

# Снижение энергопотребления в режиме покоя в изолированных преобразователях постоянного напряжения с частотно-импульсной модуляцией и сверхмалым потребляемым током

Хавьер Монсалве КЭГИ  
(Javier Monsalve KÄGI)  
Хосе Мигуэль де ДИЕГО  
(Jose Miguel de DIEGO)  
Хосе Игнацио ГАРАТЕ  
(Jose Ignacio GARATE)

Основное внимание в этой статье обращено на усовершенствование «зеленого» малопотребляющего режима работы преобразователя постоянного напряжения с гальванической развязкой и поведение таких источников питания при отсутствии нагрузки. Особенное внимание обращено на пути увеличения продолжительности работы электронных приборов с батарейным питанием и оборудования связи с прерывистым режимом передачи.

Сегодня практически каждый электронный прибор с батарейным питанием, например, мобильный телефон, проигрыватель MP3 или цифровая камера, обычно находится в одном из двух режимов работы — в активном режиме и режиме покоя. В активном режиме такие приборы либо поддерживают телефонный разговор, либо воспроизводят музыку, либо позволяют снимать фотографии или фильмы, в то время как в режиме покоя устройство переходит в состояние с малым потреблением энергии и либо ожидает входящего телефонного звонка, либо команды начала воспроизведения, либо нажатия на кнопку спуска затвора. Такой старт-стопный режим работы, часто называемый прерывистым режимом, позволяет, например, сотовым телефонам несколько дней находиться в состоянии ожидания вызова, проигрывателям MP3 оставаться неделями без подзарядки батареи, а цифровым фотоаппаратам снимать сотни снимков от одного заряда батареи.

Однако даже в режиме покоя от источника питания потребляется некоторая мощность, в первую очередь преобразователем постоянного напряжения, подключенным между батареей и электронными цепями. Мощность, потребляемая преобразователем напряжения, разряжает батарею значительно быстрее, чем в случае полного отключения питания. При использовании перезаряжаемой аккумуляторной батареи в результате могут потребоваться дополнительные циклы заряда батареи, что может значительно сократить срок ее службы. Аналогичная

проблема возникает и при использовании обычных одноразовых батареек. Они разряжаются быстрее, и требуется более частая замена источников питания.

Один из вариантов усовершенствования прибора — это снижение потребляемой мощности в режиме покоя и таким образом достижение более «зеленого» режима работы. Первый шаг в этом направлении — снижение тока покоя преобразователя постоянного напряжения, являющегося сердцем практически любой системы с автономным питанием. Существует несколько путей снижения потребляемого тока в ненагруженных источниках питания. В этом обзоре мы остановимся только на использовании частотно-импульсной модуляции для достижения соотношения мощности, потребляемой во включенном состоянии и в режиме покоя, равного 1700:1. Это значение типично, например, для сотовых телефонов, активных на протяжении короткого периода разговора и находящих

длительное время в состоянии ожидания вызова в перерыве между телефонными разговорами и другой активностью (просмотром интернет-страниц, обменом текстовыми сообщениями и т. д.).

## Параметры системы

Типичный график зависимости потребляемой мощности от времени может выглядеть приблизительно так, как на рис. 1, на котором видны короткие всплески потребляемого тока во время активного режима работы, чередующиеся с продолжительными спадами во время нахождения прибора в режиме покоя. Ток в режиме покоя  $I_2$  должен быть минимален, чтобы обеспечить незначительный разряд батареи и продлить срок ее службы в режиме покоя. Таким образом, изолированный преобразователь постоянного напряжения должен обладать сверхнизким потребляемым током при отсутствии нагруз-

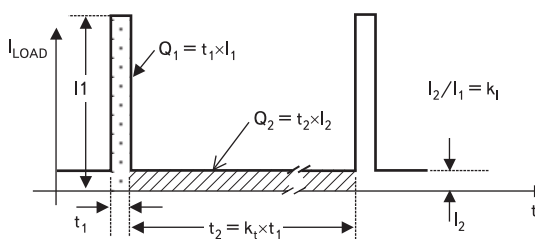


Рис. 1. Соотношение между потребляемым током в активном режиме и режиме покоя для оборудования связи с прерывистым режимом передачи

ки и обеспечивать максимальную степень гальванической развязки между входом и выходом. В идеале он должен еще иметь максимальный КПД и минимальные габариты.

Некоторые типичные преобразователи постоянного напряжения, перечисленные в таблице 1, обладают потребляемым током при отсутствии нагрузки от 7 до 40 мА при напряжении питания 12 В. Традиционно такие преобразователи строятся с использованием контроллеров с широтно-импульсной модуляцией. Однако в состав ШИМ-контроллера всегда входит тактовый генератор, продолжающий работать даже при полном отсутствии нагрузки и постоянно потребляющий ток от источника питания.

В альтернативном варианте преобразователя постоянного напряжения применяется контроллер, работающий в режиме частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) [1]. В таком контроллере используются два одновибратора, которые работают только при наличии потребления тока на выходе преобразователя. Работа цепей ЧИМ основывается на двух постоянных времени — максимальной продолжительности включенного и минимальной продолжительности выключенного состояния ключевого транзистора, а также двух цепях управления — цепи стабилизации напряжения и цепи ограничения максимального импульсного тока.

Для режима ЧИМ характерно также наличие управляющих импульсов переменной частоты. Два одновибратора в цепях управления определяют два характерных временных интервала —  $T_{ON}$  (максимального времени включенного состояния) и  $T_{OFF}$  (минимального времени выключенного состояния). Одновибратор  $T_{ON}$  запускает второй одновибратор. Если компаратор в цепи контроля выходного напряжения обнаруживает, что выходное напряжение выходит за допустимые пределы, снова активируется одновибратор  $T_{ON}$ . Продолжительность его импульса фиксируется на максимальном значении. Это время может быть уменьшено, если детектор им-

Таблица 1. Параметры коммерческих преобразователей постоянного напряжения

Производитель	Модель	$V_i$ , В	$V_o$ , В	$I_o$ , А	$I_i$ ( $I_o = 0$ ), мА	$\eta$ , %	Развязка
TRACOPOWER	TEN 5-1210	12	3,3	1,2	20	77	да
XP Power	JCA0412S03	12	3,3	1,2	38	83	да
RECOM	RW-123.3S	12	3,3	0,7	21	65	да
C&D Technologies	HL02R12S05	12	5	0,4	40	60	да
Bourns	MX3A-12SA	12	3,3	3,0	11	93	нет
RECOM	R-78A3.3-1	12	3,3	1,0	7	81	нет

пульсного значения тока обнаруживает достижение током предельного значения.

Потребление тока контроллером ЧИМ определяется токами утечки элементов схемы и обычно составляет десятки микроампер. Для сравнения, постоянно включенный внутренний тактовый генератор ШИМ-контроллера приводит к потреблению тока порядка нескольких миллиампер.

В таблице 1 приведены технические характеристики коммерческих преобразователей напряжения с аналогичными значениями входного и выходного напряжения и выходного тока.

В этой статье будет показано, как обеспечить потребляемый ток менее 1 мА при напряжении питания 12 В с использованием ЧИМ-контроллера.

Портативные приборы зачастую эксплуатируются в тяжелых условиях, и для питания таких приборов необходимо использовать преобразователи напряжения с гальванической развязкой. Сама развязка обеспечивается силовым трансформатором преобразователя, но значительная проблема состоит в передаче сигнала обратной связи между цепями вторичной и первичной обмоток трансформатора без нарушения гальванической развязки. Традиционный подход в решении этой проблемы — это использование дополнительной обмотки трансформатора или оптрона.

Поскольку для питания прибора обычно применяется аккумуляторная батарея с номинальным напряжением 12 В, а электронные цепи, как правило, питаются напряжением

порядка 3,6 В, в цепях питания традиционно используется понижающий преобразователь напряжения. На рис. 2 приведена принципиальная схема импульсного преобразователя напряжения. Когда цепи управления осуществляют стабилизацию выходного напряжения, для работы оптрона требуется сравнительно постоянный ток в цепи светоизлучающего диода. Минимальное значение тока определяется коэффициентом передачи тока в оптоэлектронном приборе (63% при 10 мА и 22% при 1 мА) и снижением его быстродействия (2 мкс при 20 мА и 6,6 мкс при 5 мА).

В преобразователе постоянного напряжения прецизионный опорный источник  $J3$  применяется в качестве компаратора напряжения и может быть выполнен, например, на микросхеме типа TL431. Однако в реальных условиях эта микросхема практически не может быть использована, поскольку значение опорного напряжения  $V_{REF} = 2,5$  В приводит к напряжению сравнения  $V_{A-Kmin}$ , слишком близкому к номинальному выходному напряжению преобразователя 3,6 В.  $V_{A-Kmin}$  равно  $V_{REF}$  плюс падение напряжения на светоизлучающем диоде оптрона  $J2$ , плюс падение напряжения на резисторе  $R1$ .

Существует несколько различных альтернатив использованию микросхемы TL431. Одна из наиболее подходящих микросхем — MAX8515A. Эта интегральная схема обеспечивает опорное напряжение 0,6 В с отклонением в пределах 1% в диапазоне рабочих температур от  $-40$  до  $+85$  °С. При необходимости обеспечения малого выходного напряжения преобразователя такой источник опорного на-

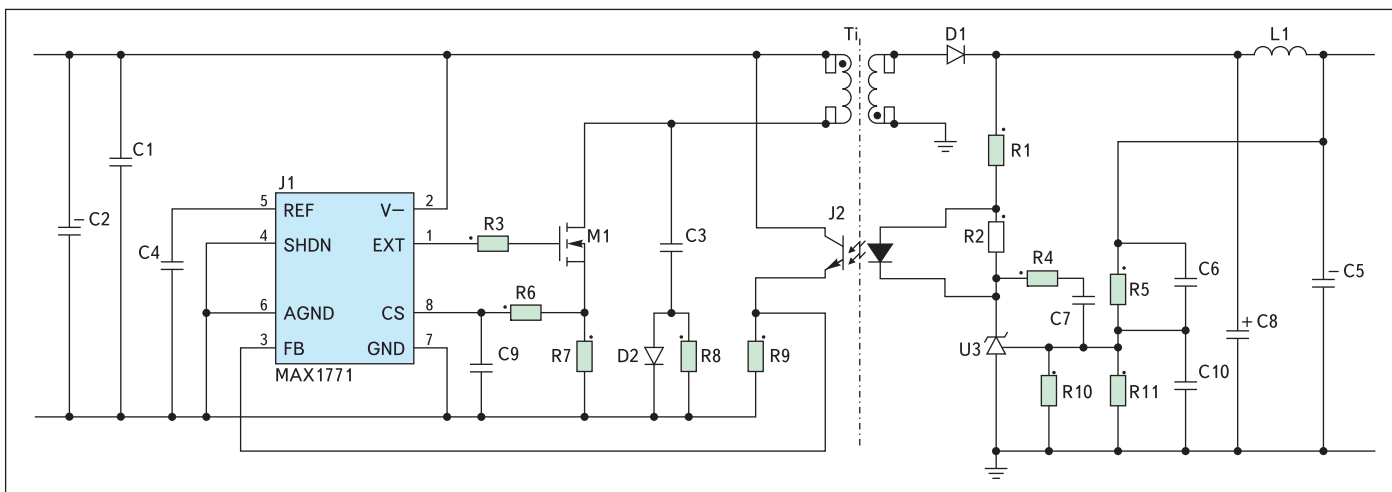


Рис. 2. Принципиальная схема обратноходового преобразователя постоянного напряжения с гальванической развязкой и частотно-импульсной модуляцией

пряжения будет идеальным выбором, поскольку не налагает заметных ограничений на допустимое выходное напряжение. Для рассмотрения в данной статье был выбран источник TLV431С, поскольку он поставляется различными производителями и его параметры достаточно хороши для построения прецизионного низковольтного преобразователя ( $V_{REF} = 1,24$  В с разбросом 1% в диапазоне температур от 0 до 70 °С).

Ток, потребляемый делителем выходного напряжения (резисторы R5 и R11), был выбран на уровне 7 мкА. Поскольку только 0,5 мкА из этого тока потребляется входными цепями источника опорного напряжения, это не приводит к значительному влиянию на выходное напряжение. Благодаря малой входной емкости источника опорного напряжения не возникает и значительной задержки сигнала на выходе делителя напряжения. Это позволило исключить применение емкости делителя, предназначенного для уменьшения влияния входной емкости опорного источника. Транзистор оптрона работает при выходном токе 60 мкА ( $|I_{FB}| < 60$  нА), что соответствует току светодиода оптрона менее 230 мкА (коэффициент передачи тока ~26%).

## Цепи управления

Для построения ЧИМ-контроллера можно использовать ViCMOS микросхему MAX1771. Этот контроллер импульсного преобразователя напряжения обеспечивает формирование всех необходимых временных последовательностей. Интегральная схема обладает значительными преимуществами по сравнению с предшествующими схемами управления с пропуском импульсов. В первую очередь это касается значительно меньших размеров индуктивности, требующейся для работы схемы, благодаря высокой частоте коммутации вплоть до 300 кГц. Кроме того, ЧИМ-контроллер с ограничением тока обеспечивает высокий КПД преобразователя (90% в широком диапазоне токов нагрузки) и обладает потребляемым током не более 110 мкА. В случае применения MAX1771 для построения источника без гальванической развязки она обеспечивает КПД не менее 90% в диапазоне токов нагрузки от 30 мА до 2 А, выходную мощность до 24 Вт и диапазон входных напряжений от 2 до 16,5 В.

Сопротивление в цепи обратной связи по выходному напряжению было выбрано максимально возможным и определялось компромиссом между потребляемым током и стабильностью в цепи ОС. В результате ток, протекающий через делитель выходного напряжения, не превышает 20 мкА. Поскольку фильтрующий конденсатор в цепи питания не имеет идеальных параметров, его ток утечки должен добавляться к потребляемому выходному току. Типовое значение тока утечки электролитического конденсатора обычно не превышает 20 мкА. Для дальнейшего снижения потребля-

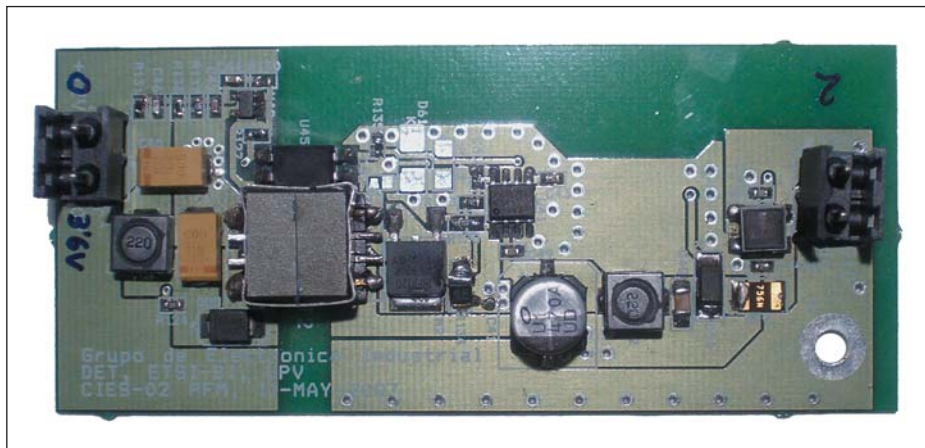


Рис. 3. Фотография верхней стороны печатной платы преобразователя постоянного напряжения с ЧИМ, предназначенного для использования в беспроводной связи

емого тока электролитический конденсатор желательно заменить керамическим со следующими параметрами: емкость 100 мкФ, напряжение 6,3 В, диэлектрик X5R, типоразмер 1206 (Kemet C1206C107M9PAC). Это позволит снизить токи утечки всего до единиц микроампер.

На рис. 3 приведена фотография прототипа преобразователя постоянного напряжения с ЧИМ, который потребляет без нагрузки всего 0,24 мА. Размеры источника не превышают 50×30 мм, и он обеспечивает выходную мощность не менее 3,6 Вт в диапазоне входных напряжений от 10 до 15 В (номинальное значение 12 В). Рабочая частота преобразователя составляет 300 кГц. Преобразователь способен отдавать выходной ток 1 А при стабилизированном выходном напряжении 3,6 В. Источник питания обеспечивает гальваническую развязку между входом и выходом и использует понижающую обратнуюходовую схему преобразователя с токовой и потенциальной обратной связью.

Прототип источника питания можно использовать в различных беспроводных системах, работающих в прерывистом режиме. Пиковое потребление тока может достигать 2 А при максимальном среднем значении 1 А. Для снижения импульсных токов и обеспечения электромагнитной совместимости используются технологии, описанные в [1, 3]. Дополнительно предполагается, что разработчик использует высококачественные конденсаторы с малым последовательным сопротивлением.

Для проверки эксплуатационных параметров источника питания были измерены его характеристики: входное напряжение  $V_I$ , входной ток  $I_I$ , номинальное выходное напряжение  $V_O$ , ток нагрузки  $I_O$  и КПД преобразователя. Измеренные результаты приведены в таблицах 2, 3 и включают потери во входном фильтре и в цепях защиты. Следует также отметить и напомнить, что источники питания малопотребляющих цепей не могут обладать таким же КПД, что и преобразователи питания для больших выходных

Таблица 2. Потребляемый ток при отсутствии нагрузки для различных входных напряжений

$V_{IN}$ , В	$I_{IN}$ , мА	$V_{OUT}$ , В	$I_{OUT}$ , А
10,0	0,244	3,615	0
12,0	0,239	3,615	0
15,0	0,227	3,615	0

токов нагрузки. Преобразователи большой мощности обычно работают в синхронном режиме, что помогает снизить потери в активных элементах схемы.

Ток, потребляемый источником питания, построенным на основе ЧИМ-контроллера, снижен до 0,24 мА. Однако при выбранных номиналах компонентов схемы и при некоторых условиях нагрузки в цепи обратной связи могут возникать паразитные колебания. Чтобы избежать возникновения генерации, разработчик должен принимать во внимание допустимые разбросы компонентов схемы. Так, номиналы резисторов и конденсаторов в цепи обратной связи должны выбираться с особой осторожностью.

В таблице 3 приведены входные и выходные параметры источника питания при различных нагрузках. Оптимальный КПД достигается при нормальных условиях и в пределах номинального значения нагрузки. В этом случае оптимальный КПД составляет 72–75%, а номинальный диапазон нагрузки — от 100 мА до 1 А.

Таблица 3. КПД преобразователя при номинальном входном напряжении и различных нагрузках

$V_{IN}$ , В	$I_{IN}$ , мА	$V_{OUT}$ , В	$I_{OUT}$ , А	КПД, %
12,0	0,24	3,615	0	0
12,0	61	3,615	0,14	69,14
12,0	83	3,615	0,2	72,59
12,0	121	3,615	0,3	74,69
12,0	160	3,615	0,4	75,31
12,0	200	3,615	0,5	75,31
12,0	240	3,615	0,6	75,31
12,0	281	3,615	0,7	75,04
12,0	323	3,615	0,8	74,61
12,0	367	3,615	0,9	73,88
12,0	411	3,615	1	73,30

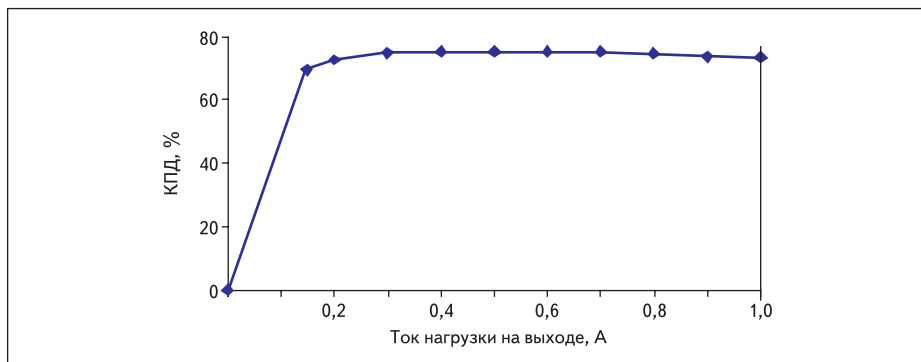


Рис. 4. КПД источника питания при номинальном входном напряжении (12 В) и различных токах нагрузки

КПД преобразователя напряжения при отсутствии нагрузки представлен на графике (рис. 4) нулевым значением. Это вызвано тем, что ток, потребляемый беспроводным устройством в режиме покоя, не превышает 140 мкА при напряжении питания 3,6 В. Это значение пренебрежимо мало по сравнению с током 0,24 мА, потребляемым самим преобразователем при отключенной нагрузке.

На рис. 5 представлены осциллограммы выходного напряжения и сигнала управления при различной нагрузке преобразователя. На графиках видно, как по мере возрастания

тока нагрузки преобразователя возрастает частота повторения импульсов на затворе ключевого транзистора. Осциллограммы напряжений приведены при отсутствии нагрузки и для токов нагрузки 100 и 500 мА и 1 А. Для большей наглядности масштабы напряжения на верхней и нижней осциллограммах различаются в 5 раз. По оси X отложено время, а по оси Y — напряжение.

Первоначальный обзор показывает, что в лучших промышленных преобразователях постоянного напряжения для источников питания с гальванической развязкой потребля-

емый ток обычно составляет около 20 мА. Однако путем незначительных усилий несложно разработать малопотребляющий изолированный источник питания с минимальным потребляемым током. При отсутствии нагрузки такой источник потребляет не более 0,24 мА.

За дополнительной информацией обращайтесь к официальным дистрибьюторам компании Maxim в России: [www.maxim-ic.ru/contact](http://www.maxim-ic.ru/contact).

### Литература

1. Application Note 664, Feedback Isolation Augments Power-Supply Safety and Performance, Maxim Integrated Products, Jan 22, 2001. Available: [www.maxim-ic.com/an664](http://www.maxim-ic.com/an664), EDN issue of June 19, 1997.
2. Garate J. Ig., de Diego J. M. Consequences of Discontinuous Current Consumption on Battery Powered Wireless Terminals. ISIE06, Paris, France, Oct. 2006.
3. de Diego J. M., Garate J. Ig. Improvements of Power Supply Systems in Machine to Machine Modules and Fixed Cellular Terminals with Discontinuous Current Consumption. Digests 9th ICIT06, Mumbai, India, Dec. 2006.
4. Haroun, Lambadiris I., Hafez R. RF System Issues in Wireless Sensor Networks. Microwave Engineering Europe. Issue. Nov. 2005.

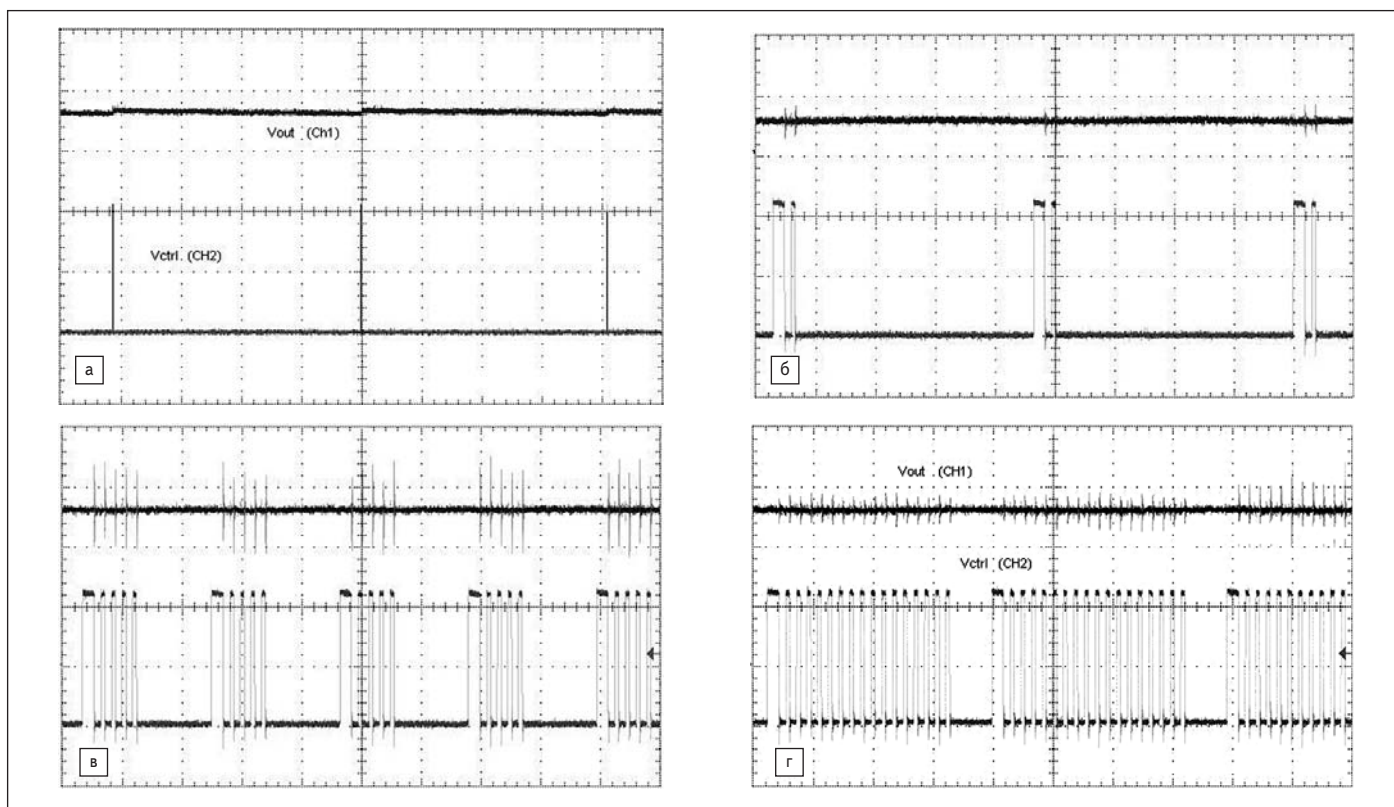


Рис. 5. а) Выходное напряжение и сигнал управления при отсутствии нагрузки (горизонтальный масштаб — 10 мс/деление, вертикальный масштаб — 1 В/деление для канала 1 и 5 В/деление для канала 2); б) выходное напряжение и сигнал управления при токе нагрузки 0,1 А (горизонтальный масштаб — 20 мс/деление, вертикальный масштаб — 1 В/деление для канала 1 и 5 В/деление для канала 2); в) выходное напряжение и сигнал управления при токе нагрузки 0,5 А (горизонтальный масштаб — 20 мс/деление, вертикальный масштаб — 1 В/деление для канала 1 и 5 В/деление для канала 2); г) выходное напряжение и сигнал управления при токе нагрузки 1 А (горизонтальный масштаб — 20 мс/деление, вертикальный масштаб — 1 В/деление для канала 1 и 5 В/деление для канала 2)

5. Joosting J. -P. Power dissipation could limit smart-phone performance. *Microwave Engineering Europe*. Issue. Apr. 2006. [www.mwee.com](http://www.mwee.com).
6. MAX1649/MAX1651, 5V/3.3V or Adjustable, High-Efficiency, Low-Dropout, Setp-Down DC-DC Controllers. Maxim Integrated Products, Datasheet 10-0305, Rev. 2; 9/95.
7. MAX1771, 12V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ, Step-Up DC-DC Controller. 2002 Maxim Integrated Products, Datasheet 19-0263; Rev. 2; 3/02.
8. Garate J. Ig., de Diego J. M., Monsalve J. Ultra Low Input Current Consumption Power Supplies. ISIE07, Vigo, Spain. Jun. 2006.
9. Garate J. Ig., de Diego J. M., Monsalve J. Sistemas de transmisión discontinua. FAC aisladas y de muy bajo consumo en vacío // *Mundo Electrónico*. Octubre 2007.
10. Erikson R. W. *Fundamentals of Power Electronics*, 1st Edition. New York: Chapman and Hall, 1997.
11. Arbetter B., Erikson R., Maksimovic D. DC-DC converter design for battery-operated systems // *Proceeding of IEEE Power Electronic Specialist Conference*. 1995.
12. Sahu B., Rincora G.A. A Low Voltage, Non-Inverting, Dynamic, Synchronous Buck-Boost Converter for Portable Applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2. Feb. 2004.
13. Rincora G. A., Allen P. E. A Low-Voltage, Low Quiescent Current, Low Drop-Out Regulator // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 1. Jan. 1998.
14. Maksimovic D. Power management model and implementation of power management ICs for next generation wireless applications. Tutorial presented at the International Conference on Circuits and Systems (ISCAS), 2002.
15. *Data acquisition linear devices databook*. Vol. 3. National Semiconductor Corporation, 1989.
16. TPS62110 TPS62111 TPS62112, 17-V, 1.5-A, Synchronous Step-Down Converter. Copyright 2006, Texas Instruments Inc., SLVS585. July, 2005.