

Семейство DC/DC-преобразователей EcoSpeed компании Semtech — сочетание скорости и эффективности

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ
info@icquest.ru

Статья посвящена новому семейству высокоэффективных микросхем питания компании Semtech, применяемых для построения DC/DC-преобразователей с высокими эксплуатационными характеристиками. Рассматривается архитектура линейки EcoSpeed и ключевые преимущества ее применения, а также приведены требования к параметрам и номиналам внешних компонентов преобразователей.

Введение

Современные DC/DC-преобразователи находят широкое применение в системах питания телекоммуникационного оборудования, компьютерной и офисной технике, промышленной и бытовой электронике. Несмотря на большую популярность законченных модульных DC/DC-преобразователей, часто для выполнения конкретной задачи возникает необходимость в разработке импульсных регуляторов с минимальными размерами и максимальной эффективностью преобразования. Особенно это актуально для портативных устройств, где габариты источников зачастую имеют решающее значение. В этом случае разработку DC/DC-преобразователей выполняют с помощью специализированных микросхем контроллеров (без встроенного транзистора) и регуляторов (с внутренним силовым ключом).

Номенклатура современных микросхем DC/DC-преобразователей включает в себя тысячи наименований готовой продукции. Их производить десятки компаний, как хорошо известным, так и не очень. В настоящее время развитие ИС для DC/DC-преобразователей характеризуется такими факторами, как:

- Повышение КПД. Достигается путем улучшения параметров интегрированных силовых элементов (в первую очередь транзистора) и использования новых схемных решений.
- Снижение потребляемой мощности в отключенном состоянии, что особенно важно для приборов с автономным питанием.
- Уменьшение габаритов микросхем питания. Требования по габаритам приводят к тому, что на рынке появляется все больше преобразователей с высокой рабочей частотой преобразования (до 1 МГц) и MOSFET-ключом, расположенным на одном кристалле с контроллером. Повышение частоты позволяет уменьшить габариты внешних компонентов (прежде всего дросселя) и минимизировать площадь печатной платы.
- Повышение удельной плотности выходного тока. Новые микросхемы DC/DC-преобразователей, несмотря на минимальные габаритные размеры корпусов, способны обеспечить выходной ток до десятков ампер.

Компания Semtech непрерывно разрабатывает и реализует технические решения

для источников питания. Эти решения в результате воплощаются в виде высокоэффективных малогабаритных микросхем, обладающих хорошими эксплуатационными характеристиками. Новое семейство высокоинтегрированных контроллеров и регуляторов для DC/DC-преобразователей выпускается под маркой EcoSpeed [1].

Архитектура преобразователей семейства EcoSpeed

Семейство DC/DC-преобразователей EcoSpeed изготавливается на основе архитектуры AoT (adaptive on-time). Особенность этой архитектуры заключается в том, что в ней применен контур регулирования для динамической настройки времени включения на основе значений входных и выходных напряжений [2]. Для управления временем реакции вместо медленного усилителя согласования используется внутренний быстроедействующий компаратор. Результатом применения такой топологии является получение сверхбыстрой переходной характеристики, кроме того, упрощается схема, сокращается требуемое количество внешних компонентов, что, соответственно, приводит к уменьшению занимаемой на печатной плате площади и стоимости готового решения. В отличие от традиционных методов регулировки (табл. 1) надежное функционирование осуществляется на псевдофиксированной частоте. Микросхемы этого семейства предназначены для использования при проектировании локализованных к нагрузке (point of load, POL) стабилизаторов напряжения. Типовые применения включают в себя средства автоматизации, оборудование связи

Таблица 1. Сравнение методов регулировки, применяемых в DC/DC-преобразователях

Функция	Метод контроля тока	Метод контроля напряжения	С постоянным временем включения	С адаптированным временем включения (EcoSpeed)
Стабильность выходного напряжения по сети	Отличная	Хорошая	Отличная	Отличная
Стабильность выходного напряжения по нагрузке	Отличная	Средняя	Отличная	Отличная
Цель внешней компенсации	Да	Да	Нет	Нет
Стабильная работа в широком диапазоне емкостных нагрузок	Да	Нет	Нет	Да
Частота переключения	Постоянная	Постоянная	Переменная	Псевдопостоянная
Простая, экономически эффективная конструкция	Нет	Нет	Да	Да
Цель обратной связи	Быстрая	Медленная	Сверхбыстрая	Сверхбыстрая
Режим PSAVE	Не применяется	Не применяется	Применяется	Применяется

и передачи данных, аппаратуру медицинского назначения, портативные устройства, модули источников питания, бытовую электронику и многое другое.

На рис. 1 представлена упрощенная схема, поясняющая работу динамической регулировки времени переключения. Основными функциональными узлами при этом являются встроенные компаратор, ждущий мультивибратор, триггер, силовые MOSFET-транзисторы и драйверы к ним.

На один вход компаратора поступает часть выходного пилообразного напряжения с делителя, образованного при помощи резисторов R1 и R2, а на другой вход — опорное напряжение V_{REF} . При напряжении V_{FB} менее 750 мВ на выходе компаратора FB устанавливается высокий логический уровень, запускается ждущий мультивибратор и через триггер и драйвер транзистора включается верхний MOSFET-ключ. Регулируемое время включения транзистора задается одновибратором. Частота следования импульсов прямо пропорциональна выходному напряжению и обратно пропорциональна входному и определяется согласно формуле:

$$f_{SW} = V_{OUT} / T_{ON} \times V_{IN}$$

Рабочую частоту преобразователя можно программировать в пределах от 200 кГц до 1 МГц, что позволяет разработчикам оптимизировать энергоснабжение либо для максимизации КПД преобразования, либо для минимизации размеров устройства [3]. В основном, для большинства компонентов семейства EcoSpeed установка частоты осуществляется при помощи внешнего резистора, номинал которого можно рассчитать:

$$R_{TON} = 1/25f_{SW} \text{ (для ИС SC173A).}$$

Для контроллеров, имеющих цифровой интерфейс связи, установку выполняют программным способом. Корректировка T_{ON} , вызванная изменением нагрузки или входного напряжения, приводит к тому, что преобразование выполняется на псевдофиксированной частоте для компенсации этих изменений. Как видно на рис. 2, корректировка частоты не превышает $\pm 15\%$, поэтому излучаемый катушкой индуктивности электромагнитный шум можно устранить при помощи узкополосного фильтра [4].

Кроме того, для значительного снижения уровня нежелательных электромагнитных помех в приложениях, чувствительных к шумам, компания Semtech применяет запатентованную технологию SmartDrive. Паразитные электромагнитные колебания возникают, как правило, во время коммутации силового ключа и вызваны током обратного восстановления. Суть применяемого в микросхемах семейства EcoSpeed метода заключается в управлении силовыми транзисторами по специально заданному алгорит-

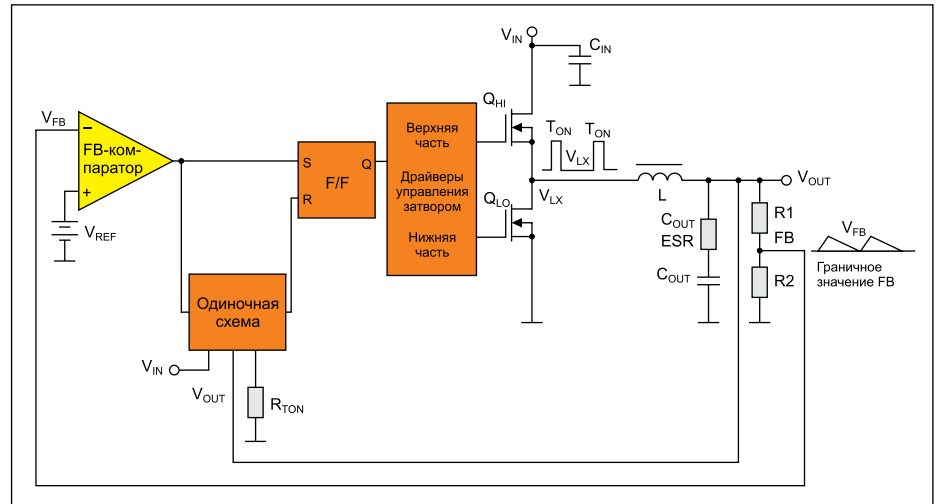


Рис. 1. Упрощенная структурная схема работы преобразователей семейства EcoSpeed на примере ИС SC173

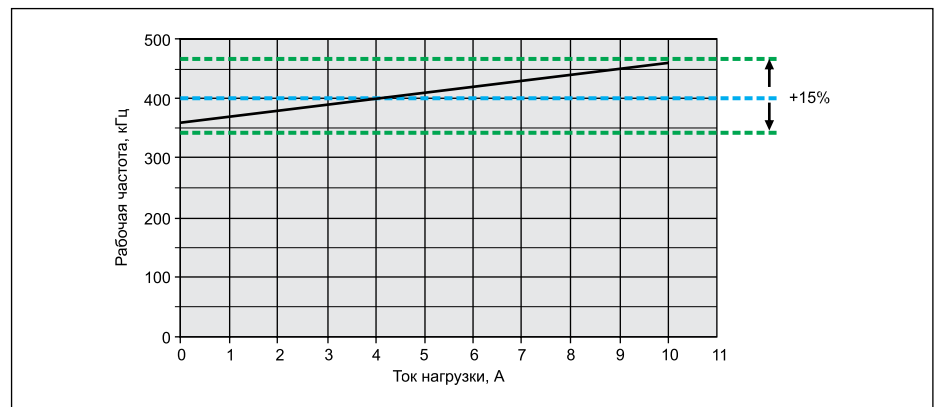


Рис. 2. Зависимость частоты переключения от нагрузки

му. Включение транзистора верхнего плеча осуществляется за два шага: сначала плавное кратковременное включение, чтобы избавиться от заряда обратного восстановления, затем полное быстрое включение для минимизации потерь энергии. Применение такого подхода способствует уменьшению уровня электромагнитного шума всей системы и позволяет обеспечить соответствие требованиям стандарта FCC по защите от помех, при этом значение КПД остается на высоком уровне.

Минимальное собственное энергопотребление в режиме ожидания очень важно в свете современных тенденций развития портативной электроники. Наряду с этим очень часто при разработке требуется функция быстрого выхода из режима сна. Для решения этих задач компания Semtech предлагает использовать PSAVE — автоматический режим экономии потребляемой мощности, позволяющий повысить эффективность функционирования преобразователей в условиях малых нагрузок (рис. 3). При переходе в режим PSAVE рабочая частота снижается до 25 кГц (верхняя граница слышимого диапазона), тем самым уменьшаются потери на переключение [5]. Помимо этого, осуществляется контроль тока катушки индуктивности и при необхо-

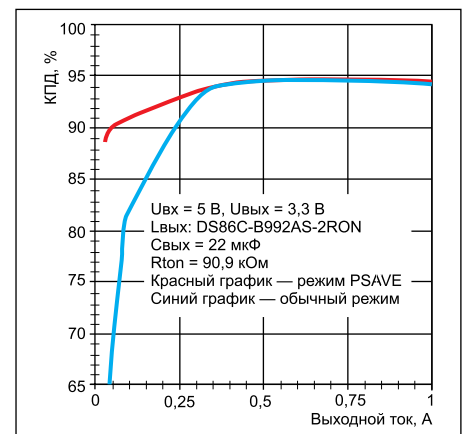


Рис. 3. КПД ИС SC171 при использовании режима PSAVE

димости отключение полевого транзистора в нижнем плече для предотвращения появления обратного тока. Кроме того, использование режима PSAVE позволяет непрерывно отслеживать случаи отключения нагрузки или утечек тока в цепи транзистора верхнего плеча и временно выходить из режима энергосбережения, чтобы обеспечить необходимое выходное напряжение. При восстановлении

нормальной нагрузки выход из режима PSAVE и достижение заданной рабочей частоты происходит через 40 мкс.

Компоненты семейства EcoSpeed

Семейство преобразователей EcoSpeed включает в себя широкий спектр специализированных микросхем для построения DC/DC-преобразователей. Регуляторы и контроллеры (табл. 2), изготавливаемые на основе запатентованной архитектуры AoT, выпускаются в низкопрофильных малогабаритных корпусах (MLPQ и MLPD) и соответствуют требованиям концепции энергосбережения Green Power. Преобразователи EcoSpeed отличаются высоким значением КПД (до 95%) во всем диапазоне нагрузок (рис. 4), имеют широкий диапазон входных напряжений (от 3 до 28 В), выходной ток от 1 до 30 А и обеспечивают надежное функционирование при рабочей температуре от -40 до $+85$ °C с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$. Высокая рабочая частота (до 1 МГц) и встроенные MOSFET-транзисторы позволяют уменьшить общую площадь печатного монтажа, избавиться от необходимости использования внешних компонентов и снизить стоимость преобразователя.

Для фильтрации входных и выходных напряжений можно использовать керамические, электролитические и полимерные конденсаторы. Дополнительная функция программируемого «мягкого» старта для ограничения пускового тока при включении стабилизатора и снижения нагрузки на входной источник питания вместе со специальными выводами PGOOD и EN/PSV упрощает схему энергоснабжения. Использование плавного старта возможно только при появлении на выводе PGOOD высокого логического уровня. Выход PGOOD — с открытым стоком, поэтому необходимо подключать подтягивающий к питанию резистор. Высокий логический уровень появляется на выводе PGOOD при

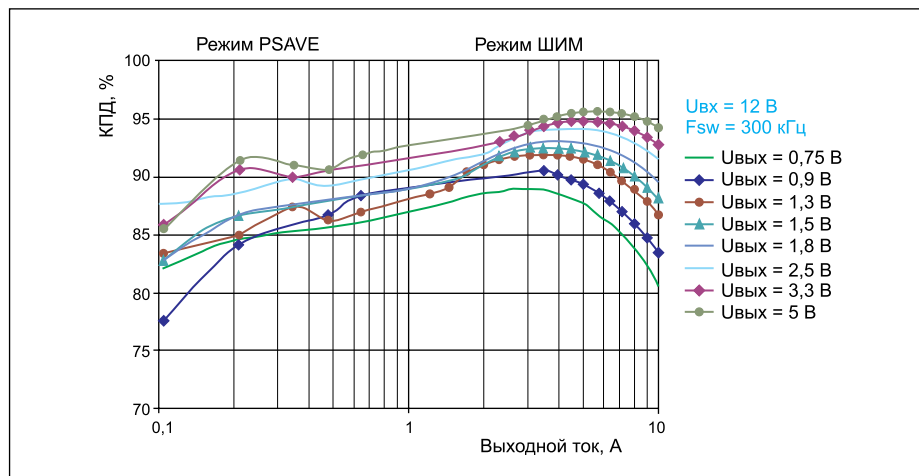


Рис. 4. Эффективность преобразования на примере ИС SC417

выходном напряжении, которое составляет от -10 до $+20\%$ от номинального значения. При помощи вывода с тремя состояниями EN/PSV можно задать режимы работы регулятора. Подключение к питанию обеспечивает постоянное функционирование в режиме PSAVE, соединение с общим проводом блокирует работу преобразователя, а если вывод оставить свободным, то используется обычный ШИМ-режим.

Судя по таблице 2, некоторые компоненты семейства EcoSpeed имеют встроенный программируемый LDO-стабилизатор с выходным током до 200 мА, который можно использовать как источник напряжения смещения для импульсного преобразователя [6]. Разрешение работы внутреннего LDO-источника осуществляется при помощи собственного входа Enable. Значения выходного напряжения задаются в диапазоне от 0,75 до 5,25 В при помощи внешнего резистора. Для стабильного функционирования на выходе рекомендуется использовать фильтрующий конденсатор емкостью 1 мкФ. При использовании LDO-

стабилизатора для установки напряжения смещения применяется дополнительная логическая защита: импульсный преобразователь не стартует, пока напряжение на выходе LDO не достигнет 90% от заданного значения. Кроме того, возможно конфигурирование линейного преобразователя для работы в независимом режиме, что повышает гибкость применения этих компонентов.

ИС SC493, помимо всего прочего, имеет цифровой интерфейс связи I²C, при помощи которого осуществляется конфигурирование параметров и режимов работы преобразователя, а также контроль состояния и возникновения аварийных ситуаций [7]. Так, при помощи управляющего контроллера можно подать дистанционную команду включения/выключения, выполнить установку частоты, задержки при включении и длительность плавного старта, получить информацию о режиме работы и т. д. Отдельно стоит отметить возможность плавного корректировки выходного напряжения в пределах 0,75–9% от номинального значения, что очень полезно для приложений с нестандартными значениями выходов.

Полный диапазон стандартных функций защиты стабилизаторов и контроллеров EcoSpeed обеспечивает безопасное функционирование и включает контроль понижения напряжения на входе, защиту от перенапряжения и короткого замыкания, а также ограничение величины тока на выходе. В качестве датчика тока используется транзистор нижнего плеча. Напряжение, получаемое при протекании тока через сопротивление транзистора в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$, сравнивается с заданным порогом, и при его достижении срабатывает схема ограничения. Температурная защита также предусмотрена. Время реакции механизмов защиты от отказов не превышает одного цикла переключения. Цепь блокировки при пониженном напряжении запрещает работу силовых ключей, пока питание микросхемы не вырастет до 2,9 В. При достижении этого значения

Таблица 2. Контроллеры и стабилизаторы семейства EcoSpeed

Тип	Встроенный LDO	Диапазон входных напряжений, В	Диапазон выходных напряжений, В	Максимальный выходной ток, А	Наличие PGOOD	Наличие Enable	Режим PSAVE	Корпус (размер, мм)
SC171	Стабилизатор	3–5,5	0,75–95% $U_{вх}$	1	✓	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC172	Стабилизатор	3–5,5	0,75–95% $U_{вх}$	2	✓	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC173	Стабилизатор	3–5,5	0,75–95% $U_{вх}$	3	✓	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC173A	Стабилизатор	3–5,5	0,75–95% $U_{вх}$	3	✓	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC174	Стабилизатор	3–5,5	0,75–95% $U_{вх}$	4	✓	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC410	Стабилизатор	✓	5,5–24	0,75–7,5	3	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC414	Стабилизатор	✓	3–28	0,75–5,5	6	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1) MLPQ-32 (5×5×1)
SC417	Стабилизатор	✓	3–28	0,5–5,5	10	✓	✓	MLPQ-32 (5×5×1)
SC424	Стабилизатор	✓	3–28	0,75–5,5	6	✓	✓	MLPQ-28 (4×4×1) MLPQ-32 (5×5×1)
SC427	Стабилизатор	✓	3–28	0,5–5,5	10	✓	✓	MLPQ-32 (5×5×1)
SC3303	Стабилизатор	✓	5,5–28	0,75–7,5	3	✓	✓	MLPD-10 (3×3×1)
SC418	ШИМ-контроллер	✓	3–28	0,5–5,5	30*	✓	✓	MLPQ-UT20 (3×3×0,6)
SC419	ШИМ-контроллер	✓	3–28	0,5–5,5	30*	✓	✓	MLPQ-UT20 (3×3×0,6)
SC493	Контроллер с I ² C	✓	3–28	0,5–5,5	30*	✓	✓	MLPQ-UT20 (3×3×0,6)

Примечание. * С внешним силовым транзистором.



Рис. 5. Внешний вид демонстрационной платы на основе ИС SC3303

сбрасываются регистры ошибок и происходит плавный запуск.

Для разработчиков доступны консультации специалистов и подробная документация на все компоненты. Помимо стандартного описания технических характеристик и примеров применения с выбором типов и расчетом номиналов внешних элементов, в обязательном порядке приведена рекомендуемая топология печатной платы преобразователей. Также необходимо отметить, что практически для всех представителей семейства EcoSpeed выпускаются демонстрационные платы, способствующие ускорению освоения и практического применения конкретной модели преобразователей [8]. Внешний вид подобной отладочной платы показан на рис. 5.

Требования к внешним компонентам схемы преобразователя

Для расчета импульсного преобразователя, например на ИС SC173A, необходимо определиться с диапазоном входных напряжений, со значением стабилизированного выходного напряжения, током нагрузки, рабочей частотой и током пульсации катушки индуктивности. На основе этих данных подбирается подходящая микросхема регулятора. При выборе внешних компонентов необходимо рассматривать два тока нагрузки: непрерывный и импульсный. От первого зависят параметры катушки индуктивности и входной емкости, а от второго — насыщение дросселя, выходная емкость преобразователя и схема ограничения тока.

Для примера зададим следующие значения: $U_{вх} = 4,5-5,5 \text{ В} \pm 10\%$, $U_{вых} = 1 \text{ В} \pm 4\%$, $f_{SW} = 800 \text{ кГц}$, $I_{вых} = 3 \text{ А}$. При определении рабочей частоты необходимо найти компромиссное решение, удовлетворяющее разработчика по размерам и стоимости внешних компонентов, с одной стороны, и эффективности преобразования — с другой. Номинал задающего резистора определяется следующим образом:

$$R_{TON} = 1/25f_{SW}.$$

Соответственно, для нашей частоты получаем $R_{TON} = 50 \text{ кОм}$. Возьмем ближайший номинал — $49,9 \text{ кОм}$.

Выбор катушки индуктивности

Расчет величины индуктивности — важный момент в разработке понижающего импульсного преобразователя. Катушка с малой величиной индуктивности имеет меньшие габариты, но при этом отличается значительным уровнем пульсаций тока. Наоборот, большие значения индуктивности снижают импульсное напряжение более эффективно, но за это приходится платить возросшими габаритами и стоимостью. Таким образом, приходится искать компромисс между размерами, эффективностью, уровнем пульсаций выходного тока и ценой. Выходную катушку индуктивности выбирают исходя из максимальной величины импульсного тока. Обычно оптимальным считается выбор, при котором импульсный ток принимает значения от 25 до 50% от величины тока нагрузки.

Возьмем, например, значение 30%. Тогда импульсный ток I_{RIPPLE} принимает значение $0,9 \text{ А}$ ($30\% \times 3 \text{ А}$). Чтобы подсчитать минимальную индуктивность, воспользуемся формулами:

$$T_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{INMAX} \times F_{SW}} = \frac{1}{5,5 \times 800} = 227 \text{ нс},$$

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT} \times T_{ON})}{I_{RIPPLE}} =$$

$$= \frac{(5,5 - 1) \times 227}{0,9} = 1,14 \text{ мкГн}.$$

Выберем ближайшее значение 2 мкГн , тогда $I_{RIPPLE} = 0,511 \text{ А}$. Перед окончательным выбором катушки, которая будет соответствовать требованиям по минимальной индуктивности, следует помнить, что любая катушка не является идеальной, тем более на высокой частоте. Реальная катушка индуктивности имеет уровень насыщения. Для успешного создания готовой конструкции необходимо выбрать катушку индуктивности, у которой уровень насыщения будет больше, чем пиковый ток в системе.

Выбор выходного конденсатора

Выходной конденсатор необходим для подавления выбросов и пульсаций, возникающих на выходе понижающего преобразователя при изменении величины нагрузки. Пиковые значения пульсаций тока от катушки индуктивности преобразуются в пиковые значения пульсаций напряжения на эквивалентном последовательном сопротивлении (ESR) выходного конденсатора. Недостаточная величина емкости этого конденсатора приводит к большим выбросам, а слишком большое значение его ESR — к большим пульсациям напряжения. Таким образом, чтобы схема понижающего преоб-

разователя соответствовала предъявляемым требованиям в части пульсаций, необходимо включить в нее выходной конденсатор с достаточной емкостью и низким ESR.

В нашем случае задано выходное напряжение 1 В с уровнем пульсаций $\pm 4\%$, то есть 40 мВ . Определим максимальное значение ESR по следующей формуле:

$$ESR_{max} = \frac{V_{RIPPLE}}{I_{RIPPLE}} = \frac{0,04}{0,511} = 78,3 \text{ мОм}.$$

Для предотвращения выброса в нагрузку излишков запасенной в катушке индуктивности энергии и превышения максимально допустимого значения выходного напряжения необходимо правильно определить емкость выходного конденсатора:

$$C_{OUTMIN} = \frac{L \times (I_{OUT} + 0,5 \times I_{RIPPLEMAX})^2}{(V_{PEAK})^2 - (V_{OUT})^2} =$$

$$= \frac{2 \times (3 + 0,5 \times 0,511)}{(1,05)^2 - (1)^2} = 207 \text{ мкФ}.$$

Здесь V_{PEAK} — выходное напряжение, увеличенное на 50 мВ (скачок при отключении нагрузки). Если изменение нагрузки относительно плавное, то величину емкости можно уменьшить.

Выбор входного конденсатора

При выборе входных конденсаторов для системы понижающего преобразователя напряжения следует обратить особое внимание на то, чтобы они имели как можно меньшие значения эквивалентной последовательной индуктивности (ESL) и ESR. Кроме того, необходимо учитывать требования к рабочему напряжению конденсаторов. Для минимизации возможности выхода конденсаторов из строя следует выбирать такое значение рабочего напряжения, которое как минимум в $1,2$ раза больше, чем входное напряжение.

Выбор силовых MOSFET-транзисторов

Большая часть представителей семейства EcoSpeed являются стабилизаторами, поэтому имеют встроенные ключи. Для контроллеров же транзисторы выбирают, во-первых, по минимальному значению сопротивления в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$ при заданном пиковом токе и, во-вторых, по требованиям температурного режима.

Заключение

Правильный выбор микросхем для DC/DC-преобразователей может оказаться трудной задачей, если необходимо компактное и недорогое решение с высоким КПД. Микросхемы для DC/DC-преобразователей Semtech облегчают выбор и позволяют реализовать заложенные в них преимущества при создании конкурентоспособных схем электропитания.

Быстрая переходная характеристика, широкий диапазон входного напряжения, высокое значение эффективности преобразования во всем диапазоне нагрузок, программируемая частота преобразования и встроенный LDO — все это в совокупности делает компоненты семейства EcoSpeed чрезвычайно гибкими и удобными для использования в различных применениях. ■

Литература

1. www.semtech.com
2. Davis S. Adaptive On-Time DC-DC Converters Combine Speed and Efficiency // Power Electronics Technology. August, 2010.
3. SC173A: 3A EcoSpeed Synchronous Step-Down Regulator with Automatic Power Save. Datasheet. 2010. Dec. 16.
4. EcoSpeed DC-DC Converters: Best-in-Class Performance for Dynamic Point-of-Load Applications // Product Overview. 2011.
5. SC171: 1A EcoSpeed Synchronous Step-Down Regulator with Optional Ultrasonic Power Save. Datasheet. 2010. Oct. 11.
6. SC417/427: 10A EcoSpeed Integrated FET Regulator with Programmable LDO. Datasheet. 2010. May 20.
7. SC493: EcoSpeed Step-down Controller with I²C Interface. Datasheet. 2010. June 10.
8. SC3303 EVB: Evaluation Board User's Guide. Rev. 1.0.