

Обзор микросхем для импульсных повышающе-понижающих преобразователей с одной индуктивностью

Дмитрий ИОФФЕ
dsioffe@yandex.ru

В предлагаемой вниманию читателя статье приводится краткий обзор нового и быстро развивающегося класса микросхем для построения импульсных повышающе-понижающих преобразователей напряжения с минимальными габаритами.

При создании стабилизированных источников питания для аппаратуры с питанием от батарей очень часто встречаются ситуации, когда выходное напряжение проектируемого источника может быть как больше, так и меньше входного напряжения. Например: разрабатывается стабилизированный преобразователь напряжения для питания цифровых устройств с выходным напряжением 3 В, который должен работать от литиевых батарей. Такой преобразователь надо рассчитывать на диапазон входных напряжений примерно от 2 до 3,7 В [1]. Таким образом, в начале жизненного цикла батареи преобразователь должен будет работать как понижающий, а после уменьшения напряжения батареи ниже 3 В — как повышающий.

В этой статье будет рассмотрен относительно недавно появившийся и бурно развивающийся класс микросхем, предназначенный для построения повышающе-понижающих преобразователей напряжения с одной индуктивностью. В таких преобразователях топология изменяется автоматически путем изменения алгоритма работы силовых ключей.

Существуют различные способы построения повышающе-понижающих преобразователей. Очевидный способ — это последовательное включение повышающего и понижающего преобразователей. При этом выходное напряжение первого преобразователя должно лежать за пределами изменения напряжения на входе, а требуемое выходное напряжение будет формироваться на выходе второго преобразователя. Очевидными же недостатками такой схемы являются сложность, большое количество деталей (в том числе два контроллера), высокая стоимость и пониженный КПД. Кроме того, при последовательном соединении импульсных стабилизаторов необходимо принимать меры по исключению

прохождения сквозных токов через два включенных основных элемента, то есть необходимо определенным образом синхронизировать работу двух стабилизаторов [2].

Другая разновидность повышающе-понижающих преобразователей — это преобразователи с топологией SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter). Упрощенная схема такого преобразователя показана на рис. 1. Эти преобразователи распространены достаточно широко, в последнее время появляется большое количество литературы по их расчету и применению. Для такой схемы необходим только один контроллер. Но, как видно на рисунке, в топологии SEPIC используются две индуктивности, что ведет к увеличению габаритов и стоимости устройства. Эти индуктивности могут быть намного больше и дороже, чем используемые в схеме полупроводниковые компоненты.

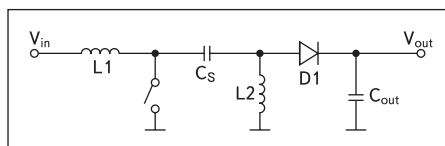


Рис. 1. Упрощенная схема преобразователя SEPIC

В настоящее время благодаря прогрессу в области развития полупроводниковых технологий появилась возможность разместить на одном небольшом кристалле несколько силовых ключей с достаточно сложной схемой управления. Такая микросхема может автоматически определять знак разности между выходным и входным напряжениями и в соответствии с ним работать или как повышающий, или как понижающий преобразователь. Для понимания принципа работы таких устройств рассмотрим по отдельности

работу повышающего и понижающего преобразователей.

На рис. 2 показана упрощенная схема повышающего (boost) преобразователя. Когда ключ Sw замкнут, через индуктивность $L1$ течет ток от источника питания V_{in} , в ней запасается энергия. Диод $D1$ отключает выход схемы от Sw , и выходное напряжение поддерживается за счет заряда, накопленного в выходном конденсаторе C_{out} . Когда ключ Sw размыкается, ток через $L1$ продолжает течь, так как в силу фундаментальных свойств индуктивности он не может измениться мгновенно. Но теперь этот ток течет через открывшийся диод $D1$ и заряжает конденсатор C_{out} . Для уменьшения потерь из-за падения напряжения на диоде $D1$ вместо последнего можно использовать мощный полевой транзистор (ПТ), открывая и закрывая его в противофазе с ключом Sw .

Обратим внимание на то, что правый по схеме вывод индуктивности подключен к точке соединения двух ключей: Sw и $D1$. При этом один из ключей подключает индуктивность к «земле», а второй — к выходу стабилизатора.

В понижающем (buck) преобразователе, упрощенная схема которого показана на рис. 3, также есть два ключевых элемента — транзистор и диод, причем диод тоже можно заменить полевым транзистором (так называемое синхронное выпрямление). Когда ключ Sw замкнут, ток через него и индуктивность $L1$ те-

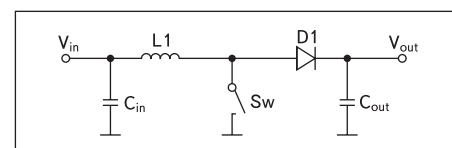


Рис. 2. Упрощенная схема повышающего (boost) преобразователя

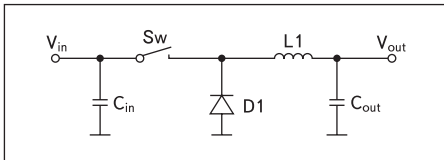


Рис. 3. Упрощенная схема понижающего (buck) преобразователя

чет в нагрузку, подключенную к точке V_{out} , а также заряжает выходной конденсатор C_{out} . Когда Sw размыкается, ток через L1 не может измениться мгновенно, и, следовательно, он продолжает течь через нагрузку и диод D1.

Теперь обратим внимание на то, что в этой схеме левый вывод индуктивности, аналогично, подключен к точке соединения двух ключей: Sw и D1. При этом один из ключей подключает индуктивность к «земле», а второй — к входу стабилизатора.

А теперь рассмотрим упрощенную схему силовой части повышающе-понижающего преобразователя с одной индуктивностью LM3668 фирмы National Semiconductor [3], показанную на рис. 4.

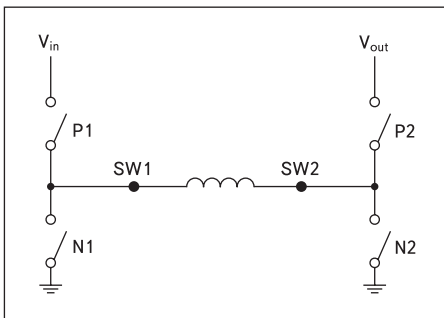


Рис. 4. Упрощенная схема силовой части повышающе-понижающего преобразователя с одной индуктивностью

Очевидно, что если зафиксировать состояние двух ключей из четырех и переключать два оставшихся, то мы получим или повышающий, или понижающий преобразователь. В таблице 1 показаны состояния ключей для обоих режимов.

Когда входное напряжение преобразователя больше выходного, ключ P2 всегда замкнут, N2 всегда разомкнут, а ключи P1 и N1 управляют выходным напряжением. Этот режим показан на рис. 5.

Если же входное напряжение преобразователя меньше выходного, то ключ P1 всегда замкнут, N1 всегда разомкнут, а ключи N2 и P2 управляют выходным напряжением. Работа схемы в этом режиме показана на рис. 6.

Таблица 1. Состояния ключей в разных режимах

Режим	Всегда замкнут	Всегда разомкнут	Переключаются
Понижающий	Ключ P2	Ключ N2	Ключи P1 и N1
Повышающий	Ключ P1	Ключ N1	Ключи N2 и P2

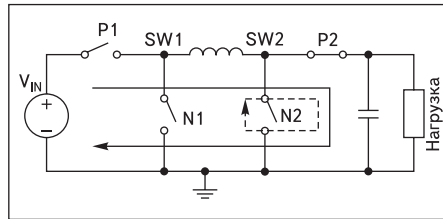


Рис. 5. Упрощенная схема работы LM3668 в понижающем режиме

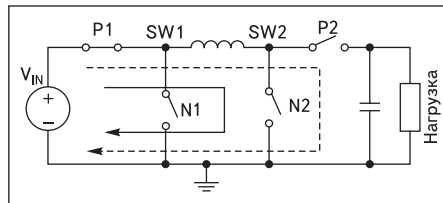


Рис. 6. Упрощенная схема работы LM3668 в повышающем режиме

Переключения между повышающим и понижающим режимом происходят без пауз, с минимальными переходными процессами. На рис. 7 показаны временные диаграммы таких переключений для случая, когда устройство работает с широтно-импульсной модуляцией, входное напряжение равно 3,05 В, выходное напряжение равно 3,0 В и ток нагрузки скачкообразно изменяется от 0 до 500 мА [3].

В последнее время ведущие производители полупроводниковых компонентов уделяют большое внимание повышающе-понижающим преобразователям с одной индуктивностью. Это вызвано не только малыми габаритами и низкой стоимостью таких устройств, но и их высоким КПД. Так, например, фирма Linear Technology утверждает [4], что решения на базе ее нового преобразователя LTC3534 в большинстве случаев позволяют продлить срок службы батарей на 25% по сравнению с решениями на основе топологии SEPIC.

Сегодня (статья написана в марте 2009 года) наибольшее количество разнообразных моделей микросхем для повышающе-понижающих преобразователей с одной индуктивностью предлагает Linear Technology (таблица 2). На сайте фирмы также представлено множество руководящих материалов по разным областям применения таких преобразователей, в том числе достаточно оригинальных. Например, в [5] предлагается использовать устройство LTC3531 для получения чистого напряжения +5 В из зашумленного напряжения питания шины USB. Поэтому мы начнем знакомство с ассортиментом повышающе-понижающих преобразователей, выпускаемых промышленностью, с изделий этой фирмы.

Большинство микросхем повышающе-понижающих преобразователей, выпускаемых Linear Technology, содержат встроенные силовые ключи. Это позволяет создавать на их основе источники питания с исключительно малыми габаритами. На рис. 8 приведена рекламная фотография из [6], на которой изображен источник питания с тремя выходными напряжениями на микросхеме LTC3520. Эта микросхема, так же как и похожая на нее LTC3522, помимо повышающе-понижающего преобразователя, содержит понижающий импульсный преобразователь и линейный

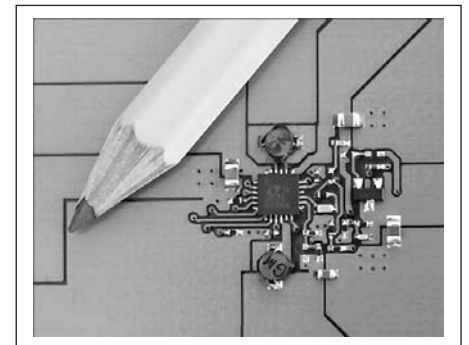


Рис. 8. Внешний вид малагабаритного источника питания с тремя выходами на микросхеме LTC3520

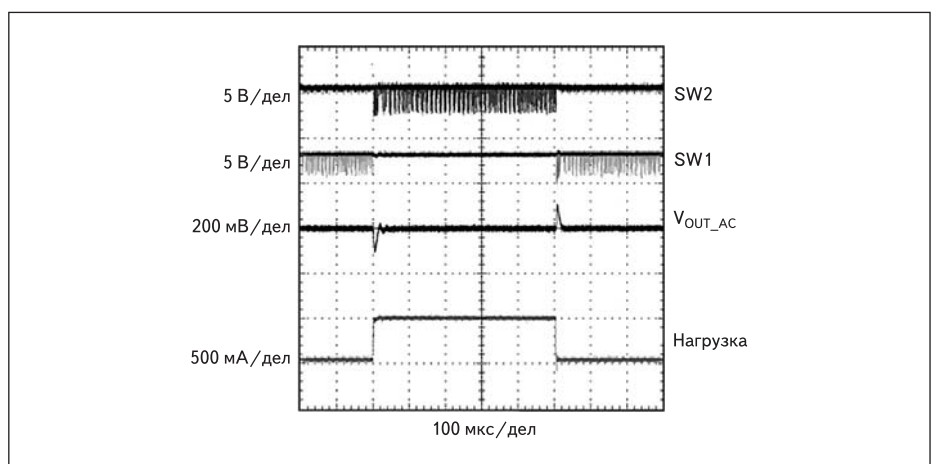


Рис. 7. Переходные процессы в преобразователе на LM3668 между повышением и понижением напряжения при скачкообразном изменении тока нагрузки

стабилизатор с низким падением напряжения (LDO). Собранный на ней источник питания от литий-ионной батареи и формирует выходные напряжения 3,3, 1,8 и 1,5 В.

У преобразователей со встроенными силовыми ключами максимальные токи нагрузки составляют порядка 1 А или менее. Для получения больших токов можно использовать контроллеры с внешними силовыми ключами на дискретных транзисторах. Фирма Linear Technology предлагает три модели контроллеров повышающе-понижающих преобразователей, рассчитанных на выходные токи 5 А (LTC3780) или 10 А (LTC3785, LTC3785-1). Последние могут работать на частоте до 1 МГц, что позволяет создавать на их основе источники питания с особо малыми габаритами.

И, с точки зрения получения максимальных выходных токов, промежуточное положение между преобразователями и контроллерами у фирмы Linear Technology занимают микро модули (µModule). В относительно небольших корпусах LGA размером 15×15×2,8 мм смонтированы микросхема контроллера, силовые ключи и сопутствующие компоненты. На их основе путем добавления индуктивностей и небольшого числа внешних компонентов можно разрабатывать малогабаритные и мощные высококачественные источники питания.

В качестве особенностей, присущих повышающе-понижающим преобразователям от Linear Technology, можно упомянуть:

- Burst Mode — пульсирующий режим. Он предназначен для повышения КПД при малых токах нагрузки. В данном режи-

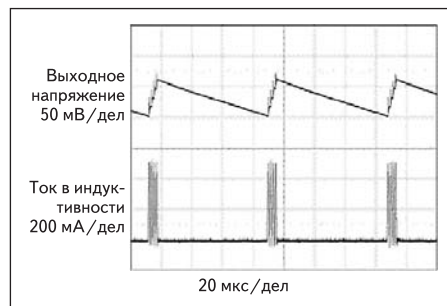


Рис. 9. Временные диаграммы пульсирующего режима

ме прекращается широтно-импульсная модуляция и стабилизатор начинает формировать редкие пакеты импульсов. При этом значительно сокращаются потери на пере-

Таблица 2. Основные характеристики микросхем для построения повышающе-понижающих преобразователей

Тип	Фирма	V _{in} min, В	V _{in} max, В	V _{out} min, В	V _{out} max, В	V _{out} fixed, В	I _{out} max, А	F _{sw} , кГц	Макс. КПД, %	Внешняя синхронизация	Диапазон рабочих температур, С	Корпус	Площадь корпуса, мм	Примерная цена, \$ за 1000 шт.	Особенности	Примечание
LTC3433	LT	4,0	60,0	3,3	20	—	0,45	200	82	Нет	-40...+125	16TSSOP	5×6	3,75	Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3440	LT	2,5	5,5	2,5	5,5	—	0,6	300–2000	96	Есть	0...+70	10DFN, 10MSOP	3×3; 3×5	2,84	Output Disconnect, Burst Mode	Преобразователь
LTC3441	LT	2,4	5,5	2,4	5,25	—	1,2	1000	95	Есть	0...+70	12DFN	4×3	3,55	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3442	LT	2,4	5,5	2,4	5,25	—	1,2	300–2000	95	Нет	0...+85	12DFN	4×3	3,95	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3443	LT	2,4	5,5	2,4	5,25	—	1,2	600	96	Есть	0...+70	12DFN	4×3	3,55	Output Disconnect, Burst Mode	Преобразователь
LTC3444	LT	2,75	5,5	0,5	5	—	0,4	1500	93	Нет	0...+85	8DFN	3×3	2,4	Output Disconnect, Soft Start	Преобразователь
LTC3520	LT	2,2	5,5	2,2	5,25	—	1	100–2000	95	Нет	0...+85	24QFN	4×4	3,5	Burst Mode, Soft Start, Sequencing, LDO	Преобразователь, +понижающий
LTC3522	LT	2,4	5,5	2,2	5,25	—	0,4	1000	95	Нет	0...+85	16DFN	3×3	2,5	Burst Mode, Power Good, Soft Start	Преобразователь, +понижающий
LTC3530	LT	1,8	5,5	1,8	5,25	—	0,6	300–2000	96	Нет	0...+85	10DFN, 10MSOP	3×3; 3×5	2,75	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3531	LT	1,8	5,5	2	5	3,3; 3,0	0,2	?	90	Нет	0...+70	6TSOT, 8DFN	3×3; 3×3	2	Output Disconnect, Burst Mode	Преобразователь
LTC3532	LT	2,4	5,5	2,4	5,25	—	0,3	300–2000	95	Нет	0...+85	10DFN, 10MSOP	3×3; 3×5	2,35	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3533	LT	1,8	5,5	1,8	5,25	—	2	300–2000	96	Нет	0...+85	14DFN	3×4	3,55	Output Disconnect, Soft Start, Burst Mode	Преобразователь
LTC3534	LT	2,4	7	1,8	7	—	0,5	1000	94	Нет	0...+85	16DFN, 16GN	5×3; 5×6	3,15	Burst Mode, Output Disconnect, Soft Start	Преобразователь
LTC3538	LT	2,4	5,5	1,8	5,25	—	0,8	1000	95	Нет	0...+85	8DFN	2×3	2,6	Output Disconnect, Burst Mode, Soft Start	Преобразователь
LTC3780	LT	4	36	0,8	30	—	5	200–400	98	Есть	-40...+125	24SSOP, 32QFN	8×8; 5×5	5,35	Burst Mode, Output Disconnect, PLL, Soft Start	Контроллер
LTC3785	LT	2,7	10	2,7	10	—	10	100–1000	96	Нет	0...+85	24QFN	4×4	3,56	Burst Mode, No Rsense, Output Disconnect, Soft Start	Контроллер
LTC3785-1	LT	2,7	10	2,7	10	—	10	100–1000	96	Нет	0...+85	24QFN	4×4	3,56	No Rsense, Output Disconnect, Soft Start, Burst Mode, Power Good	Контроллер
LTM4605	LT	4,5	20	0,8	16	—	5 (12 buck)	200–400	98	Есть	-40...+85	LGA	15×15	20,68	Power Good, PLL	Микро модуль
LTM4607	LT	4,5	36	0,8	24	—	5 (10 buck)	200–400	98	Есть	-40...+85	LGA	15×15	21,55	Power Good, PLL	Микро модуль
LTM4609	LT	4,5	36	0,8	34	—	4 (10 buck)	200–400	98	Есть	-40...+85	LGA	15×15	24,8	Power Good, PLL	Микро модуль
MAX8625	MD	2,5	5,5	1,25	4	3,3	0,8	1000	92		-40...+85	14DFN	3×3	2,45	Output Disconnect	Преобразователь
LM3668	NS	2,5	5,5	2,8/3,0/4,5	3,3/3,4/5,0		1,0	1600–2700		Есть	-40...+85	12LLP	3×3	2,25	Automatic PFM-PWM Mode or Forced PWM Mode	Преобразователь
LM5118	NS	3,0	75,0	1,23	70	—	?	50–600	95	Есть	-40...+125	20TSSOP	6,4×6,5	2,92	Programmable soft-start	Контроллер
TPS63000	TI	1,8	5,5	1,2	5,5	—	1,2	1500	96	Есть	-40...+85	10QFN	3×3	2,15	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63001	TI	1,8	5,5	—	—	3,3	1,2	1500	96	Есть	-40...+85	10QFN	3×3	2,15	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63002	TI	1,8	5,5	—	—	5	1,2	1500	96	Есть	-40...+85	10QFN	3×3	2,15	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63010	TI	2	5,5	1,2	5,5	—	1,2	2400	96	Есть	-40...+85	20WCSP	2,14×1,93	1,5	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63011	TI	2	5,5	—	—	2,8/3,3	1,2	2400	96	Есть	-40...+85	20WCSP	2,14×1,93	1,85	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63012	TI	2	5,5	—	—	2,9/3,4	1,2	2400	96	Есть	-40...+85	20WCSP	2,14×1,93	1,85	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63030	TI	1,8	5,5	1,2	5,5	—	0,8	2200–2600	96	Есть	-40...+85	10QFN	2,5×2,5	1,45	Output Disconnect	Преобразователь
TPS63031	TI	1,8	5,5	—	—	3,3	0,8	2200–2600	96	Есть	-40...+85	10QFN	2,5×2,5	1,45	Output Disconnect	Преобразователь
TPS55065-Q1	TI	1,5	40	—	—	5	0,5	440	82	Нет	-40...+125	20HTSSOP	6,4×6,5	1,55	Управление временем нарастания	Преобразователь
TPIC74100-Q1	TI	1,5	40	—	—	5	1	440	82	Нет	-40...+125	20HTSSOP	6,4×6,5	1,7	Управление временем нарастания	Преобразователь

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: преобразователь — микросхема со встроенными силовыми ключами; контроллер — микросхема без встроенных силовых ключей; микро модуль — устройство, которое содержит в одном корпусе микросхему контроллера, силовые ключи и сопутствующие компоненты; LT — Linear Technology; MD — Maxim-Dallas; NS — National Semiconductor; TI — Texas Instruments. Цены взяты с сайтов производителей и указаны на время написания статьи, март 2009 года.

ключение. Недостатком пульсирующего режима является увеличение пульсаций выходного напряжения. Во многих моделях преобразователей для применений, чувствительных к помехам, предусмотрено принудительное отключение пульсирующего режима. Временные диаграммы пульсирующего режима показаны на рис. 9 [7].

- Output Disconnect — отключение выхода микросхемы в режиме пониженного энергопотребления (Shutdown).
- Плавный старт (Soft Start).

К недостаткам рассмотренных преобразователей от Linear Technology можно отнести следующее. Во-первых, у большинства микросхем нет версий, способных полноценно работать в промышленном диапазоне температур, от -40 до $+85$ °C. Вместо него фирма предлагает так называемый расширенный (extended) температурный диапазон. Это означает, что гарантируется работа с заявленными параметрами в диапазоне температур от 0 до $+85$ °C (или даже до $+70$ °C). А на параметры при отрицательных температурах следует полагаться исходя из свойств проекта и статистических данных (Specifications over the -40 до 85 °C operating temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process controls [например, 7]). И, во-вторых, цены на микросхемы от Linear Technology относительно высоки.

Другой авторитетный производитель микросхем повышающе-понижающих преобразователей — это фирма Texas Instruments (таблица 2). Ассортимент ее изделий несколько меньше, среди них нет контроллеров и модулей, которые позволяют получать выходные токи до нескольких ампер. Но по параметрам ее микросхемы не уступают своим аналогам от Linear Technology. Заметим, что все рассматриваемые микросхемы от Texas Instruments могут работать в промышленном диапазоне температур, а некоторые даже в автомобильном, от -40 до $+125$ °C. Микросхемы с расширенным диапазоном входных напряжений, предназначенные для автомобильных источников питания, TPS55065-Q1 и TPIC74100-Q1, имеют такие особенности, как регулировка времени нарастания управляющих импульсов и частотная модуляция, позволяющие значительно уменьшить уровень помех. У всех остальных рассматриваемых преобразователей от Texas Instruments для улучшения электромагнитной совместимости предусмотрена возможность внешней синхронизации.

У микросхем от Texas Instruments для работы при малой нагрузке предусмотрен переход в режим, подобный пульсирующему режиму у Linear Technology, а также возможно его принудительное отключение.

Еще одна интересная особенность есть у микросхем с фиксированным выходным

напряжением — TPS63011 и TPS63012. Путем подачи специального управляющего сигнала можно переключать значение выходного напряжения между 2,8 и 3,3 В и 2,9 и 3,4 В соответственно.

Кроме Linear Technology и Texas Instruments, несколько моделей микросхем для построения повышающе-понижающих преобразователей напряжения с одной индуктивностью выпускают фирмы National Semiconductor и Maxim-Dallas. Основные параметры их изделий также приведены в таблице 2. ■

Литература

1. Литиевые батареи. www.powerinfo.ru/battery-li.php
2. Николайчук О. Повышающе-понижающий импульсный стабилизатор напряжения // Схемотехника. 2001. № 10.
3. LM3668. 1A, High Efficiency Dual Mode Single Inductor Buck-Boost DC/DC Converter. www.national.com
4. 7V, 500mA Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter Provides Extended Battery Run Time in Handheld Applications. www.linear.com
5. Wells E. Tiny Buck-Boost Converter for Low Current Applications. www.linear.com
6. Canield J. Complete 3-Rail Power Supply in a 4×4 mm QFN Package. www.linear.com
7. LTC3520. Synchronous 1A Buck-Boost and 600mA Buck Converters. www.linear.com