

# Вопросы проектирования высокочастотных DC/DC-преобразователей с высоким входным напряжением

Ричард НОВАКОВСКИ  
(Richard NOWAKOWSKI)  
Брайан КИНГ (Brian KING)  
ti@compel.ru

В настоящее время при создании DC/DC-преобразователей используются все более высокие частоты переключения, что позволяет уменьшать габаритные размеры выходного конденсатора и катушки индуктивности, тем самым экономится место на плате. Поэтому на рынке появляется все больше микросхем DC/DC- преобразователей с высоким входным напряжением, имеющих встроенную защиту от импульсных помех в линии, что затрудняет получение меньших напряжений при более высоких частотах из-за меньшего коэффициента заполнения. Большинство производителей силовых интегральных схем (ИС) ведут агрессивную маркетинговую политику по продвижению высокочастотных DC/DC-преобразователей, позволяющих, по их утверждениям, уменьшить площадь, занимаемую на плате. Использование преобразователей, работающих на частоте 1 или 2 МГц, на первый взгляд кажется превосходной идеей. Однако значение частоты переключения оказывает влияние не только на размер и КПД источника питания. В статье описывается несколько примеров схем, демонстрирующих как достоинства, так и проблемы, возникающие при высоких частотах преобразования.

## Выбор приложения

Чтобы показать все плюсы и минусы использования высоких частот переключения, мы разработали три разных источника питания, работающих на частотах 100, 300 и 750 кГц. Входное напряжение всех источников было выбрано равным 48 В, выходное напряжение — 5 В, а выходной ток — 1 А. Такие параметры типичны для устройств, осуществляющих питание шины USB или другой 5-вольтовой шины общего назначения, используемой другими DC/DC-преобразователями, скажем, стабилизаторами с малым падением напряжения. Допустимая величина пульсаций была задана равной 50 мВ, что составляет около 1% от выходного напряжения. При этом удвоенная амплитуда тока через катушку (peak-to-peak) была принята равной 0,5 А. Все три схемы были построены на базе микросхемы TPS54160 производства компании Texas Instruments, которая представляет собой понижающий DC/DC-преобразователь с частотой 2,5 МГц, входным напряжением 60 В, выходным током 1,5 А и имеет встроенный силовой MOSFET. Эта микросхема нуждается во внешних цепях компенсации, позволяет легко задавать рабочую частоту и предназначена для применения в промышленных устройствах с высоким входным напряжением.

## Выбор индуктивности и емкости

Индуктивность катушки и емкость выходного конденсатора для всех трех вариантов преобразователя рассчитывались по следующим формулам.

Для катушки индуктивности:

$$V = L \times di/dt. \quad (1.1)$$

Это равенство можно преобразовать следующим образом:

$$L \geq (V_{OUT} + V_{DI}) \times (1-D) / (\Delta I \times f_s), \quad (1.2)$$

где  $D$  (коэффициент заполнения) = 5 В/48 В = 0,104 и  $\Delta I$  = 0,5 А (от пика до пика).

Для конденсатора:

$$I = C \times dv/dt. \quad (2.1)$$

Это равенство можно преобразовать следующим образом:

$$C \geq (2\Delta I) / (8f_s \times \Delta V), \quad (2.2)$$

где  $\Delta I$  = 0,5 А (от пика до пика), а  $\Delta V$  = 50 мВ.

При выводе уравнения (2.2) предполагалось, что выбранный конденсатор имеет ничтожно малое эквивалентное последователь-

ное сопротивление (ESR), что вполне справедливо для керамических конденсаторов. Из-за этого, а также из-за небольших размеров керамических конденсаторов мы использовали их во всех трех схемах. Двойка в числителе выражения (2.2) учитывает падение емкости, вызванное смещением по постоянному току, поскольку в документации на большинство конденсаторов этот эффект не учитывается.

Для оценки всех вариантов преобразователя использовалась схема, приведенная на рис. 1. Элементы схемы, для которых не указаны номинальные значения, подбираются для каждого варианта преобразователя отдельно. Выходной фильтр состоит из катушки L1 и конденсатора C2. Значения этих компонентов, вычисленные по формулам (1.1)–(2.2), приведены в таблице 1. Обратите внимание: чем выше частота преобразова-

Таблица 1. Выбор конденсатора и катушки индуктивности для трех вариантов схемы источника питания

Частота переключения, кГц	C2, мкФ/типоразмер	L1, мкГн	L1 RDC (max), мОм
100	47/1206	100	240,9
300	10/0805	33	180
750	4,7/0603	15	135

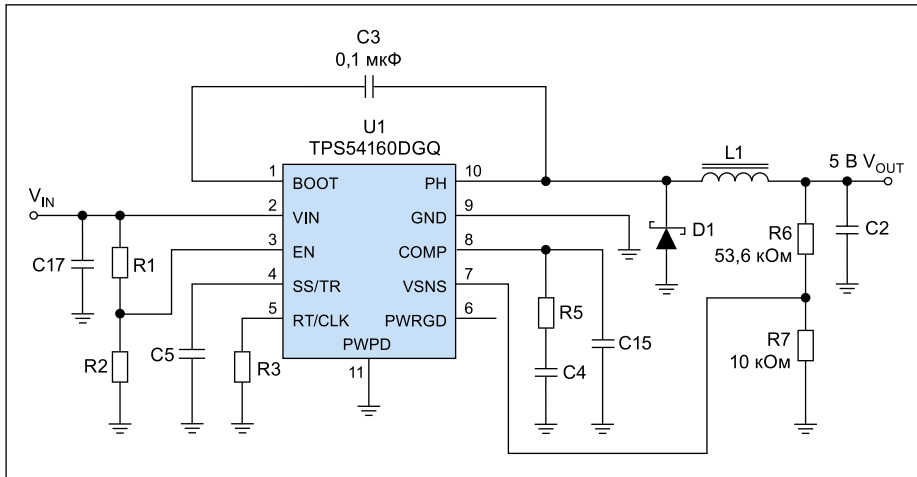


Рис. 1. Схема преобразователя

ния, тем меньше сопротивление катушки по постоянному току. Это связано с тем, что для катушки меньшего числа витков требуется провод меньшей длины. Элементы схемы компенсации усилителя ошибки подбирались независимо для каждой из частот переключения (здесь расчет этих элементов не рассматривается).

### Минимальное время нахождения в открытом состоянии

Одной из характеристик микросхем DC/DC-преобразователей является минимальное время, в течение которого силовой транзистор находится в открытом состоянии. Это время определяет минимальную ширину импульса, который может быть сформирован схемой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В случае использования понижающего преобразователя отношение времени, в течение которого силовой MOSFET находится во включенном состоянии, к длительности периода называется коэффициентом заполнения и равно отношению выходного напряжения к входному. В нашем случае коэффициент заполнения равен 0,104 (5 В/48 В), а минимальное время нахождения в открытом состоянии, согласно документации на микросхему TPS54160, равно 130 нс. Следствием ограничения минимальной длительности импульса является наличие минимально возможного значения коэффициента заполнения, которое может быть легко получено умножением минимального времени нахождения в открытом состоянии на частоту переключения. После

нахождения минимального значения коэффициента заполнения можно определить минимально достижимое значение выходного напряжения, умножая  $V_{IN}$  на полученный коэффициент. Кроме того, минимальное выходное напряжение ограничено величиной опорного напряжения преобразователя, которое для TPS54160 составляет 0,8 В.

В нашем случае при частоте переключения, равной 750 кГц, мы можем получить выходное напряжение, равное 5 В (табл. 2). Однако при увеличении частоты до 1 МГц минимально возможное выходное напряжение необходимо ограничивать на уровне около 6 В; в противном случае DC/DC-преобразователь перейдет в режим пропуска импульсов. В качестве альтернативы можно уменьшить частоту переключения либо входное напряжение. Поэтому, прежде чем выбрать рабочую частоту преобразователя, нелишне будет заглянуть в документацию на микросхему, чтобы уточнить значение минимального контролируемого времени нахождения в открытом состоянии.

Таблица 2. Минимальное выходное напряжение при  $t_{ON(min)} = 130$  нс

Частота переключения	Минимальный коэффициент заполнения	Минимальное $V_{OUT}$ при $V_{IN} = 48$ В, В
100 кГц	0,013	0,8 $V_{REF}$
300 кГц	0,039	1,87
750 кГц	0,098	4,7
1 МГц	0,13	6

### Пропуск импульсов

Пропуск импульсов происходит в том случае, когда DC/DC-преобразователь не может формировать импульсы управления затвором транзистора так часто, как это необходимо для поддержания требуемого коэффициента заполнения. Разумеется, источник питания будет пытаться стабилизировать выходное напряжение, однако из-за увеличения паузы между импульсами возрастет напряжение пульсации. Из-за пропуска импульсов в пульсациях выходного напряжения появятся субгармонические составляющие, которые могут стать причиной помех. Кроме того, возможна некорректная работа схемы ограничения тока, поскольку ИС может оказаться не в состоянии реагировать на выбросы тока большой амплитуды. В ряде случаев, если контроллер не работает как положено, схема управления может потерять стабильность.

### КПД и рассеиваемая мощность

Коэффициент полезного действия DC/DC-преобразователя — один из наиболее важных параметров, учитываемых при разработке источника питания. Следствием низкого КПД является большая рассеиваемая мощность, что влечет за собой необходимость использования дополнительного теплоотвода или медных полигонов на печатной плате (ПП). Также необходимо обеспечить лучшее охлаждение источника питания. Отдельные составляющие рассеиваемой мощности указаны в таблице 3.

Во всех трех проектах нас больше всего интересовали потери на управление полевым транзистором, потери на переключение транзистора и потери в катушке индуктивности. Сопротивление открытого транзистора и потери в ИС постоянны для всех трех вариантов, поскольку используется одна и та же микросхема. Так как в качестве вы-

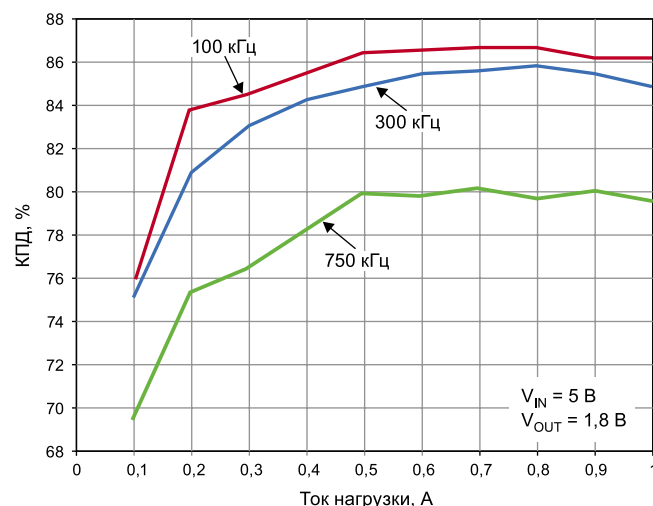


Рис. 2. Рабочая частота преобразователя

Таблица 3. Составляющие рассеиваемой мощности

Составляющая потеря	Факторы
Потери на управление полевым транзистором	Зависят от заряда затвора, напряжения управления, частоты
Потери на переключение полевого транзистора	Зависят от $V_{DS(on)}$ , времени нарастания/спада напряжения транзистора, частоты
Сопротивление открытого транзистора	$I^2 \times R_{DS(on)}$
Потери в диоде	$V_f \times I_{OUT} \times (1-D)$
Потери в катушке индуктивности	$I^2 \times RDC$ + потери в сердечнике
Потери в конденсаторе	$I_{RMS}^2 \times ESR$
Потери в ИС ( $I_Q$ )	Значение из документации

ходного конденсатора мы решили использовать керамический конденсатор с малым ESR, то потери в нем будут пренебрежимо малы, и их можно не учитывать. Чтобы показать влияние рабочей частоты преобразователя, мы измерили КПД всех трех схем (рис. 2). По этим графикам видно, что чем выше частота переключения, тем меньше КПД преобразователя. Для получения большего КПД независимо от частоты выбирайте DC/DC-преобразователь с малым сопротивлением канала открытого транзистора, малым зарядом затвора и малым значением тока IQ при полной нагрузке или же ищите конденсаторы и катушки с меньшим эквивалентным сопротивлением.

**Размеры компонентов**

В таблице 4 указаны значения площади печатных плат, требуемые для размещения компонентов каждого из трех вариантов схемы. Там же приводятся значения площадей, занимаемых катушкой индуктивности и конденсатором (с учетом того, что рекомендованные размеры посадочного места несколько больше, нежели размеры собственно компонентов). Итоговая площадь печатной платы была получена суммированием площадей, занимаемых каждым компонентом, включая ИС, фильтр и прочие малогабаритные резисторы и конденсаторы, и удвоением полученного результата для учета зазоров между компонентами.

По таблице видно, что для размещения компонентов схемы, работающей на частоте переключения 750 кГц, требуется площадь почти на 250 мм меньше, нежели для схемы, работающей на частоте 100 кГц. При этом площадь фильтра уменьшилась на 50%, а общая площадь печатной платы — на 55%.

Таблица 4. Размеры компонентов и общая площадь платы

Частота переключения, кГц	C <sub>2</sub> , мкФ/типоразмер	Площадь, занимаемая конденсатором, мм <sup>2</sup>	L <sub>1</sub> , мкГн	Площадь, занимаемая катушкой, мм <sup>2</sup>	Общая площадь, мм <sup>2</sup>
100	47/1206	18,9	100	150	420
300	10/0805	11,5	33	43,5	192
750	4,7/0603	6,5	15	43,5	182

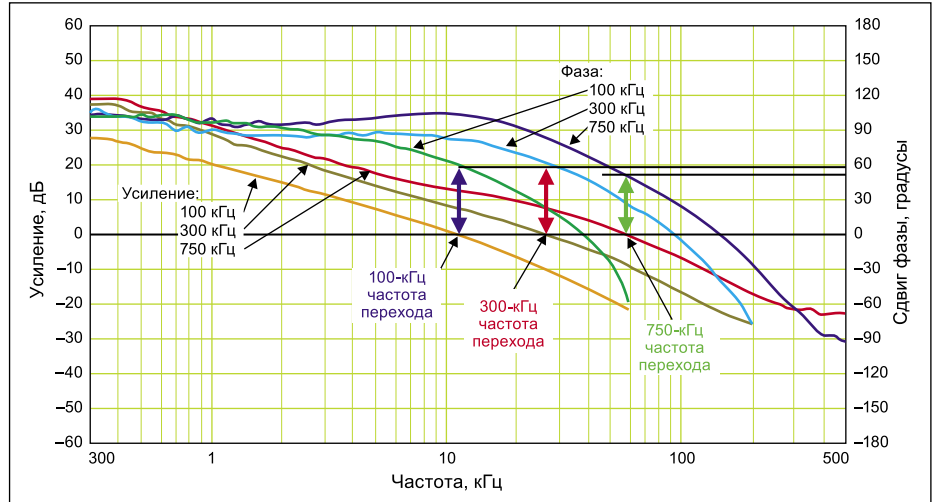


Рис. 3. Графики Боде

Однако не забывайте о законе убывающей отдачи, поскольку значения емкостей и индуктивности не могут быть уменьшены до нуля. Иначе говоря, дальнейшее увеличение частоты не приведет к пропорциональному уменьшению площади платы, так как существуют определенные ограничения на размеры массово выпускаемых конденсаторов и катушек индуктивности.

Обратите внимание, что катушки индуктивности 33 и 15 мкГн имеют одинаковые размеры. Это стало возможным за счет того, что первая катушка имеет высоту 3,5 мм, тогда как вторая — всего 2,4 мм. Эти две катушки были выбраны для того, чтобы показать прямую зависимость между индуктивностью и объемом.

**Переходная характеристика**

Переходная характеристика является хорошим индикатором качества источника питания. Для сравнения всех трех источников были сняты графики Боде (рис. 3). Как показано на рисунке, запас регулировки по фазе у всех трех источников составляет от 45 до 50°, что свидетельствует о хорошем демпфировании переходных процессов. При этом частота перехода равна примерно 1/8 от частоты переключения.

При использовании высокочастотного DC/DC-преобразователя разработчик должен убедиться в том, что полоса пропускания усилителя ошибки, встроенного в микросхему, достаточна для поддержки высокой частоты перехода. Усилитель ошибки микросхемы TPS54160 имеет полосу пропускания при

единичном усилении, равную 2,7 МГц (typ). Реальные характеристики переходных процессов приведены в таблице 5. Обратите внимание, что чем выше частота переключения, тем меньше амплитуда выбросов: это связано с более широкой полосой пропускания.

**Джиттер**

При больших значениях коэффициента преобразования и высокой частоте переключения может возникнуть необходимость борьбы с помехами. При выборе высокой частоты переключения разработчик должен учитывать джиттер и минимальное время нахождения в открытом состоянии DC/DC-преобразователя. Шум, обусловленный джиттером, выходит на первый план при малых значениях коэффициента заполнения. Для примера в таблице 6 приведены отношения величины джиттера ко времени нахождения в открытом состоянии для преобразования из 48 в 5 В. Допустимым считается падение напряжения на диоде, равное 0,5 В, и джиттер 20 нс.

**Заключение**

При разработке преобразователей с высокой частотой преобразования разработчику постоянно приходится идти на компромиссы. В статье показаны такие достоинства подобных преобразователей, как меньшие размеры, меньшая длительность переходных процессов, меньшая амплитуда выбросов перерегулирования. За это приходится рас-

Таблица 5. Переходная характеристика

Частота переключения, кГц	Частота перехода, кГц	Запас по фазе, °	Время отклика, мкс	Амплитуда выброса, мВ
100	10	60	1000	350
300	30	60	300	300
750	60	50	150	240

Таблица 6. Отношение джиттера ко времени в открытом состоянии при малых коэффициентах заполнения

Частота переключения, кГц	Время в открытом состоянии	Джиттер/время, %
100	1,1 мкс	2
300	365 нс	5
750	150 нс	13

плачиваться уменьшением КПД и увеличением рассеиваемой мощности. Также существует потенциальная опасность попадания в режим пропуска импульсов и возможности генерации ВЧ-помех. Поэтому, прежде чем приступить к разработке высокочастотного DC/DC-преобразователя с высоким входным напряжением, необходимо внимательно

изучить документацию на микросхему контроллера и выяснить минимальное время нахождения в открытом состоянии, полосу пропускания усилителя ошибки, сопротивление полевого транзистора и потери на переключение транзистора. Микросхемы, имеющие хорошие значения этих параметров, будут наилучшим выбором, однако при этом

они наверняка окажутся дорогими. Поэтому их следует использовать только в том случае, если нет другого выхода. ■

### Литература

1. [www.power.ti.com](http://www.power.ti.com)
2. [www.ti.com/sc/device/TPS54160](http://www.ti.com/sc/device/TPS54160)