для источника питания – соответствие отраслевым стандартам по уровню излучаемых электромагнитных помех. Часто при реализации этого требования инженер вынужден допускать ряд компромиссов, ухудшающих важные характеристики системы. В статье описано решение на основе компактного понижающего стабилизатора от Analog Devices, которое обеспечивает преобразование в широком диапазоне входных напряжений до 42 В с пиковым выходным током 7 А, высокую эффективность при малой и большой нагрузке, низкий уровень электромагнитных помех и отличные тепловые характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Для реализации чувствительных к помехам приложений, предназначенных для работы в тяжелых условиях автомобильных и промышленных систем, требуются малошумящие, высокоэффективные понижающие стабилизаторы, которые можно разместить в ограниченном пространстве. Часто разработчики выбирают интегральные стабилизаторы напряжения со встроенными силовыми MOSFET-ключами благодаря их небольшим размерам по сравнению с традиционными решениями на основе контроллера и внешних полевых транзисторов. Интегральные стабилизаторы, работающие на высоких частотах (в районе 2 МГц, что значительно выше АМ-диапазона), также позволяют уменьшить габариты внешних компонентов. Кроме того, если стабилизатор характеризуется малым минимальным временем во включенном состоянии (T_{ON}), его можно подключать напрямую к более высоковольтным шинам питания без промежуточного преобразования напряжения, в результате чего экономится место и снижается сложность решения. Малое время включения требует быстрых фронтов коммутирующих сигналов и контроля минимального времени холостого хода, чтобы эффективно снизить потери на переключение и обеспечить работу на высоких частотах.

Еще один способ сэкономить пространство – уменьшить количество компонентов, которые нужны для того, чтобы обеспечивать соответствие стандартам по электромагнитным помехам и требуемые тепловые режимы.

К сожалению, во многих случаях простое уменьшение размеров преобразователя затрудняет выполнение этих требований. В данной статье представлены современные решения, которые позволяют экономить место, а также обеспечивают низкий уровень электромагнитных помех и отличные тепловые характеристики.

Импульсные преобразователи питания выбирают из-за их эффективности, особенно при высоких значениях коэффициента понижения напряжения, но один из недостатков такого выбора – электромагнитные помехи, вызванные переключением. В понижающем преобразователе электромагнитные помехи возникают из-за быстрого изменения тока (высокие значения di/dt) в ключах, а также из-за звона в ключах, вызванных паразитной индуктивностью в «горячем» контуре.

Электромагнитные помехи – только один из факторов, которые инженеры-разработчики систем должны учитывать при создании компактного, высококачественного источника питания. Некоторые критичные проектные ограничения часто конфликтуют между собой, в результате чего приходится искать компромиссное решение в условиях жестких сроков выхода изделия на рынок.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Чтобы уменьшить уровень электромагнитных помех (ЭМП) в понижающем преобразователе, необходимо максимально уменьшить излучающий эффект «горячего» контура и минимизировать амплитуду сигналов от источника помех. Есть несколько способов уменьшить излучаемые

¹ Компания Analog Devices, менеджер по системным приложениям, zhongming.ye@analog.com.

помехи, но многие из-них одновременно ухудшают другие характеристики стабилизатора.

Например, в типичном дискретном стабилизаторе с полевым транзистором в качестве меры, помогающей удовлетворить строгие требования автомобильных стандартов по излучаемым помехам, реализуется замедление фронта сигнала с помощью внешнего резистора на затворе, повышающего резистора или снаббера (демпфирующей цепи). Такой результат достигается за счет ухудшения характеристик, а именно, снижения эффективности, увеличения количества компонентов и габаритов. Медленные фронты коммутирующих импульсов повышают потери на переключение, а также потери из-за увеличения коэффициента заполнения импульсов. Чтобы достичь приемлемой эффективности и успешно пройти обязательные испытания на излучаемые помехи, преобразователь должен работать на относительно низкой частоте, например 400 кГц. На рис. 1 показаны типовые формы импульсов напряжения в узле коммутации с быстрым и медленным фронтом соответственно.

Как видно из приведенных на рисунке осциллограмм, медленный фронт сигнала приводит к росту потерь на переключение, значительному увеличению минимального коэффициента заполнения и, соответственно, коэффициента трансформации напряжения, не говоря об ухудшении других характеристик.

Снижение частоты коммутации также увеличивает физические габариты катушки индуктивности преобразователя, выходного и входного конденсатора. При этом для того, чтобы выдержать испытания на кондуктивные помехи, необходим громоздкий сглаживающий п-фильтр

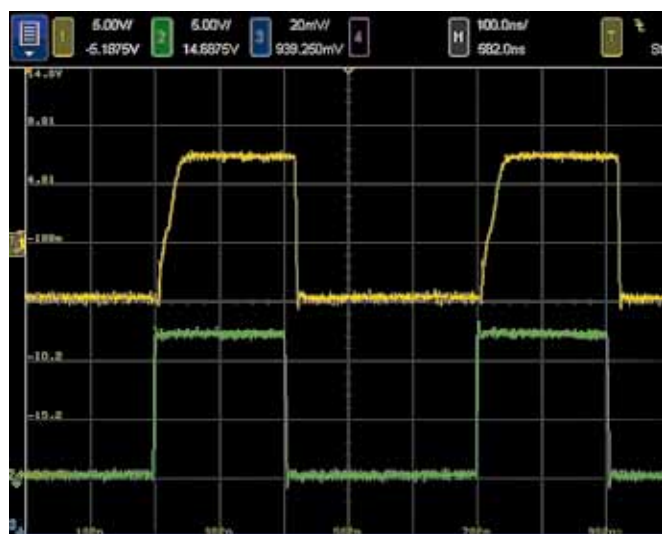


Рис. 1. Медленные фронты сигналов (желтая осциллограмма) приводят к значительным потерям на переключение, а также увеличению коэффициента заполнения

(П-фильтр). Номиналы индуктивности (L) и емкости (C) в фильтре увеличиваются при снижении частоты переключения. Номинальный ток индуктивности должен быть больше максимального входного тока при малой полной нагрузке линии. Таким образом, чтобы обеспечить соответствие строгим требованиям стандартов, на входе нужны громоздкие катушки индуктивности и несколько конденсаторов.

Например, при частоте переключения 400 кГц (в отличие от 2 МГц) в дополнение к увеличению габаритов катушки индуктивности и конденсатора, эти же элементы в фильтре ЭМП также должны быть относительно большими, чтобы обеспечить требования стандарта по кондуктивным помехам, обязательные в автомобильных системах. Одна из причин этого заключается в том, что эти элементы должны ослаблять не только основную частоту переключения на частоте 400 кГц, но и все ее высшие гармоники вплоть до 1,8 МГц. Стабилизатор, работающий на частоте 2 МГц, не имеет этой проблемы. На рис. 2 показаны габариты решения для 2 МГц по сравнению с 400-кГц решением.

Экранирование – последнее доступное средство для снижения уровня излучаемых помех, но такое решение занимает много места, которого может не быть в системе. Кроме того, могут потребоваться дополнительные итерации в процессе разработки механической конструкции и при проведении испытаний.

Чтобы избежать работы преобразователя стабилизатора на частотах АМ-диапазона радиовещания и обеспечить небольшие габариты решения, в автомобильных приложениях предпочтительна частота переключения 2 МГц и выше. При исключении частот АМ-диапазона необходимо лишь минимизировать высокочастотный шум, известный также как гармоники, и звон ключей. К сожалению,

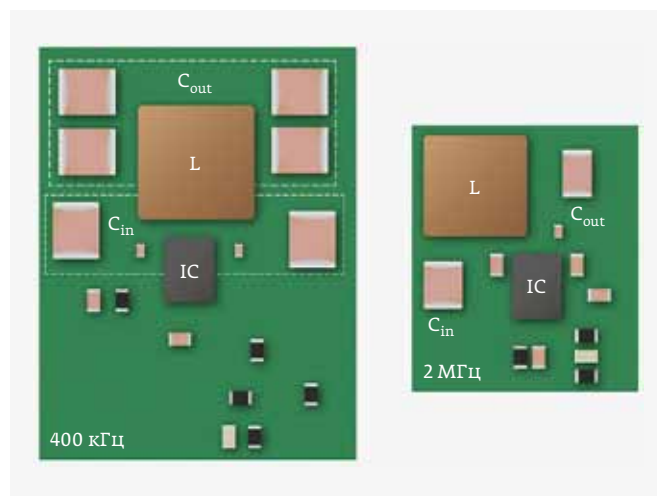


Рис. 2. Сравнение габаритов стабилизаторов для частоты переключения 400 кГц (слева) и 2 МГц (справа)

работа на высокой частоте обычно приводит к увеличению излучаемых помех в диапазоне от 30 МГц до 1 ГГц.

На рынке существуют импульсные стабилизаторы с быстрыми фронтами коммутирующих сигналов, которые обеспечивают пониженный уровень электромагнитных помех, такие как Silent Switcher из линейки Power by Linear компании Analog Devices. Рассмотрим вначале некоторые характеристики этих устройств, которые помогают снизить уровень ЭМП.

Частотная модуляция с распределенным спектром (SSFM) – это метод, посредством которого системный тактовый сигнал в определенном диапазоне частот циклично и равномерно изменяет свою фундаментальную частоту, распределяя таким образом среднеквадратичное значение энергии ЭМП в частотной области. Хотя частоту переключения часто выбирают так, чтобы она находилась вне АМ-диапазона (от 530 кГц до 1,8 МГц), частотные гармоники могут по-прежнему вызывать нарушение строгих требований по ЭМП для автомобильных приложений. Технология SSFM значительно снижает уровень ЭМП в АМ-диапазоне и на других частотах.

На рис. 3 показана схема высокоэффективного преобразователя входного напряжения 12 В в выходное напряжение 5 В (при токе 5 А) со сверхнизким уровнем ЭМП, работающего на частоте 2 МГц на основе интегрального понижающего стабилизатора LT8636 Silent Switcher.

На рис. 4 представлены спектральные характеристики для кондуктивных и излучаемых помех, полученные при тестировании демонстрационной платы, построенной на основе этой схемы, при напряжении на входе 14 В, выходном напряжении 5 В и выходном токе 5 А.

На входе схемы включены компактная катушка индуктивности и керамический конденсатор для фильтрации

кондуктивных помех, а ферритовое кольцо и еще один керамический конденсатор служат для уменьшения уровня излучаемых помех. Два небольших керамических конденсатора включены между входом и шиной земли для минимизации площади «горячего» контура, а также его разделения, что помогает блокировать высокочастотный шум.

Для того чтобы снизить уровень ЭМП, схема настроена на работу в режиме распределения спектра: $SYNC/MODE = INTV_{CC}$. Для изменения частоты коммутации между значением, устанавливаемым резистором R_T , и величиной, превышающей это значение приблизительно на 20%, применяется частотная модуляция треугольной формы. То есть когда LT8636 программируется на 2 МГц, частота будет варьироваться от 2 до 2,4 МГц при номинальной частоте 3 кГц.

Из приведенных характеристик для кондуктивных помех видно, что пиковая энергия гармоник распределяется, снижая пиковую амплитуду на любой заданной частоте – благодаря расширению спектра помехи уменьшаются по меньшей мере на 20 дБмкВ/м. Из рис. 4 видно, что режим распределенного спектра также снижает излучаемые ЭМП. Приведенная на рис. 3 схема отвечает строгим требованиям спецификации CISPR25 класса 5 для излучаемых электромагнитных помех в автомобильных системах с простым фильтром ЭМП на входе.

ВЫСОКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ НАГРУЗОК

Количество электронных устройств в автомобильных приложениях только увеличивается, причем большинство устройств требует все более высоких питающих токов с каждой новой итерацией проекта. При высоких токах

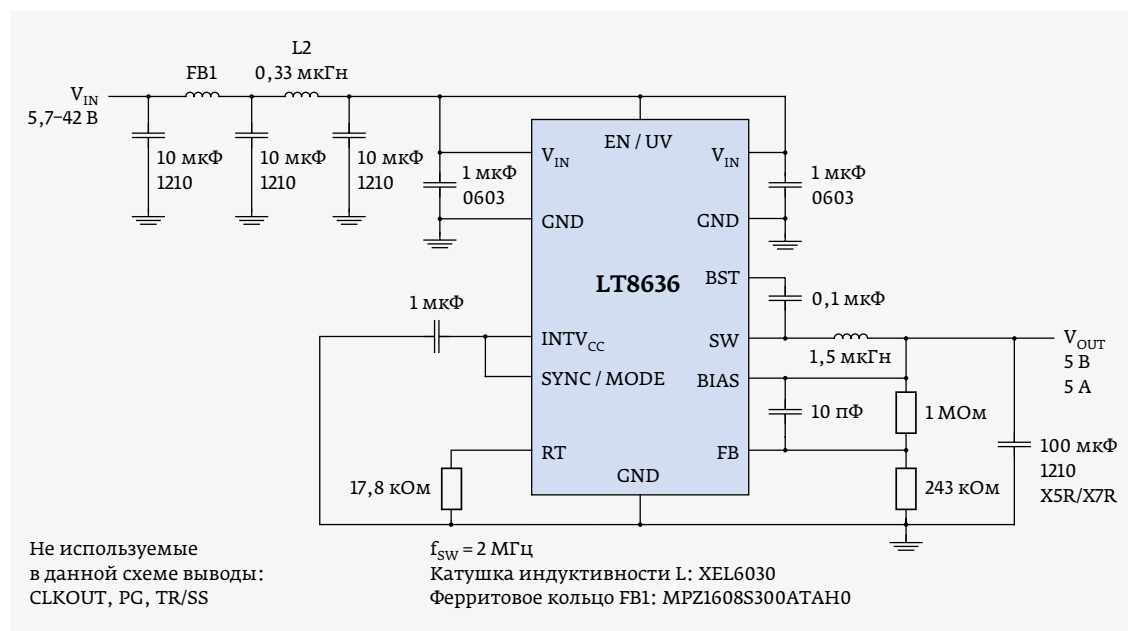


Рис. 3. Понижающий преобразователь LT8636, работающий в режиме распределенного спектра в диапазоне входных напряжений 5,7–42 В, обеспечивает ультранизкий уровень ЭМП

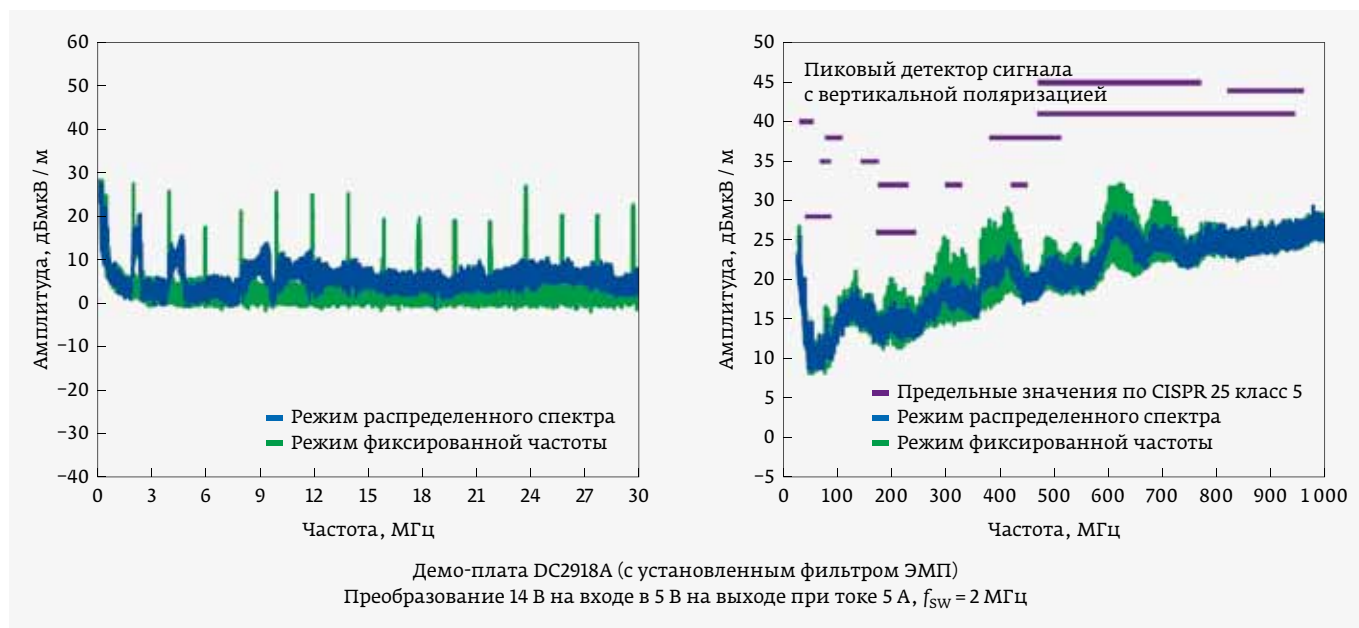


Рис. 4. Спектральные характеристики излучаемых ЭМП по CISPR25 в режиме распределенного спектра и без него

активной нагрузки первоочередными требованиями являются высокая нагрузочная способность и надлежащее управление температурой – надежная работа устройств зависит от температурных режимов работы. При этом неограниченное генерирование тепла в системе может привести к проблемам в проекте, связанным с дополнительными затратами.

Разработчикам системы также нужно принимать во внимание эффективность при малой нагрузке, которая, возможно, так же важна, как и эффективность при большой нагрузке, поскольку срок службы батарей в основном определяется током покоя при малой нагрузке или без нагрузки. Необходимо найти компромиссное проектное решение как на уровне компонента, так и на уровне системы в отношении эффективности при полной нагрузке, тока покоя без нагрузки и эффективности при малой нагрузке.

Может показаться очевидным, что для достижения высокой эффективности при полной нагрузке нужно минимизировать $R_{DS(ON)}$ полевого транзистора, особенно транзистора нижнего плеча. Однако транзистор с низким $R_{DS(ON)}$ обычно имеет относительно высокую емкость с соответствующим увеличением потерь на переключение и на управление затвором, а также большими размерами кристалла и более высокой стоимостью. В отличие от этого, интегральный стабилизатор LT8636 имеет очень низкое сопротивление проводимости полевого транзистора, что обеспечивает исключительную эффективность в режиме полной нагрузки. Максимальные значения выходного тока для LT8636 составляют 5 А (в непрерывном режиме) и 7 А (пиковая величина) в неподвижном

воздухе без какого-либо дополнительного радиатора, что упрощает и делает более надежной конструкцию устройства.

Для повышения эффективности при малой нагрузке стабилизаторы, работающие в режиме Burst Mode с низкими пульсациями, поддерживают выходной конденсатор заряженным до требуемого выходного напряжения, одновременно минимизируя входной ток покоя при минимальных пульсациях выходного напряжения. В режиме Burst Mode ток на выходной конденсатор подается короткими импульсами, после чего следуют относительно длительные периоды ожидания, когда большинство цепей управления (логики) отключены.

Для достижения более высокой эффективности при малой нагрузке предпочтительна катушка индуктивности большего номинала, поскольку в этом случае во время коротких импульсов на выход может передаваться больше энергии, а стабилизатор напряжения может оставаться дольше в режиме ожидания между каждым импульсом. Максимально увеличивая время между импульсами и сводя к минимуму потери на переключение коротких импульсов, можно добиться снижения тока покоя интегрального стабилизатора до 2,5 мкА, как в LT8636. Эту величину можно сравнить с десятками или сотнями мкА для типичного стабилизатора, доступного на рынке.

На рис. 5 показана зависимость КПД от тока нагрузки для высокоэффективного решения на основе LT8636 для преобразования входного напряжения 12 В в выходное напряжение 3,8 В (при токе 5 А) для автомобильных приложений.

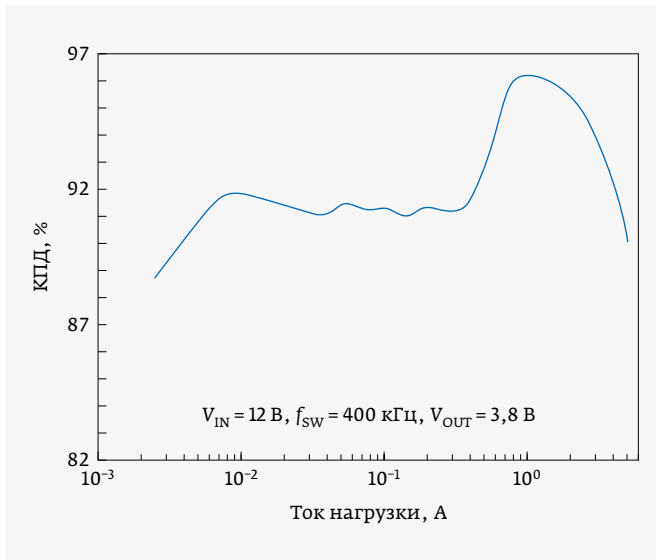


Рис. 5. КПД преобразователя напряжения 12 В в 3,8 В (ток на выходе 5 А) с использованием катушки индуктивности XAL7050-103 ($f_{sw}=400$ кГц)

Для достижения очень высокого КПД схема работает на частоте 400 кГц, в ней используется катушка XAL7050-103 с индуктивностью 10 мкГн. Схема обеспечивает КПД выше 90% при нагрузках от 4 мА до 5 А. Максимальная эффективность составляет 96% при токе 1 А.

На рис. 6 показана зависимость КПД для этого решения при токе нагрузки от единиц мкА до 5 А. Встроенный стабилизатор питается от 5 В выхода через вывод BIAS, чтобы минимизировать рассеиваемую мощность.

Пиковая эффективность достигает 95%, КПД при полной нагрузке составляет 92% для выходного напряжения 5 В при напряжении на входе 13,5 В. Эффективность при малой нагрузке остается на уровне 89% или выше для нагрузки до 30 мА для 5-В приложения. Преобразователь работает на частоте 2 МГц, при этом используется катушка индуктивности XEL6060-222 для оптимизации эффективности как при высоких, так и при малых нагрузках, при обеспечении относительно компактного решения. Эффективность при малой нагрузке может быть дополнительно улучшена (до уровня выше 90%) с помощью катушки индуктивности большего номинала. Ток в резистивном делителе обратной связи минимизируется, поскольку он присутствует на выходе в виде тока нагрузки.

На рис. 7 представлены тепловые характеристики для рассматриваемого решения при постоянной нагрузке 4 А и импульсной нагрузке 4 А (всего 8 А в импульсе) с рабочим циклом 10% (2,5 мс) при входном напряжении 13,5 В и неподвижном воздухе при комнатной температуре окружающей среды.

Даже при импульсной мощности 40 Вт и частоте переключения 2 МГц температура корпуса LT8636

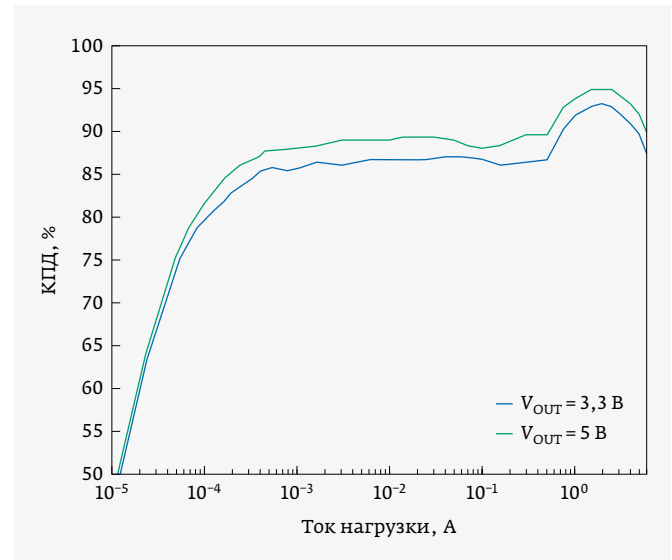


Рис. 6. КПД стабилизатора LT8636 при преобразовании напряжения 13,5 В в 5 В и 3,3 В с использованием катушки индуктивности XEL6060-222 ($f_{sw}=2$ МГц)

остается ниже 40 °С, что позволяет схеме безопасно работать вплоть до тока, равного 8 А, в течение короткого периода без вентиляторов или радиаторов. Это обеспечивает корпус LQFN размером 3 × 4 мм, созданный с применением усовершенствованной технологии корпусирования (позволяющей получить пониженное тепловое сопротивление) и высокой эффективности LT8636 на высокой частоте.

УМЕНЬШЕНИЕ ГАБАРИТОВ ПРИ РАБОТЕ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

Ценность пространства в автомобильных приложениях все более возрастает, что делает необходимым уменьшение габаритов источников питания, чтобы они соответствовали посадочному месту на дорогостоящей плате. Повышение рабочей частоты источника питания позволяет использовать более компактные внешние компоненты, такие как конденсаторы и катушки индуктивности. Кроме того, как уже упоминалось ранее, в автомобильных приложениях частоты переключения выше 2 МГц (или ниже 400 кГц) позволяют использовать основную частоту вне АМ-диапазона. Если сравнить обычно используемые 400 кГц с 2 МГц, то пятикратное увеличение частоты переключения позволяет в пять раз уменьшить индуктивность и выходную емкость, используемые в 400-кГц проекте. Это кажется простым. Тем не менее даже микросхемы, способные работать на высоких частотах, могут быть неприемлемы для многих приложений из-за необходимости некоторых компромиссов, присущих высокочастотному решению.

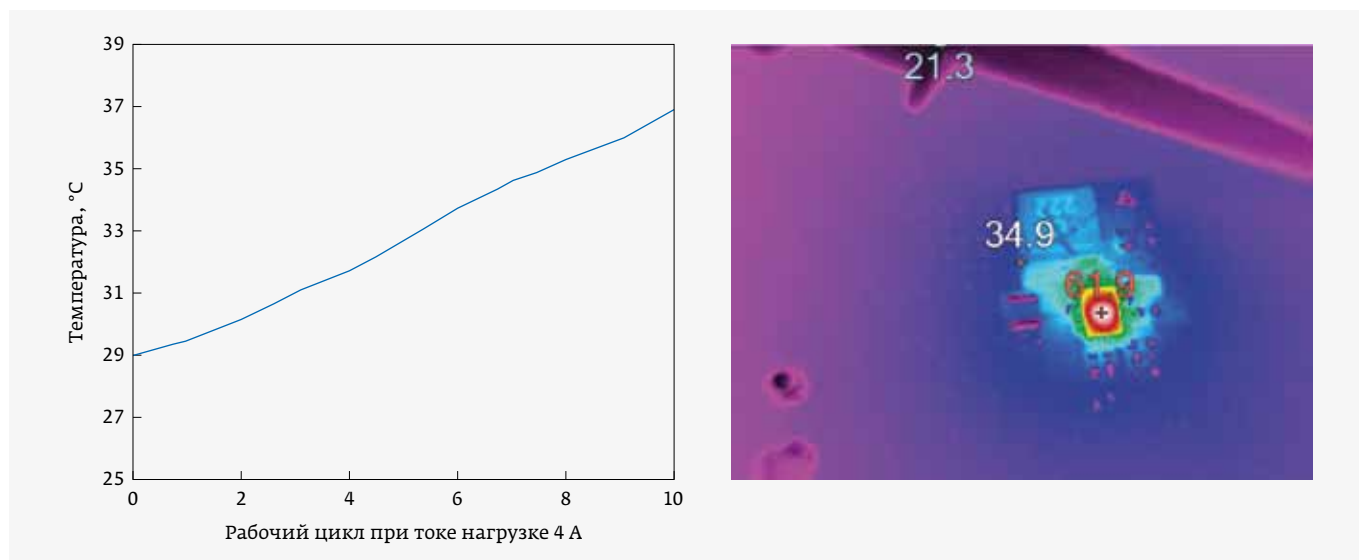


Рис. 7. Тепловые характеристики LT8636B в корпусе LQFN размером 3 × 4 мм при преобразовании 13,5 В в 5 В (при выходном токе 4 А) и импульсной нагрузке 4 А (с рабочим циклом 10%)

Например, работа на высокой частоте в приложениях с высоким коэффициентом понижения требует минимального времени во включенном состоянии. В соответствии с уравнением $V_{OUT} = T_{ON} \cdot f_{SW} \cdot V_{IN}$ при рабочей частоте 2 МГц требуется время во включенном состоянии верхнего ключа (T_{ON}) около 50 нс для получения выходного напряжения 3,3 из 24 В на входе. Если силовая ИС не может обеспечить такого малого времени включенного состояния, потребуется пропуск импульсов, чтобы поддерживать низкий уровень стабилизированного выхода, что в значительной степени противоречит цели высокой частоты коммутации. То есть эквивалентная частота переключения (из-за пропуска импульсов) вероятно будет находиться в АМ-диапазоне. Обеспечивая минимальное время включенного состояния верхнего ключа на уровне 30 нс, LT8636 позволяет напрямую преобразовывать высокое напряжение V_{IN} в низкое напряжение V_{OUT} на частоте 2 МГц. В отличие от этого, многие устройства характеризуются минимальным значением времени во включенном состоянии, превышающем 75 нс, что требует работы на низкой частоте (400 кГц), чтобы обеспечить более высокие коэффициенты понижения для исключения пропуска импульсов.

Другая распространенная проблема с высокой частотой коммутации заключается в том, что потери на переключение имеют тенденцию к увеличению. Потери, связанные с переключением, включают в себя потери при включении, потери при выключении и потери при управлении затвором ключа – все они примерно линейно зависят от частоты переключения. Тем не менее эти потери могут быть снижены с помощью более

быстрого времени включения и выключения. Время включения и выключения LT8636 очень короткое, менее 5 В/нс, в результате чего достигаются минимальное время холостого хода и минимальное время работы «встроенного» паразитного диода в силовых полевых транзисторах, что снижает потери на переключение на высокой частоте.

Используемый в рассматриваемом решении стабилизатор LT8636 поставляется в корпусе LQFN с габаритами 3 × 4 мм и представляет собой интегральную схему со встроенными силовыми ключами и всеми необходимыми цепями, что обеспечивает минимальное место, занимаемое на плате. Большая контактная площадка заземления под корпусом ИС обеспечивает передачу тепла на печатную плату с очень низким тепловым сопротивлением (26 °C/Вт), что устраняет необходимость в дополнительном управлении тепловыми режимами. Корпус разработан в соответствии с требованиями методологии FMEA. Технология Silent Switcher уменьшает площадь «горячего» контура на печатной плате, поэтому излучаемые ЭМП при такой высокой частоте переключения могут быть легко заблокированы с помощью простых фильтров, как было показано на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При тщательном выборе микросхемы можно создавать компактные высококачественные источники питания для автомобильных приложений без обычных в таких случаях компромиссов. Таким образом можно достичь высокой эффективности, высокой частоты переключения и низкого уровня электромагнитных помех. Примером таких решений может быть описанный в статье

компактный понижающий стабилизатор в интегральном исполнении LT8636 семейства Silent Switcher в корпусе LQFN (3 × 4 мм), который работает с входным диапазоном от 3,4 до 42 В и передает непрерывный ток в нагрузку до 5 А и пиковый ток до 7 А. В этой микросхеме выводы V_{IN} отделены друг от друга и размещены симметрично на корпусе, что позволяет разделить высокочастотный «горячий» контур, чтобы обеспечить взаимное подавление магнитной составляющей поля и снизить уровень излучаемых помех. Кроме того, синхронная топология и быстрые фронты коммутирующих сигналов повышают КПД при большой нагрузке, а эффективность

при малой нагрузке улучшена благодаря работе в режиме Burst Mode с низким уровнем пульсаций.

LT8636 подходит для применения в автомобильных приложениях с диапазоном входного напряжения от 3,4 до 42 В и малым падением напряжения, что позволяет ему работать в таких режимах, как запуск двигателя или отключение нагрузки. В автомобильных системах разработчики привыкли сталкиваться с различными трудностями при попытке уменьшить габариты источника питания, но с помощью представленных в статье решений они могут достичь всех своих целей без ухудшения характеристик системы. ●

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ОТ АВТОМОБИЛЕЙ ДО АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Под ред. М. Бруссели, Дж. Пистойя

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2011. – 784 с.,
ISBN: 978-5-94836-287-8

Цена 1300 руб.

В книге представлен аналитический обзор многочисленных электрохимических систем – неводных (с жидкими, полимерными или расплавленными солевыми электролитами) и водных аккумуляторных батарей, а также обсуждаются вопросы дальнейшего совершенствования конструкции батарей, технологии их изготовления, разработки новых материалов и повышения их надежности.

Настоящее издание содержит многочисленные примеры применения аккумуляторов: резервное питание, вспомогательное автомобильное оборудование, автоматическое оповещение о катастрофах, охранная, аварийная и пожарная сигнализации, спасательные системы, портативное медицинское оборудование, источники бесперебойного электропитания, аварийное освещение, измерительные системы, системы контроля и слежения, электроинструменты. Большое внимание уделено применению аккумуляторных систем в космонавтике – на спутниках, ракетах-носителях, летательных аппаратах для исследований планеты и космоса. В книге также показано, как новые области применения стимулируют создание новых или усовершенствование существующих аккумуляторных батарей.

Авторский коллектив книги – это ученые и специалисты университетов и научных институтов Англии, США, Франции, Бельгии, Израиля, Японии, Италии.

Монография предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области электроники, полезна для инженеров и преподавателей высшей школы, студентов и аспирантов, бакалавров и магистров.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

ЦАП 16-разрядный с уровнем функциональной безопасности SIL2 ADFS5758

 **ANALOG
DEVICES**

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

- **Функциональная безопасность уровня SIL 2/SC3 подтверждена TÜV Rheinland**
- **Выход по току и напряжению на одном выводе**
- **Сертификаты по электромагнитной совместимости IEC61000-4 и CISRP 11 (Class B)**

