



УДК 621.396.96

В. К. Битюков, В. А. Петров, А. А. Сотникова

## Работа инвертирующего *DC-DC* преобразователя с накачкой заряда и *LDO* в микросхеме *LM27762*

Представлены результаты исследований работы инвертирующего *DC-DC* преобразователя с накачкой заряда и *LDO*, находящихся в составе комбинированного двухполярного источника вторичного электропитания *LM27762*. Измерения охватывали два режима, входящих с запасом в диапазон нормированных параметров с входными напряжениями, равными 3,5 и 5,5 В, и выходными напряжениями –1,8 и –4,9 В соответственно, а также режим с входным напряжением 5,0 В и выходным –4,7 В с разницей входного и выходного напряжения, не превышающей нормированного предела падения напряжения на *LDO*. Измерялись пульсации напряжений при различных токах нагрузки от 15 до 250 мА на положительном и отрицательном полюсах летающего конденсатора, на выходе из системы накачки заряда и в последнем случае также на выходе микросхемы. На основе полученной информации впервые показано, как при малых токах нагрузки примерно до 100 мА система накачки заряда работает в режиме пачек импульсов, а при больших токах – в режиме накачки заряда с постоянной частотой.

**Ключевые слова:** микросхема, *DC-DC* преобразователь, накачка заряда, инвертор, летающий конденсатор, *LDO*, режим пачки импульсов, режим постоянной частоты.

### Введение

Малошумящие источники вторичного электропитания находят все более широкое применение в портативных мобильных устройствах, таких как медицинское оборудование, переносная измерительная техника, беспроводные системы связи, наушники и др. Первичным источником электроэнергии при этом в большинстве случаев являются литий-ионные батареи или перезаряжаемые аккумуляторы. Помимо обеспечения малых габаритов к микросхемам источников вторичного электропитания предъявляются высокие требования по стабильности выходного напряжения, малым его пульсациям и большим значениям КПД преобразователя. Одним из видов микросхем, обеспечивающих получение стабилизированного напряжения положительной или отрицательной полярностей, являются микросхемы с накачкой заряда.

Большинство производителей электронных компонентов предлагает микросхемы, предназначенные для построения либо повышающих, либо понижающих, либо полярно-инвертирующих преобразователей. И лишь небольшое число микросхем можно использовать для получения регулируемого однополярного стабилизированного напряжения как в режиме понижения, так и в режиме повышения входно-

го напряжения. Анализ работы подобных микросхем представлен в статьях [1–5].

Основными недостатками разработанных в начале 2000-х гг. и выпускаемых вплоть до настоящего времени микросхем, использующих классическую технологию накачки заряда, являются достаточно большая пульсация выходного напряжения, обычно составляющая 20...40 мВ, и значительное уменьшение КПД при отклонениях соотношений между входным и выходным напряжениями от оптимальных. Попытки уменьшить пульсации выходного напряжения и увеличить КПД при различных режимах предпринимались неоднократно. В микросхеме однополярного *DC-DC* преобразователя *LTC3245* (*Linear Technology*), согласно опубликованной в 2013 г. информации [6], система накачки заряда, в отличие от классической схемы, может работать в двух режимах. Режим с низкими пульсациями выходного напряжения реализуется с помощью постоянной частоты накачки заряда. При этом в системе стабилизации выходного напряжения используются два компаратора. Каждый компаратор имеет регулируемое смещение, значение которого увеличивается (уменьшается) пропорционально увеличению (уменьшению) тока нагрузки. Тем самым стабилизация выходного напряжения достигается за счет регулирования количества заряда, переносимого за цикл. Пульсации выходного напряжения в этом режиме не превышают 20 мВ. Однако при

низких токах нагрузки в режиме с постоянной частотой накачки заряда существенно уменьшается КПД. Для его увеличения микросхему можно перевести в режим накачки с помощью пачек импульсов (*BURST MODE*). Переход от одного режима накачки к другому может быть осуществлен путем подачи на вывод *BURST* микросхемы логического сигнала высокого или низкого уровня. Необходимо отметить, что в режиме пачек импульсов увеличение КПД одновременно сопровождается увеличением пульсаций выходного напряжения, которые, согласно работе [6], типично составляют 50 мВ.

Микросхемы двухполярных *DC-DC* преобразователей, в которых используется накачка заряда, появились совсем недавно. В поисковых системах и материалах компаний, производящих электронные компоненты, удалось найти ссылки лишь на две микросхемы. Из результатов поиска следует, что первой из них была комбинированная микросхема *LTC3260* (*Linear Technology*) [7]. Отрицательное напряжение вырабатывает инвертор с накачкой заряда, за которым следует *LDO* (линейный стабилизатор с малым падением напряжения), а положительное выходное напряжение вырабатывает *LDO* положительного напряжения. В этой микросхеме система накачки заряда в тракте получения отрицательного напряжения, аналогично *LTC3245*, для повышения КПД работает в режиме пачек импульсов при малых токах нагрузки и в режиме постоянной частоты при больших токах нагрузки. *LDO* в тракте отрицательного напряжения уменьшает пульсации напряжения на выходе, что особенно важно для режима пачек. Согласно приводимым в работе [7] данным, соответствующая амплитуда пульсаций на выходе микросхемы менее 10 мВ.

Более поздней разработкой двухполярного комбинированного источника электропитания, в котором используется накачка заряда, является микросхема *LM27762* (*Texas Instruments*), исследованная в настоящей работе.

Статья является продолжением цикла работ [1–5], в которых исследовались однополярные *DC-DC* преобразователи с накачкой заряда. Она отражает результаты первого этапа исследований двухполярных источников вторичного

электропитания с накачкой заряда, причем в ней рассматривается только выработка отрицательного напряжения.

### Объект исследований и методика измерений

В технических характеристиках *LM27762* указан возможный диапазон входного напряжения от 2,7 до 5,5 В [8], при этом преобразователь позволяет получать одновременно два выходных напряжения положительной и отрицательной полярности в пределах от 1,5 до 5 В при токах нагрузки до 250 мА. Для выработки нужной величины положительного напряжения используется *LDO*. Отрицательное напряжение получают с помощью инвертора, за которым следует *LDO*. В настоящей статье рассмотрена работа только той части микросхемы, которая служит для получения выходного напряжения отрицательной полярности.

Использованный в *LM27762* принцип работы системы накачки заряда с инвертированием напряжения [8] показан на рис. 1. Схема инвертора имеет три внешних конденсатора – входной  $C_{in}$ , летающий  $C_1$  и стоящий перед *LDO* конденсатор  $C_{cpout}$ , иногда обозначаемый в [8] как  $C_{cp}$ . Инвертируемое входное напряжение  $V_{in}$  берется с входного конденсатора  $C_{in}$ . Заряд с помощью четырех ключей  $S1...S4$  и летающего конденсатора  $C_1$  переносится на конденсатор  $C_{cpout}$ . Цикл переноса состоит из двух стадий. На первой происходит заряд летающего конденсатора  $C_1$  от входного напряжения на  $C_{in}$  при замыкании ключей  $S1$  и  $S3$ , во второй происходит перенос заряда от  $C_1$  к  $C_{cpout}$  при замыкании ключей  $S2$  и  $S4$ . Поскольку при этом

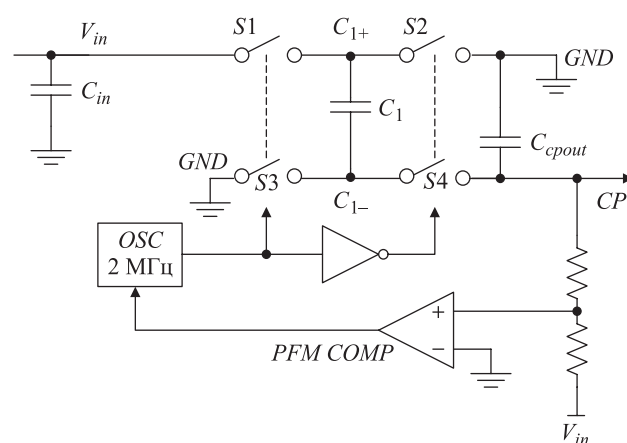


Рис. 1. Принцип инвертирования напряжения [8]



положительный полюс  $C_{cpout}$  подсоединен к земле, напряжение на его отрицательном полюсе, близкое к значению  $-V_{in}$ , подается на выход и на систему регулирования через цепь обратной связи. Алгоритм работы системы регулирования в [8] не описан. Определение этого алгоритма было одной из целей настоящей работы.

В соответствии с [8] тактовая частота системы накачки заряда отрицательного выходного напряжения составляет 2 МГц. Такая высокая тактовая частота позволяет уменьшить выходное сопротивление и пульсации напряжения [8]. К сожалению, приводимая в [8] таблица электрических характеристик микросхемы очень ограничена и представленные в ней сведения даны лишь для одного случая схемной реализации, в котором входное напряжение  $V_{in} = 5$  В, входной и оба выходных конденсатора  $C_{in} = C_{out+} = C_{out-} = 2,2$  мкФ, летающий конденсатор  $C_1 = 1$  мкФ, а конденсатор  $C_{cpout} = 4,7$  мкФ. В соответствии с таблицей [8], падение напряжения на отрицательном LDO, приведенное лишь для одного тока нагрузки 100 мА и одного выходного напряжения  $-5$  В, составляет 30 мВ. Из представленных в виде графиков крайне ограниченных типичных характеристик можно лишь заключить, что величины падения напряжения на LDO очень сильно зависят от тока нагрузки и при 250 мА могут достигать 100 мВ, а пульсации выходного напряжения (напряжения на выходе LDO) составляют от 1 до 3 мВ.

Анализируя все характеристики микросхемы LM27762, приведенные в [8], нужно отметить, что их явно недостаточно как для определения алгоритмов ее работы в различных режимах, так и для вычисления пульсаций напряжения в различных точках ее схемы включения. Это и было основной целью исследований, проведенных в настоящей работе.

При проведении этих исследований была важна возможность получения от производителя LM27762 готовой тестовой платы – тестового модуля LM27762EVM [9]. Принципиальная электрическая схема этого модуля и размещение контрольных точек для подключения измерительных приборов показаны на рис. 2.

Поскольку главными причинами возникновения пульсаций напряжения в микросхеме LM27762 являются накачка заряда и система регулирования величины отрицательного выходного напряжения, в настоящей работе им было уделено основное внимание. Для изучения этих причин использовались измерения временных зависимостей напряжения на положительном  $U_{fyDC+}$  и отрицательном  $U_{fyDC-}$  полюсах летающего конденсатора  $C_1$  емкостью 1 мкФ при открытых входах осциллографа, а также переменная составляющая  $U_{out-}$  напряжения на конденсаторе  $C_{cpout}$  емкостью 4,7 мкФ (см. рис. 1 и 2) при закрытом входе осциллографа. Напряжение на этом конденсаторе является напряжением на выходе из системы регулирования накачки заряда. Оно поступает на вход LDO отрицательного выходного напряжения.

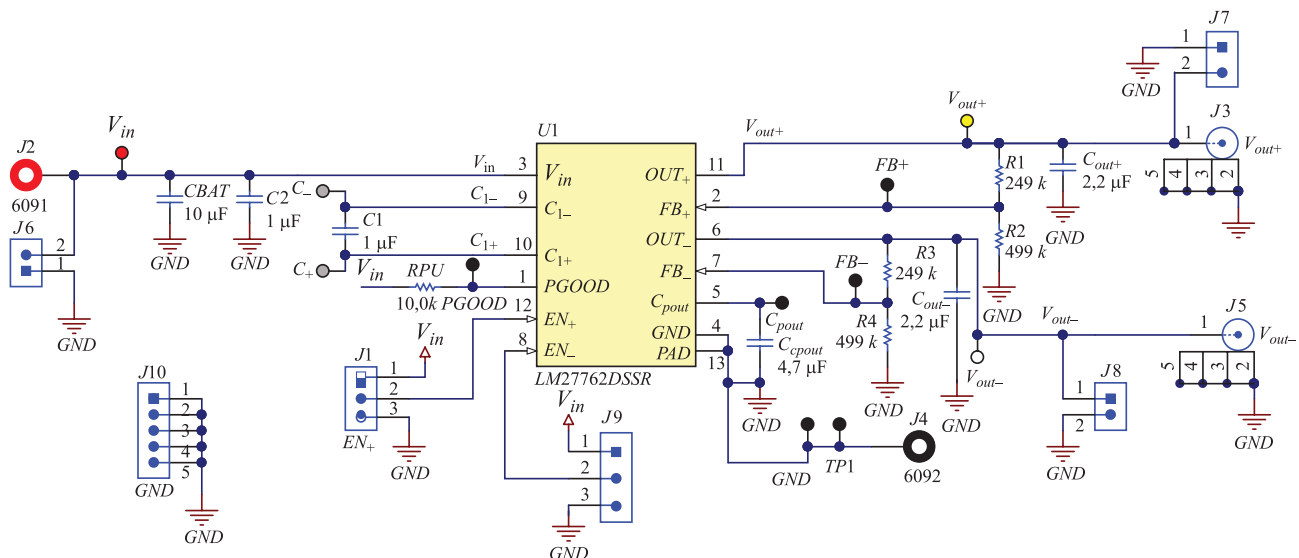


Рис. 2. Схема платы модуля LM27762EVM [9]

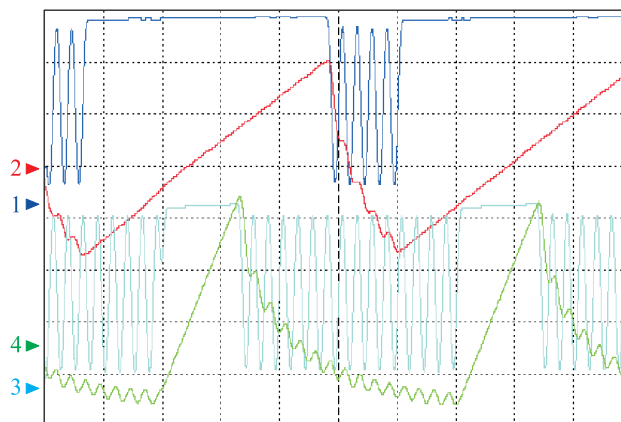
Формы напряжений регистрировали осциллографом *GDS-72202* компании *GW instek* с использованием программного обеспечения *FreeWave*. В качестве триггера обычно применялось напряжение  $U_{fly}$ . Для обеспечения высокого качества регистрации сигналов использовались имеющиеся в осциллографе *GDS-72202* возможности цифровой фильтрации и однократного запуска.

В настоящей работе были проведены исследования работы микросхемы *LM27762* в трех различных режимах. Один из них был реализован на стандартном модуле *LM27762EVM* в состоянии поставки, когда в системе регулирования в качестве делителя напряжения для цепи обратной связи используются резисторы 249 кОм и 499 кОм, как показано на рис. 2. Такой делитель обеспечивает на обоих выходах напряжение 1,8 В. С целью реализации типового режима работы микросхемы в качестве входного для этого режима использовалось напряжение 3,5 В.

Проведение измерений в двух других режимах было направлено на изучение работы микросхемы в предельных случаях при больших входных и выходных напряжениях. Эти режимы хотя и называются предельными, однако не выходят за границы, установленные в технической документации [8]. Один из них был реализован при входном напряжении 5,5 В и выходном напряжении –4,9 В, а второй при входном напряжении 5,0 В и выходном напряжении, которое с увеличением тока нагрузки уменьшалось –4,70 до –4,07 В. Реализация этих двух режимов была осуществлена путем замены резисторов в цепи обратной связи на резисторы сопротивлением 82 кОм и 249 кОм.

### Результаты экспериментов

**Режим  $U_{in} = 3,5$  В,  $U_{out} = -1,8$  В.** Режим характеризуется большой разницей величин входного и выходного напряжений. На рис. 3 в качестве примера представлены некоторые результаты измерения для сравнительно малых токов нагрузки, равных 15 и 50 мА. В левом поле рисунка показаны нулевые уровни сигналов. Здесь и далее нечетные цифры соответствуют напряжениям на положительном или отрицательном полюсе летающего конденсатора, а четные – переменной

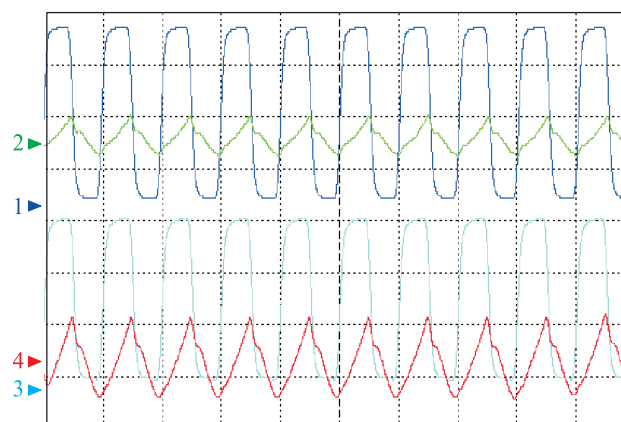


**Рис. 3.** Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (1 В/дел) и  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при различных токах нагрузки: 1, 2 – 15 мА; 3, 4 – 50 мА

составляющей напряжения на выходе системы накачки заряда. При этих измерениях использовался цифровой отрезающий фильтр с частотой 10 МГц.

Для тока нагрузки 15 мА хорошо видны пять циклов разряд – заряд летающего конденсатора и соответствующие им ступеньки на  $U_{out-}$ . При токе нагрузки 50 мА число циклов разряд – заряд летающего конденсатора увеличилось до 15, а промежуток между пачками переноса заряда значительно уменьшился. По мере дальнейшего увеличения тока нагрузки промежуток времени между пачками импульсов разряд – заряд летающего конденсатора становится еще меньше и при некотором токе совсем исчезает.

На рис. 4 сравниваются формы сигналов при токах 100 мА и 250 мА. При этих токах циклы разряд – заряд летающего конденсато-

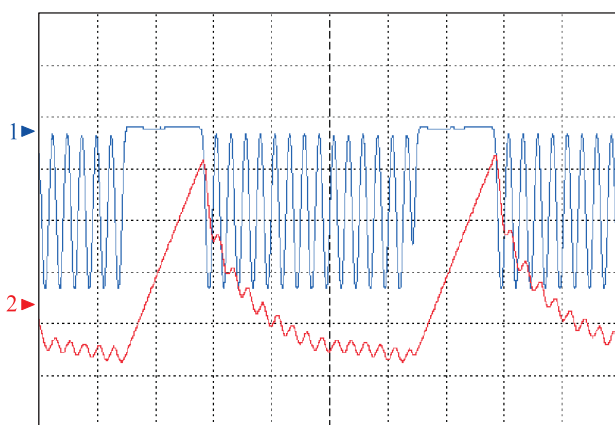


**Рис. 4.** Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (1 В/дел) и  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при различных токах нагрузки: 1, 2 – 100 мА; 3, 4 – 250 мА

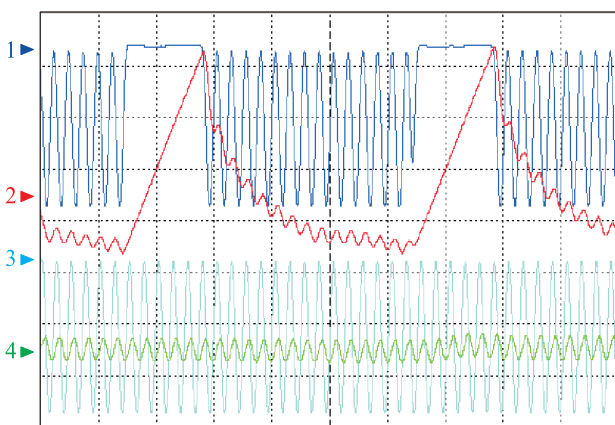


ра происходят с постоянной частотой, равной 2 МГц.

Наряду с регистрацией форм сигналов  $U_{fyDC+}$  на положительном полюсе летающего конденсатора в работе проводили регистрацию форм  $U_{fyDC-}$  и на его отрицательном полюсе. На рис. 5 показаны формы для тока нагрузки 50 мА. Видно, что результаты хорошо соответствуют данным, показанным на рис. 3 (кривые 3 и 4). На рис. 6 представлено сравнение форм сигналов при токах нагрузки 50 и 100 мА (накачка пачками импульсов и накачка с постоянной частотой).

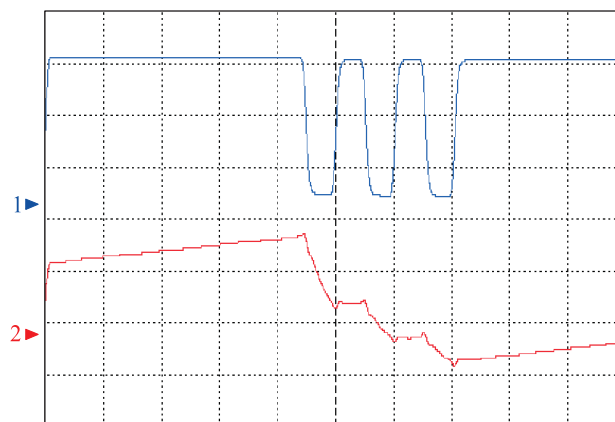


**Рис. 5.** Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений: 1 –  $U_{fyDC-}$  (1 В/дел); 2 –  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при токе нагрузки 50 мА



**Рис. 6.** Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{fyDC-}$  (1 В/дел) и  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при различных токах нагрузки: 1, 2 – 50 мА; 3, 4 – 100 мА

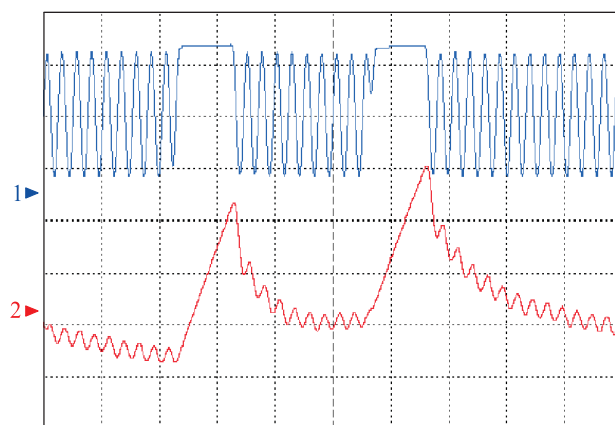
**Режим  $U_{in} = 5,5 В, U_{out} = -4,9 В$ .** Проведенные измерения показали, что при токе нагрузки 15 мА в пачках всего три цикла импульсов разряд – заряд летающего конденсатора (рис. 7), в то время как при токе нагрузки 50 мА



**Рис. 7.** Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений: 1 –  $U_{fyDC+}$  (2 В/дел); 2 –  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при токе нагрузки 15 мА

наблюдалось 5 циклов, причем за время накачки уменьшение  $U_{out-}$  составляло соответственно 125 и 160 мВ.

При токе нагрузки 100 мА имеет место разное число циклов разряд – заряд в разных пачках. Это видно на рис. 8. Режим близок к состоянию перехода от накачки пачками импульсов к накачке с постоянной частотой.



**Рис. 8.** Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений: 1 –  $U_{fyDC+}$  (2 В/дел); 2 –  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при токе нагрузки 100 мА

На рис. 9 показано сравнение форм сигналов при токах 153 и 220 мА. Импульсы следуют с одной и той же частотой, но их амплитуда при токе нагрузки 220 мА немного больше.

В связи с тем что во многих случаях применения комбинированных  $DC-DC$  преобразователей, сочетающих накачку заряда с  $LDO$ , большое значение имеют пульсации выходного напряжения (см. рис. 2), проведены измерения таких пульсаций как при работе системы накач-

ки заряда в режиме пачек (малые токи нагрузки), так и при накачке с постоянной частотой (большие токи нагрузки). Два примера полученных результатов показаны на рис. 10 и 11. Видно, что в режиме пачек размах пульсаций выходного на-

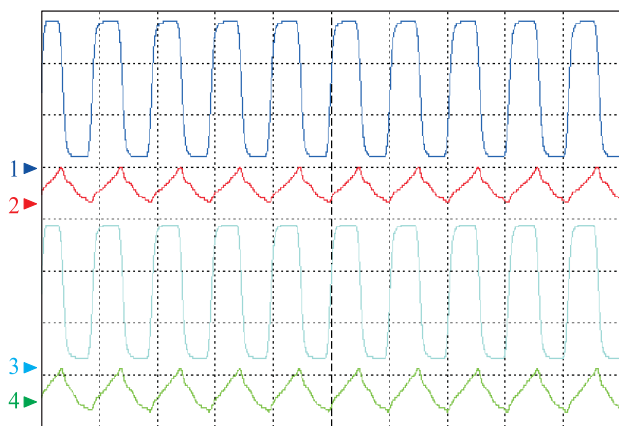


Рис. 9. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при различных токах нагрузки: 1, 2 – 153 мА; 3, 4 – 220 мА

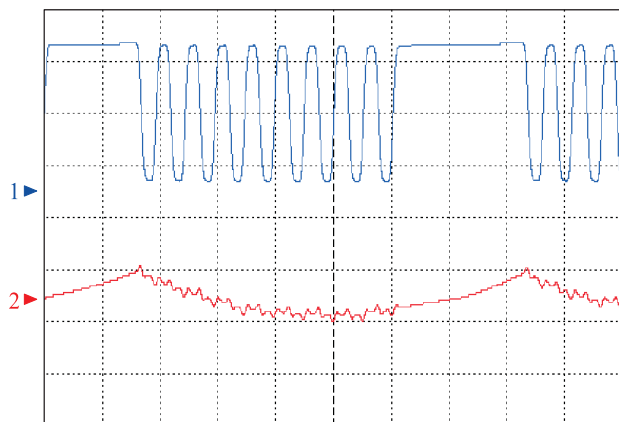


Рис. 10. Формы сигналов (1 мкс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (2 В/дел) и  $V_{out-}$  (20 мВ/дел) при токе нагрузки 90 мА

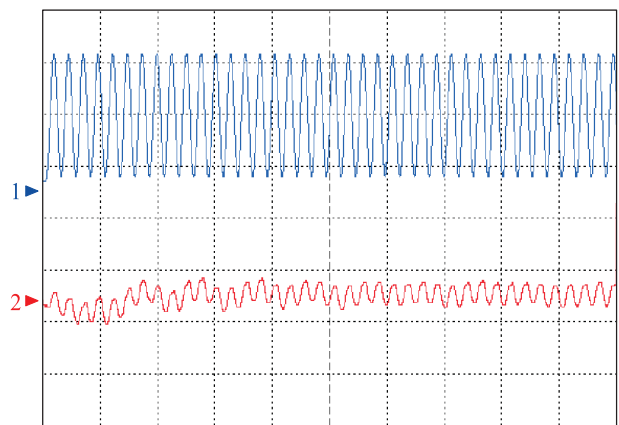


Рис. 11. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (2 В/дел) и  $V_{out-}$  (20 мВ/дел) при токе нагрузки 157 мА

пряжения составляет около 18 мВ, их период – около 7 мкс, а в режиме с постоянной частотой (2 МГц) размах напряжения пульсаций 7 мВ.

**Режим  $U_{in} = 5,0$  В,  $U_{out} = -4,7$  В.** В соответствии с данными производителя микросхемы LM27762 [8] при выходном напряжении –5 В и токе нагрузки 100 мА падение напряжения на  $V_{LDO-}$  должно составлять 30 мВ. В этой связи для исследований был выбран режим, близкий к предельному. Именно в этом случае при тех же резисторах в цепи обратной связи при отсутствии нагрузки на выходе установилось напряжение, равное не –4,9 В, как было для предыдущего режима, а –4,7 В.

Проведенные измерения показали, что при отсутствии нагрузки в пачках было всего три цикла переноса разряд – заряд, при этом промежуток времени между двумя последовательными пачками составлял около 150 мкс.

При токе нагрузки 50 мА было шесть циклов переноса разряд – заряд, при этом промежуток времени между пачками был около 5 мкс.

При токе нагрузки 147 мА не было пачек, циклы разряд – заряд следовали непрерывно, а напряжение на выходе микросхемы понизилось до –4,44 В. При токе нагрузки 239 мА напряжение понизилось до –4,11 В. На рис. 12 показано сравнение форм сигналов для токов нагрузки 147 мА и 239 мА.

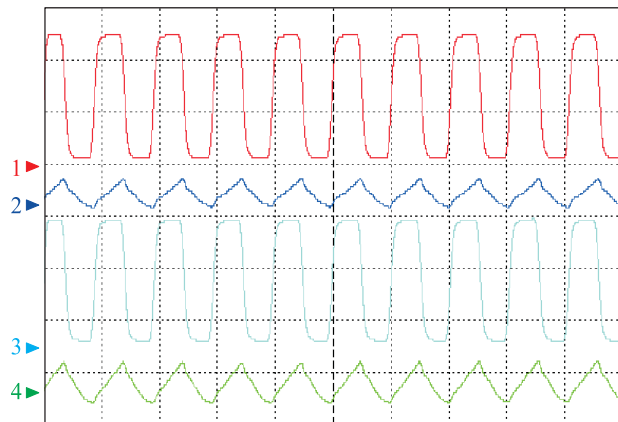


Рис. 12. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при различных токах нагрузки: 1, 2 – 147 мА; 3, 4 – 239 мА

### Анализ полученных экспериментальных результатов

Экспериментальные результаты исследований инвертирующего DC-DC преобразователя



микросхемы *LM27762* позволяют заключить, что имеющиеся в технической документации [8] сведения о ее работе являются неполными, а иногда и неточными. Из описания микросхемы нельзя представить алгоритм ее работы в различных режимах. К такой информации, имеющейся в [8], относятся лишь два коротких замечания. Первым является примечание к таблице с электрическими характеристиками: «при входном напряжении 5,5 В накачка заряда может войти в режим ШИМ в горячих условиях» [8]. Второе замечание относится к работе с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ): «Для того чтобы минимизировать ток покоя во время работы с легкими нагрузками, *LM27762* разрешает ЧИМ или работу с пропуском импульсов. Давая возможность системе накачки делать меньше переключений, когда выходной ток низкий, ток покоя, отбираемый от источника питания, минимизируется. Частота пульсирующей работы не ограничивается и может падать в суб-2-кГц-диапазон, когда нет нагрузки. Когда нагрузка увеличивается, частота импульсной работы повышается до тех пор, пока она не переходит к постоянной частоте. Фундаментальная частота переключений в *LM27762* составляет 2 МГц» [8]. Никаких зарегистрированных форм сигналов в [8] не приводится.

Из полученных в настоящей работе результатов следует, что переход в ШИМ-модуляцию при входном напряжении 5,5 В не наблюдается. Ни в каком режиме работы микросхемы в системе накачки заряда ЧИМ не используется. Везде частота цикла разряд – заряд составляет 2 МГц. При относительно малых токах нагрузки при любых значениях входных и выходных напряжений (исключая ситуации, когда входное напряжение превышает выходное на величину, меньшую падения напряжения на *LDO*) система накачки заряда работает в режиме пачки импульсов, в которой частота циклов разряд – заряд составляет 2 МГц. Количество импульсов в пачке зависит от тока нагрузки и верхнего и нижнего порога срабатывания системы регулирования, которая сравнивает напряжение обратной связи с опорным напряжением. Полученные результаты показывают, что разница между верхним и нижним порога-

ми срабатывания большая. В результатах для входного напряжения 3,5 В и выходного –1,8 В, показанных на рис. 3, при токах нагрузки 15 и 50 мА она составляет примерно 75 мВ. В результатах для входного напряжения 5,5 В и выходного –4,9 В, показанных на рис. 7, при токе нагрузки 15 мА она составляет примерно 125 мВ. При токе нагрузки 50 мА она составляет примерно 160 мВ. Это очень большие значения, но использование *LDO* после системы накачки заряда позволяет снизить пульсации выходного напряжения до малых значений порядка 18 мВ, что, несомненно, является большим достижением.

Необходимо отметить, что режим пачки импульсов при накачке заряда в случае малых токов нагрузки, по-видимому, впервые был применен компанией *Linear Technology* в преобразователе *LTC3245* [6, 7] и получил название *Burst Mode® Operation*. Применение пачки импульсов накачки при малых токах в [6] реализовано на основе совместного использования обычной системы регулирования накачки по верхнему и нижнему пределам совместно с контролем и регулированием заряда, переносимого за один цикл. Когда преобразователь *LTC3245* находится в *Burst Mode® Operation*, при легких нагрузках за один цикл переносится минимальное количество заряда. Регулировка тока заряда в пачке позволяет без использования *LDO* держать пульсации выходного в пределах 50 мВ.

Производитель микросхемы *LM27762* не называет алгоритм ее работы при малых токах режимом пачки, но из измерений авторов статьи следует, что в данной микросхеме используется именно такой режим. Однако пульсации напряжения на выходе из системы накачки заряда у *LM27762*, во-первых, много больше, чем у *LTC3245*, и, во-вторых, они зависят от тока нагрузки. Заряд, передаваемый за один цикл в режиме пачки, может зависеть от ряда факторов, в частности, от сопротивления ключей, характеристик использованных конденсаторов, величины напряжения на входе в инвертор и др. Поэтому контроль за количеством передаваемого заряда или за током при такой передаче является очень важным. По-видимому, в *LM27762* такого контроля нет. Здесь осущест-



вляется лишь постоянный контроль величины выходного напряжения. Именно этим можно объяснить полученные в настоящей работе и показанные на некоторых рисунках неполные последние циклы разряд – заряд (см. рис. 5, 6, 8).

Важным разделом, связанным с алгоритмом работы микросхемы *LM27762*, является ее переход при увеличении тока нагрузки от режима пачек к режиму накачки с постоянной тактовой частотой 2 МГц. Здесь возникают два вопроса. Первый – об условии перехода, а второй – о том, за счет чего поддерживается постоянное напряжение на выходе при увеличении тока нагрузки. Из полученных в настоящей работе результатов видно, как с увеличением тока нагрузки при работе в режиме пачек уменьшаются промежутки времени между пачками и система в режим постоянной частоты накачки переходит плавно.

Что касается поддержания постоянным напряжения на выходе в случае постоянной частоты накачки, то из зарегистрированных форм  $U_{out}$  видно, что с увеличением тока нагрузки амплитуда пульсаций этого напряжения лишь немного увеличивается. Здесь поддержание выходного напряжения постоянным обеспечивается за счет *LDO*. Когда запас по напряжению на входе *LDO* мал, как это было в режиме с  $U_{in} = 5,0$  В и  $U_{out} = -4,7$  В, с увеличением тока нагрузки выходное напряжение уменьшается.

В заключение необходимо отметить, что в статье отражены результаты первого этапа работы по экспериментальным исследованиям пульсаций двухполярных комбинированных *DC-DC* преобразователей с накачкой заряда. Этот этап относится к выработке напряжения отрицательной полярности. В дальнейшем предполагается получить необходимые результаты для вырабатываемого напряжения положительной полярности и провести достаточно полное моделирование работы преобразователя в целом.

Представленные в статье результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации

№ 8.5577.2017/8.9 на выполнение проекта по теме «Исследование шумовых характеристик и пульсаций микросхем мобильных источников вторичного электропитания».

#### Список литературы

1. Битюков В. К., Иванов А. А., Миронов А. В., Михневич Н. Г., Перфильев В. С., Петров В. А. Стенд для исследования характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 3. С. 37–52.
2. Битюков В. К., Иванов А. А., Миронов А. В., Михневич Н. Г., Перфильев В. С., Петров В. А. Исследование характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда // Радиотехника. 2017. № 2. С. 126–134.
3. Битюков В. К., Миронов А. В., Михневич Н. Г., Петров В. А. Работа системы накачки заряда *DC-DC* преобразователя *MAX1759* в режиме повышения напряжения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 1. С. 48–59.
4. Битюков В. К., Петров В. А., Сотникова А. А. Работа системы накачки заряда *DC-DC* преобразователя *MCP1253* в режиме понижения напряжения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2018. № 1. С. 10–21.
5. Битюков В. К., Петров В. А., Сотникова А. А. Алгоритм работы микросхемы *DC-DC* преобразователя *MCP1253* в режиме повышения напряжения // Радиотехника. 2018. № 9. С. 178–184.
6. Wide VIN Range, Low Noise, 250 mA Buck-Boost Charge-Pump *LTC3245*. Datasheet 3245fa // Linear Technology. 2013. Pp. 1–18.
7. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump *LTC3260*. Datasheet 3260fa // Linear Technology. 2012. Pp. 1–19.
8. *LM27762* Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus *LDO*. Datasheet SNVSAF7B // Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). Pp. 1–29.
9. Using the *LM27762EVM* Evaluation Module. User's Guide, SNVU534 // Texas Instruments Incorporated. 2016. Pp. 1–19.

Поступила 27.02.19





**Битюков Владимир Ксенофонтович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва.

Область научных интересов: физика и схемотехника устройств радиоэлектроники, методы и средства бесконтактного контроля их теплового состояния.

**Петров Вадим Александрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва.

Область научных интересов: мобильные источники вторичного электропитания, автоматизация экспериментальных исследований, теплофизические и терморрадиационные характеристики материалов.

**Сотникова Анастасия Александровна** – студент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва.

Область научных интересов: мобильные источники вторичного электропитания.

## Operation of an inverting *DC-DC* converter with charge pumping and *LDO* in the *LM27762* microcircuit

The paper focuses on the study of operation of an inverting *DC-DC* converter with charge pumping and *LDO*, which are the part of the combined bipolar secondary power supply *LM27762*. The measurements covered two modes amply included in the range of normalized parameters with input voltages equal to 3.5 and 5.5 V, and output voltages 1.8 and 4.9 V, respectively, as well as the mode with an input voltage of 5.0 V and an output voltage 4.7 V, with a difference in the input and output voltage not exceeding the normalized limit of the voltage drop across *LDO*. Pulsations of voltages were measured at various load currents from 15 to 250 mA at the positive and negative poles of the flying capacitor, at the output of the charge pumping system and, in the latter case, also at the output of the microcircuit. Based on the results obtained, it was shown for the first time how at low load currents up to about 100 mA the charge pumping system operates in the burst mode, and at higher currents, it operates in the charge pumping mode with a constant frequency.

**Keywords:** microcircuit, *DC-DC* converter, charge pumping, inverter, flying capacitor, *LDO*, burst mode, constant frequency mode.

**Bitjukov Vladimir Ksenofontovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Telecommunications and Radio Engineering, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “MIREA – Russian Technological University”, Moscow.

Science research interests: physics and circuit design of radio-electronic devices, methods and means of noncontact control of their thermal state.

**Petrov Vadim Aleksandrovich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Telecommunications and Radio Engineering, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “MIREA – Russian Technological University”, Moscow.

Science research interests: mobile secondary power sources, automation of experimental studies, thermo-physical and thermo-radiation performance of materials.

**Sotnikova Anastasiya Aleksandrovna** – student, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “MIREA – Russian Technological University”, Moscow.

Science research interests: mobile secondary power sources.