



Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762

**В.К. Битюков,
Н.Г. Михневич,
В.А. Петров[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: vapetrov@mirea.ru

Представлены результаты моделирования работы микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762 с помощью программного обеспечения WEBENCH *Power Designer*, разработанного компанией-производителем *Texas Instruments*. Расчеты проведены непосредственно на сайте компании. При выполнении экспериментальных исследований была использована полученная от производителя микросхемы LM27762 готовая тестовая плата – тестовый модуль LM27762EVM. Наличие тестовой платы, модели и программного обеспечения, созданных производителем микросхемы, снимает все проблемные вопросы сопоставления результатов моделирования с результатами эксперимента, которые могут быть связаны с использованием компонентов схемы с отличающимися характеристиками и влиянием разводки платы. В технической документации на микросхему отсутствует информация о характеристиках использованных в микросхеме ключей и конденсаторов. К сожалению, нет и описания разработанной модели. Основное внимание уделено влиянию токов нагрузки на пульсации отрицательного напряжения на выходе системы накачки заряда и выходе микросхемы. Моделирование показало, что уже при токе нагрузки 40 мА система регулирования переходит в режим работы с постоянной частотой накачки заряда, в то время как согласно результатам экспериментов, система регулирования продолжает работать в режиме пачек импульсов и при большем токе 50 мА. Для такого тока пачка состоит из 15 импульсов переноса заряда, промежутки между пачками составляют 3 мкс, а увеличение отрицательного напряжения за пачку импульсов также составляет примерно 75 мВ. Выполнено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов. Показано, что созданная производителем модель работы микросхемы LM27762 является приближенной. Установлено, что из-за большого количества допущений в созданной модели микросхемы при работе микросхемы в режиме пачек, который реализуется при относительно малых токах нагрузки, расхождения по числу циклов «разряд-заряд», по размаху пульсаций на выходе системы накачки и по промежуткам времени между пачками весьма значительны. Мо-

дель работы микросхемы не позволяет получать данные по пульсациям отрицательного напряжения на ее выходе. Эксперименты показали, что приводимые в документации на микросхему очень ограниченные данные по пульсациям выходного напряжения являются заниженными. Они существенно зависят от входного и выходного напряжения и токов нагрузки. В целом сравнение результатов моделирования работы системы накачки заряда микросхемы LM27762 при ее работе в режиме пачек с соответствующими результатами экспериментов показывает, что на качественном уровне совпадение результатов расчета с экспериментом можно считать удовлетворительным. Обнаруженное расхождение результатов экспериментов с результатами моделирования, полученными при использовании модели производителя LM27762, показали, что реальная проверка совершенства микросхем должна опираться на три фактора: эксперимент, моделирование и совместный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: моделирование, тестирование, пульсации, микросхема, DC–DC преобразователь, накачка заряда, инвертор, «летающий» конденсатор, LDO, режимы пачки импульсов и постоянной частоты.

Для цитирования: Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):80-96 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>

Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC–DC converter

Vladimir K. Bitjukov,
Nikolay G. Mikhnevich,
Vadim A. Petrov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
^{@Corresponding author, e-mail: vapetrov@mirea.ru}

The operation of the LM27762 bipolar DC–DC converter chip was simulated using WEBENCH software developed by Texas Instruments. The main attention is paid to the influence of the load current on the negative voltage ripples at the output of the charge pumping system and the chip output. The results of the calculations are compared with the results of the experiments. It is shown that the model of operation of the microcircuit created by the manufacturer is approximate. When the microcircuit operates in burst mode, which is realized at relatively low load currents, the discrepancies in the number of discharge – charge cycles, voltage poles at the output of the pumping system, and in the time intervals between bursts are very significant. The model does not allow obtaining data on the ripples of the negative voltage at the chip output. Experiments have shown that the very limited data on output voltage ripples given in the microchip documentation is underestimated. They significantly depend on the input and output voltage and load currents. The discrepancy between the experimental results and the simulation results obtained using the model of the manufacturer LM27762 showed that the actual perfection test of the microcircuits should be based on three factors: experiment, simulation and joint analysis of the obtained results. The simulation results of the operation of the LM27762 circuit board of bipolar DC–DC converter using the WEBENCH Power Designer software developed by the Texas Instruments

manufacturing company are presented. The calculations are made at the company's website. For the experimental studies the ready-for-use test board of LM27762EVM test module, provided by the manufacturer of the LM27762 circuit board, is used. The use of the test board, simulator, and software developed by the manufacturer of the circuit board ensures to have no problem while comparing the simulation and experimental results, which can be associated with the use of circuit components with differing characteristics, or with the board layout. The technical documentation for the circuit board does not have information about the characteristics of the keys and capacitors used in the circuit board. Unfortunately, a description of the developed model is not available either. The information mainly concerns the influence of load currents on negative voltage ripples at the charge pump system output and at circuit board output. The simulation has shown that already at a load current of 40 mA, the control system starts operating with a permanent charge pump frequency, while, according to the results of the experiments, the control system continues to work in the pulse train mode even at a higher current of 50 mA. The pulse train for such current consists of 15 charge transfer pulses, the interval between the trains is 3 μ s, and the increase in negative voltage per pulse train is also about 75 mV. The comparison made of simulation results and the results of the experiment have shown that the model of operation of the LM27762 circuit board, created by the manufacturer, is approximate. It has been established that owing to a large number of assumptions in the developed circuit board model, when it operates in the pulse train mode, which is realized at relatively low load currents, the discrepancies are rather significant in the number of discharge-charge cycles, the pulsation amplitude at the charge pump system output, and the time intervals between the pulse trains. The simulation of operation of the circuit board does not give data on the negative voltage pulses at its output. The experiments have shown that the data provided in the documentation on the circuit board output voltage pulses, though quite limited, are underestimated. They largely depend on the input and output voltage and load currents. In general, the comparison of the results of simulation of the operation of the charge pump system of the LM27762 circuit board, when it operates in the pulse train mode, and the corresponding experimental results shows that the coincidence of the calculation results and those of the experiment in terms of quality can be considered satisfactory. The discrepancy between the experimental and simulation results, obtained using the manufacturer's LM27762 model has proved that the true testing of the quality of circuit boards requires three factors to be taken into consideration: experiment, simulation and joint analysis of the obtained results.

Keywords: modeling, testing, ripples, integrated circuit, DC-DC converter, charge pump, inverter, flying capacitor, LDO, burst and constant frequency modes.

For citation: Bitjukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC-DC converter. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):80-96(in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>

Введение

Микросхемы стабилизированных двухполярных DC-DC преобразователей являются наиболее сложными устройствами мобильных источников вторичного электропитания. Их сложность в значительной мере обусловлена тем, что для инвертирования напряжения используется накачка заряда, а на выходе отрицательного напряжения стоит LDO – линейный стабилизатор с малым падением напряжения. Выпуск подобных микросхем начался совсем недавно. Если не считать микросхемы [1], предназначенной специально для питания мобильных жидкокристаллических панелей, можно найти лишь две микросхемы универсального применения [2, 3]. Вероятно, первой из них была микросхема LTC3260 (*Linear Technology*) [2]. Эта микросхема является комбинированной.

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 с целью 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.

По-видимому, самой новой разработкой двухполярного комбинированного источника электропитания, в котором используется накачка заряда, является микросхема LM27762 (*Texas Instruments*) [3]. Алгоритм ее работы в [3] не описан. В [4] и [5] представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших получить некоторые сведения об алгоритме работы системы стабилизации отрицательного выходного напряжения в двух режимах. В связи с тем, что этот алгоритм зависит от тока нагрузки и соотношения между величинами входного и выходного напряжения, представляется целесообразным провести полное моделирование работы LM27762 в различных режимах, и прежде всего с целью сравнения в режимах, охваченных экспериментом в [4] и [5]. Последнее и было основной задачей настоящей работы.

Объект и методика моделирования

В соответствии с [3] LM27762 может вырабатывать напряжения положительной и отрицательной полярности, величины которых в диапазонах от ± 1.5 В до ± 5.0 В могут устанавливаться отдельно с помощью необходимых резисторов в цепях обратной связи LDO. Диапазон входного напряжения – от 2.7 В до 5.5 В. Выходные токи не должны превышать ± 250 мА. Несомненным достоинством этой микросхемы является низкая величина тока покоя, составляющая всего 390 мкА, что дает возможность получать высокие значения КПД при малых токах нагрузки. Высокая тактовая частота осциллятора 2 МГц по замыслу производителя микросхемы должна уменьшать выходное сопротивление и пульсации напряжения.

Блок-схема LM27762 имеется в [3]. На ней представлена инвертирующая накачка заряда с использованием внешнего «летающего» конденсатора (выводы C1+ и C1-) и показаны два LDO, один из которых формирует напряжение отрицательной полярности, а другой создает выходное напряжение положительной полярности без накачки заряда.

LM27762 имеет ряд новых важных особенностей в системе управления. В частности, у нее есть выводы EN+ и EN-, позволяющие независимо включать и отключать положительный LDO и отрицательный LDO с системой накачки заряда. Имеется система мониторинга PGOOD, которую можно отключать.

Использованный в LM27762 принцип работы системы накачки заряда с инвертированием напряжения показан на рис. 1 [3].

Схема инвертора имеет три внешних конденсатора – входной C_{IN} , «летающий» C_1 , и стоящий перед LDO конденсатор $C_{срout}$, иногда обозначаемый в [3] как $C_{ср}$. 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 $C_{срout}$. Цикл переноса состоит из двух стадий. В первой происходит заряд «летающего» конденсатора C_1

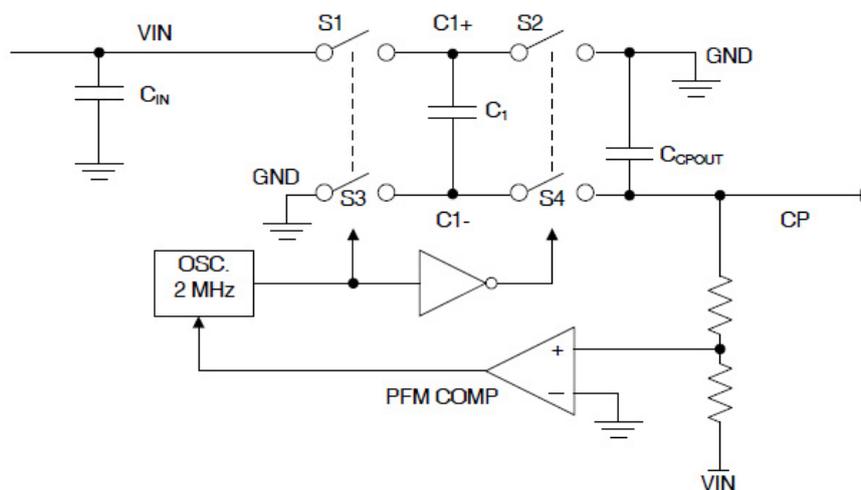


Рис. 1. Принцип инвертирования напряжения.

от входного напряжения на C_{IN} при замыкании ключей S1 и S3, а во второй происходит перенос заряда от C_1 к C_{spout} при замыкании ключей S2 и S4. Поскольку при этом положительный полюс конденсатора C_{spout} подсоединен к «земле», напряжение на его отрицательном полюсе, близкое к значению $-VIN$, подается на выход и на систему регулирования через цепь обратной связи. Алгоритм работы системы регулирования и компаратора частотно-импульсной модуляции (PFM COMP) в [3] не описан.

Результаты моделирования радиоэлектронных компонент и устройств представлены в ряде работ, например, [6–14]. При этом использовались модели компонентов с упрощающими и, как правило, неизвестными пользователям допущениями, которые неизбежно приводят к снижению достоверности моделирования. Однако с микросхемой LM27762 ситуация существенно иная.

Модель, описывающая различные варианты микросхемы LM27762, разработана ее производителем, компанией Texas Instruments, для программного обеспечения WEBENCH, также разработанного этой компанией. Весьма важным оказалась возможность получения от производителя LM27762 готовой тестовой платы – тестового модуля LM27762EVM [15]. Эта возможность и использовалась в настоящей работе. Наличие тестовой платы, модели и программного обеспечения, созданных производителем микросхемы, снимает все проблемные вопросы сопоставления результатов моделирования с результатами эксперимента, которые могут быть связаны с использованием компонентов схемы с отличающимися характеристиками и влиянием разводки платы. Принципиальная электрическая схема модуля LM27762EVM показана на рис. 2. Там же показано размещение контрольных точек для подключения измерительных приборов.

При установленных на плате резисторах R1 и R3, равных 249 кОм, и резисторах R2 и R4, равных 499 кОм, напряжение на выходах VOUT+ и VOUT– было равно 1.8 В. Для запуска программы моделирования на сайте компании *Texas Instruments* было необходимо ввести только значения входного напряжения и тока нагрузки. Программа сама создавала схему, которая использовалась для проведения расчетов. На рис. 3 показан пример такой схемы для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА. Ниже схемы показан список выводимых результатов расчета.

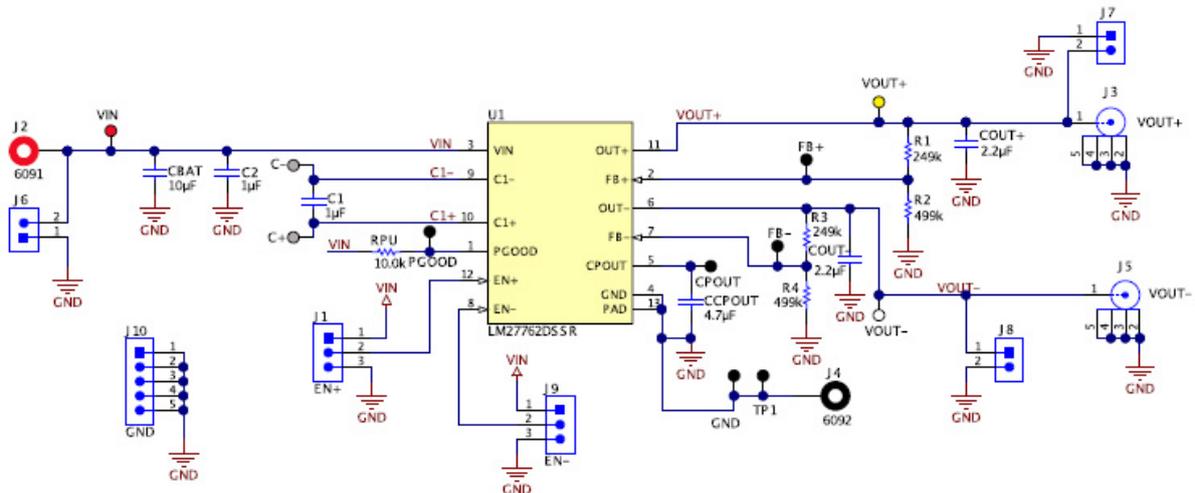


Рис. 2. Схема платы модуля LM27762EVM [15].

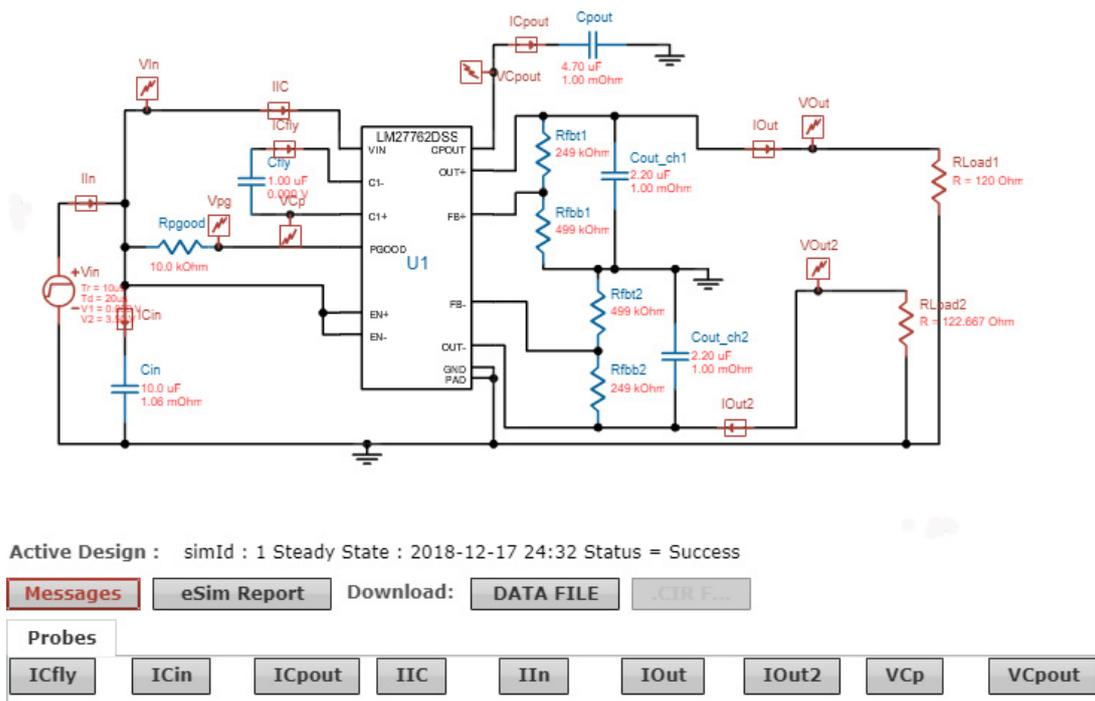


Рис. 3. Схема моделирования для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек.

Результаты моделирования для входного напряжения 3.5 В и выходного -1.8 В

Поскольку основными причинами возникновения пульсаций на выходе отрицательного напряжения в микросхеме LM27762 являются накачка заряда и система регулирования величины отрицательного выходного напряжения, в настоящей работе им было уделено основное внимание. Результаты моделирования (sim) напряжения во времени t на положительном полюсе «летающего» конденсатора U_{fbDC+} (на схеме рис. 3 оно обозначено

как V_{Cp}) и переменной составляющей $U_{out\sim}$ напряжения на выходном конденсаторе C_{pout} системы накачки (на схеме оно обозначено как V_{Cpout}) показаны на рис. 4–12. Выводились также значения входного V_{IN} и выходных V_{Out} и V_{Out2} напряжений.

Результаты расчетов для варианта, показанного на рис. 3, представлены на рис. 4.

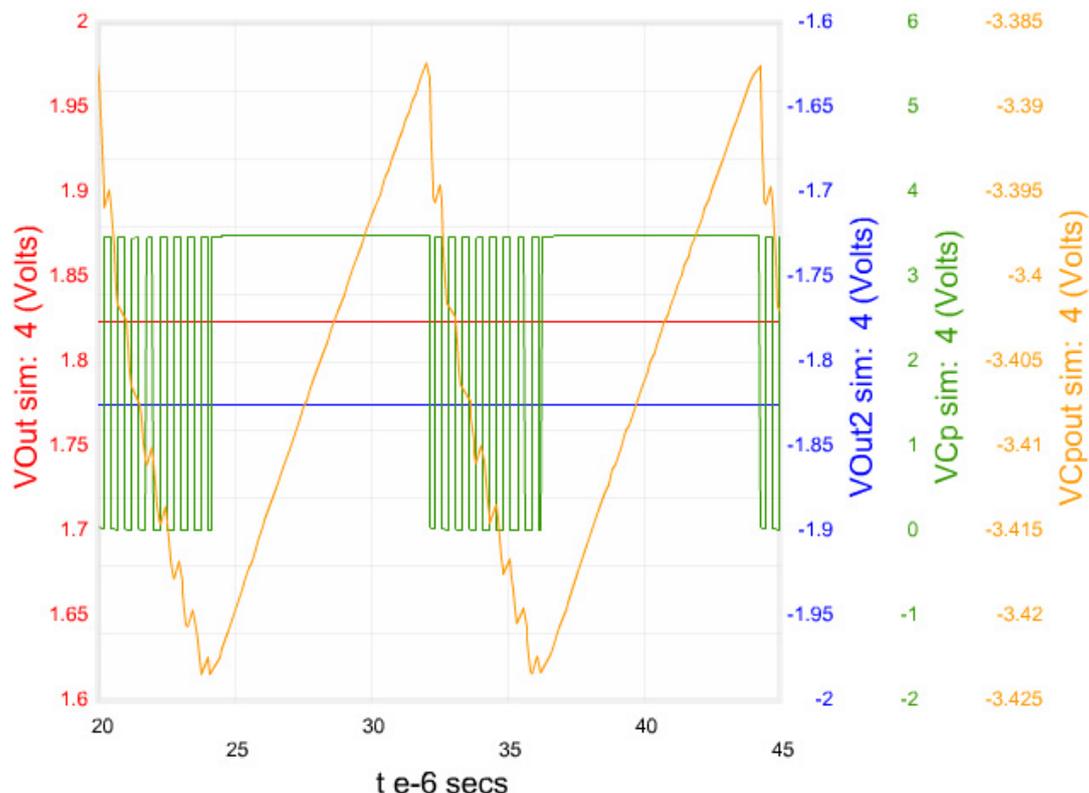


Рис. 4. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек, показанных на рис. 3.

Из рисунка видно, что накачка заряда в этом случае осуществлялась пачками из девяти циклов «разряд-заряд» «летающего» конденсатора, разделенных временным промежутком времени около 8 мкс. Более детально циклы пачки показаны на рис. 5. Период циклов составлял 0.5 мкс, что соответствовало тактовой частоте осциллятора 2 МГц. Последний, девятый цикл накачки, был по времени неполным. За 9 циклов переноса заряда абсолютная величина отрицательного напряжения на выходе из системы накачки V_{Cpout} увеличивалась примерно на 35 мВ. Выходное напряжение V_{Out2} составляло -1.825 В. Уменьшение цены деления на оси V_{Out2} не позволило обнаружить пульсации отрицательного напряжения на выходе микросхемы. По-видимому, в модели, созданной разработчиком микросхемы, пульсации отрицательного выходного напряжения не учитываются, и считается, что с пульсациями V_{Cpout} справляется отрицательный LDO, стоящий за системой накачки заряда.

На рис. 6 показаны результаты для тока нагрузки 30 мА при тех же значениях входного и выходного напряжений. Накачка заряда в этом случае осуществлялась пачками из двадцати шести циклов «разряд-заряд» «летающего» конденсатора, разделенных временным промежутком времени около 4.5 мкс. За 26 циклов переноса заряда отрицательное напряжение на выходе из системы накачки уменьшалось примерно на 43 мВ.

Полученные результаты расчетов для тока нагрузки 40 мА (рис. 7) показали, что в этом случае накачка заряда осуществляется уже не пачками, а является накачкой с постоянной тактовой частотой, равной 2 МГц. Однако на этом рисунке время разряда меньше, чем обычно (250 нс), цикл заряда начинается раньше, и на увеличении напряжения V_{Cpout} виден излом формы. Вследствие перехода к режиму постоянной частоты накачки размах пульсаций напряжения V_{Cpout} резко уменьшился и составил около 2 мВ.

При значениях тока нагрузки 50 мА и более, вплоть до 250 мА, такой особенности нет, и время заряда равно времени разряда (рис. 8).

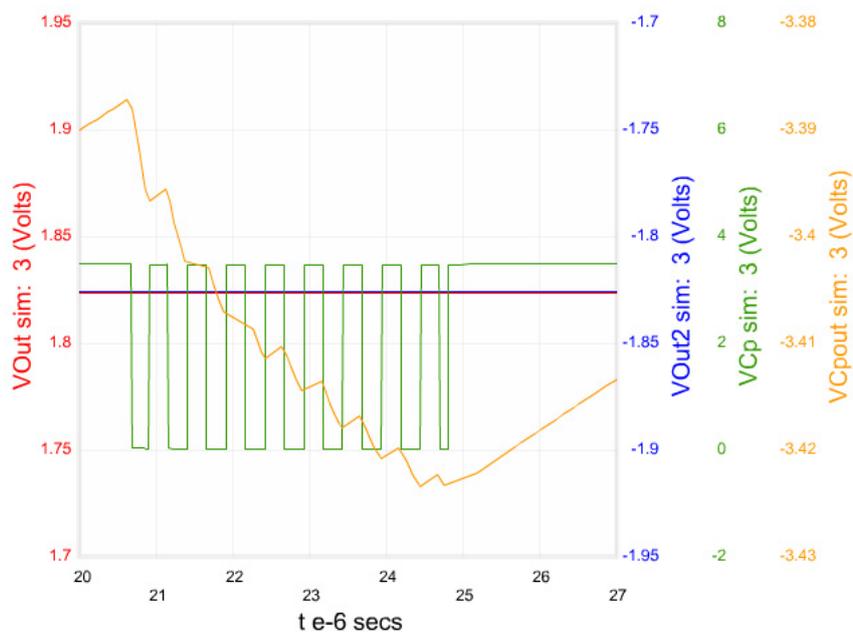


Рис. 5. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА в большем масштабе по времени.

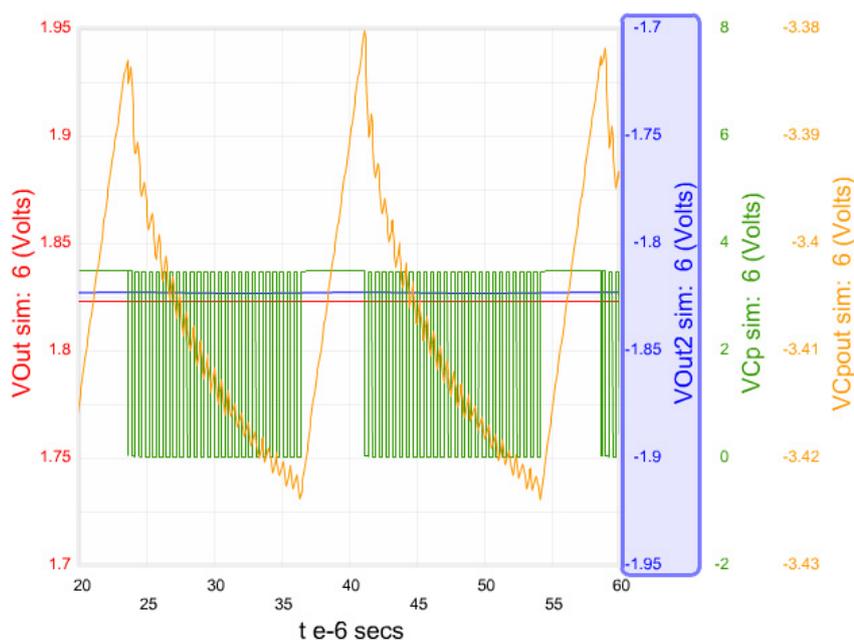


Рис. 6. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 30 мА.

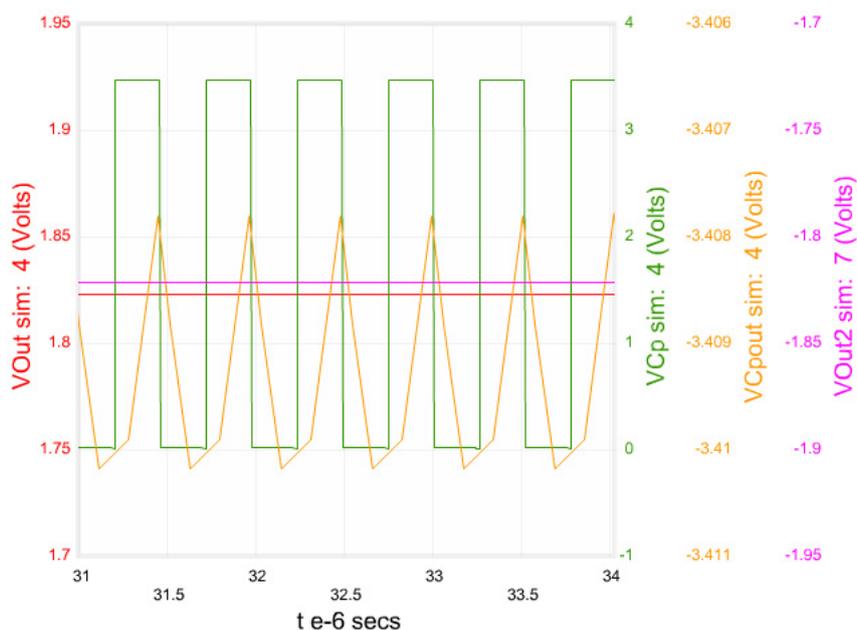


Рис. 7. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и $V_{C_{pout}}$ для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 40 мА.

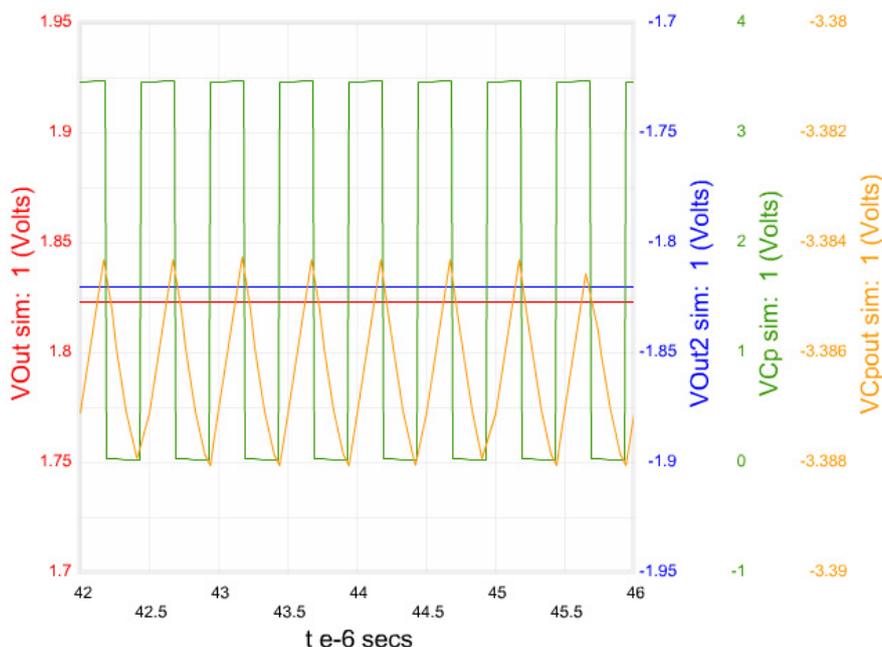


Рис. 8. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и $V_{C_{pout}}$ для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 50 мА.

Результаты моделирования для входного напряжения 5.5 В и выходного -4.9 В

Этот режим является предельным режимом работы микросхемы, в котором входное напряжение является максимальным и составляет 5.5 В. Моделирование было проведено для токов нагрузки 10, 15, 25, 50, 70, 80, 100 и 250 мА.

На рис. 9 в качестве примера показана схема моделирования для тока 15 мА с измененными резисторами в цепи обратной связи системы регулирования. Результаты моделирования для этого тока нагрузки показаны на рис. 10.

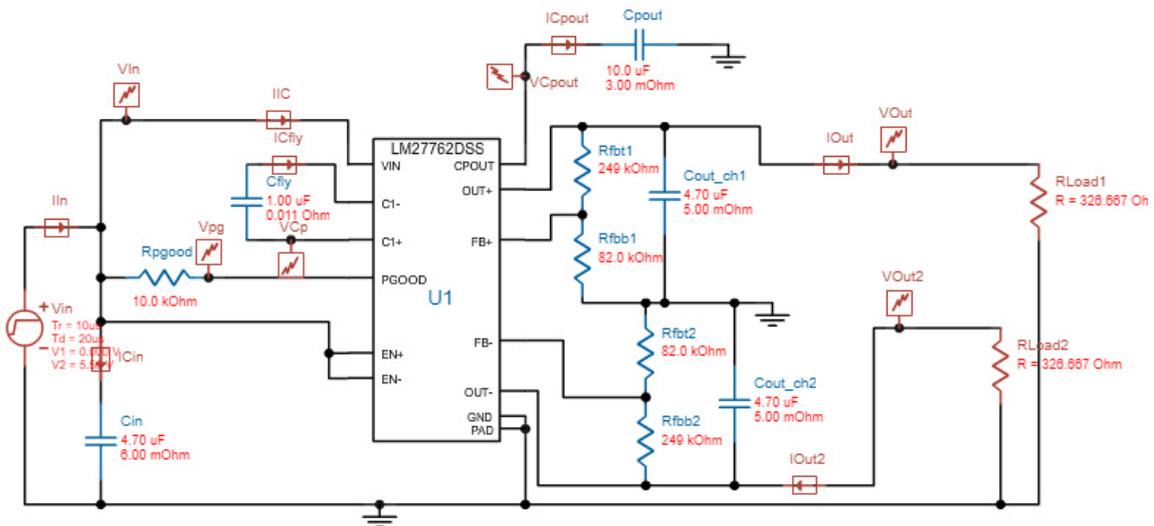


Рис. 9. Схема моделирования для входного напряжения 5.5 В, выходного напряжения -4.9 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек.

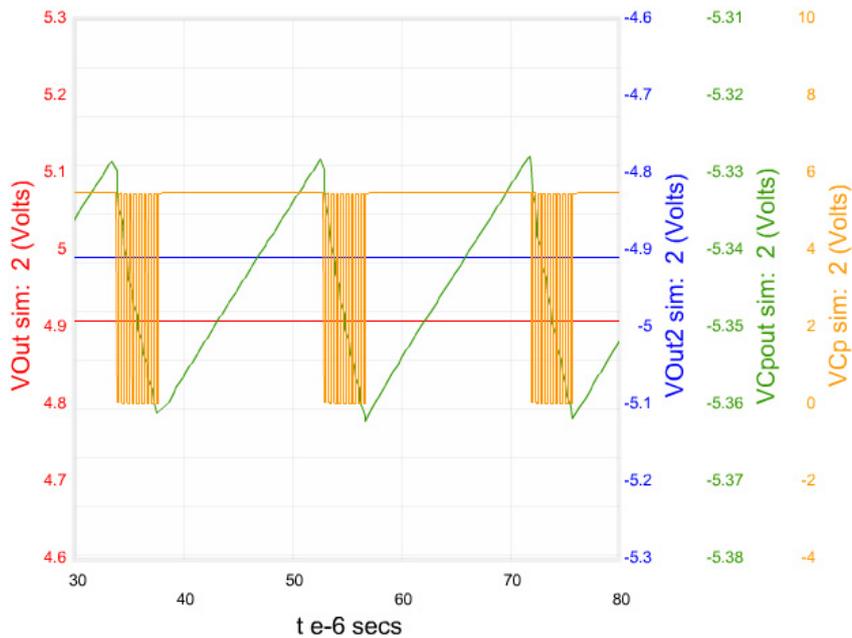


Рис. 10. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и $V_{C_{pout}}$ для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 15 мА.

Видно, что система регулирования работает в режиме пачек, в пачке 9 импульсов, промежутки времени между пачками примерно 16 мкс, за время переноса в пачке величина отрицательного напряжения $V_{C_{pout}}$ увеличилась на 33 мВ. При токе нагрузки 10 мА в пачках было 8 импульсов, промежутки времени между пачками составляли 22 мкс, величина $V_{C_{pout}}$ увеличивалась на 30 мВ, при токе нагрузки 25 мА соответствующие значения составили 12 импульсов, 10 мкс и 35 мВ, а при токе 50 мА – 31 импульс, 5 мкс и 38 мВ соответственно.

Результаты расчетов показали, что при токе нагрузки 70 мА система накачки заряда уже работает в режиме постоянной частоты. При этом в ходе переноса заряда величина $V_{C_{pout}}$ изменяется всего на 1 мВ (рис. 11).

Режимы накачки заряда с постоянной частотой сохраняются и при токах нагрузки 80, 100 и 250 мА, но с увеличением тока увеличение VC_{pout} при каждом переносе заряда становится больше и при 250 мА составляет 8 мВ (рис. 12).

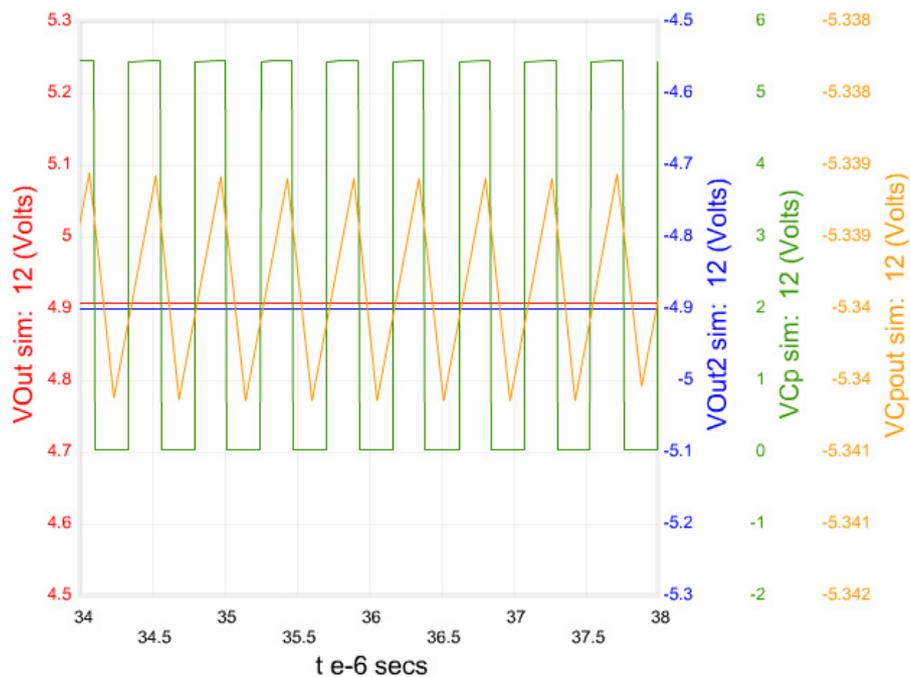


Рис. 11. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и $V_{C_{pout}}$ для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 70 мА.

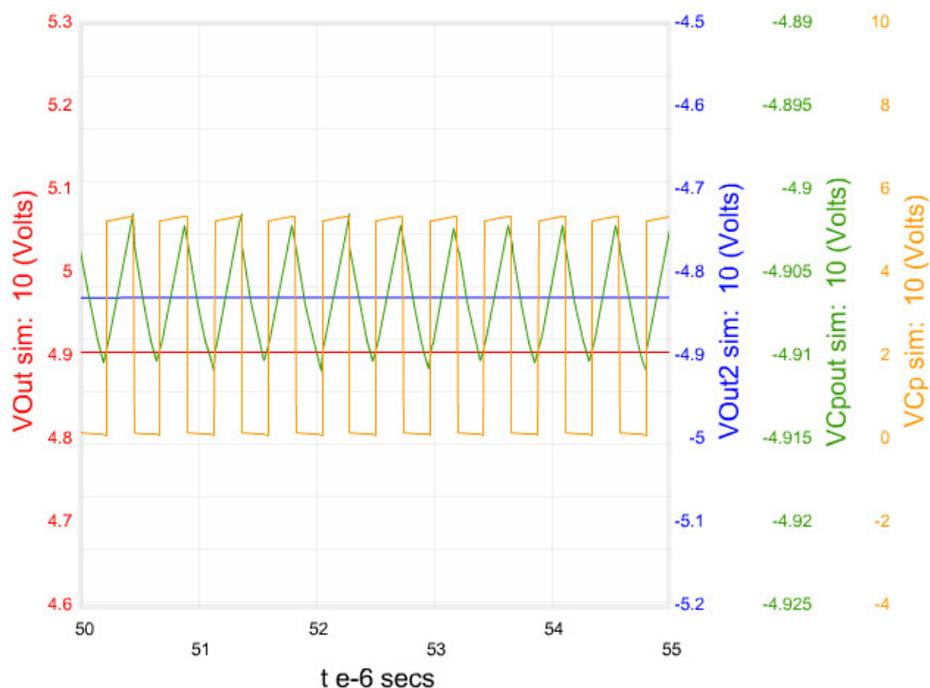


Рис. 12. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и $V_{C_{pout}}$ для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 250 мА.

Сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов

Полученные ранее результаты экспериментальных исследований представлены подробно в [4, 5]. В данном разделе даны лишь их некоторые сравнения с результатами моделирования. На рис. 13 показаны экспериментальные результаты для входного напряжения 3.5 В, выходного напряжения -1.8 В и тока нагрузки 15 мА. Показаны формы сигналов на положительном полюсе «летающего» конденсатора, измеренные при открытом входе осциллографа, и переменные составляющие напряжения на выходе из системы накачки заряда, измеренные при закрытом входе. Обозначения на этом рисунке соответствуют обозначениям, принятым выше для результатов моделирования.

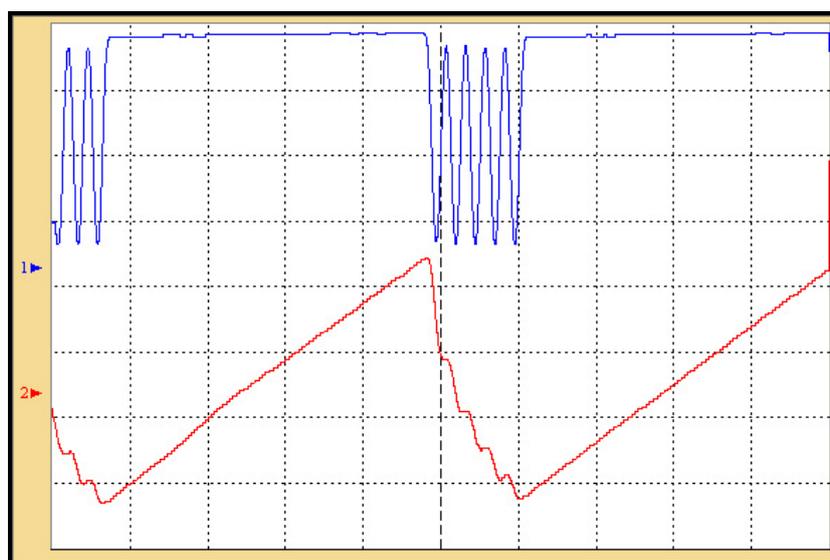


Рис. 13. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений 1 – V_{Cp} (1 В/дел) и 2 – $V_{C_{pout}}$ (20 мВ/дел) при токе нагрузки 15 мА.

Видно, что пачка импульсов состоит из 5 циклов «разряд-заряд», увеличение отрицательного напряжения $V_{C_{pout}}$ за эти циклы составляет примерно 75 мВ, а временные промежутки между пачками составляют 8 мкс. Результаты, полученные при моделировании (рис. 4 и 5, представленные выше), составляют соответственно 9 циклов, 35 мВ и 8 мкс.

Моделирование показало, что уже при токе нагрузки 40 мА система регулирования переходит в режим работы с постоянной частотой накачки заряда, в то время как согласно результатам эксперимента, система регулирования продолжает работать в режиме пачек импульсов и при большем токе 50 мА. Для такого тока пачка состоит из 15 импульсов переноса заряда, промежутки между пачками составляют 3 мкс, а увеличение отрицательного напряжения $V_{C_{pout}}$ за пачку импульсов также составляет примерно 75 мВ.

В таблице результаты моделирования для входного напряжения 5.5 В и выходного напряжения -4.9 В сравниваются с результатами соответствующих экспериментов.

В этой таблице $\Delta V_{C_{pout}}$ – увеличение отрицательной величины напряжения $V_{C_{pout}}$ за пачку импульсов, V_{out-pp} – размах пульсаций отрицательного напряжения на выходе микросхемы. Прочерк в некоторых ячейках означает, что измерения соответствующего параметра для установленного в первом столбце значения тока нагрузки не проводились. Представленные в таблице величины V_{out-pp} могли быть получены только эксперимен-

Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC-DC преобразователя LM27762

тально. Примеры результатов их измерения при токах нагрузки 50 мА (режим пачек) и 250 мА (режим постоянной частоты накачки при максимальном токе нагрузки) показаны на рис. 14 и 15. Моделирование, как было отмечено выше, не обнаруживает пульсаций отрицательного выходного напряжения.

Результаты моделирования и эксперимента для $U_{вх}=5.5$ В и $U_{вых}=-4.9$ В

Ток нагрузки, мА	Результаты моделирования			Результаты экспериментов			
	Число импульсов в пачке	Промежуток между пачками, мкс	$\Delta VC_{out}^?$ мВ	Число импульсов в пачке	Промежуток между пачками, мкс	$\Delta VC_{out}^?$ мВ	V_{out-pp} , мВ
10	8	22	30	3	17	125	1.8
15	9	16	30	3.5	10	130	2.2
25	12	10	35	4	7	148	4
50	31	5	38	5	3.5	148	5.5
70	Накачка с постоянной частотой 2 МГц		1	—	—	—	—
80			1	8	2.2	148	22
100			3	15	2	140	34
107			—	>25	1.7	144	38
109			—	Накачка с постоянной частотой 2 МГц		21.6	2.2
150			—			26.8	6.4
250			8			36	8.2

Из таблицы видно, что результаты моделирования расходятся с результатами экспериментов весьма существенно. Прежде всего это относится к значениям токов нагрузки, при которых происходит переход от режима накачки пачками импульсов к режиму накачки с постоянной частотой. В режиме пачек при одинаковых токах нагрузки велико отличие по числу импульсов переноса в пачке. Величины суммарного за пачку повышения отрицательного напряжения на выходе из системы накачки при одних и тех же токах отличаются примерно в 3 раза. Промежутки времени между пачками различаются не очень сильно.

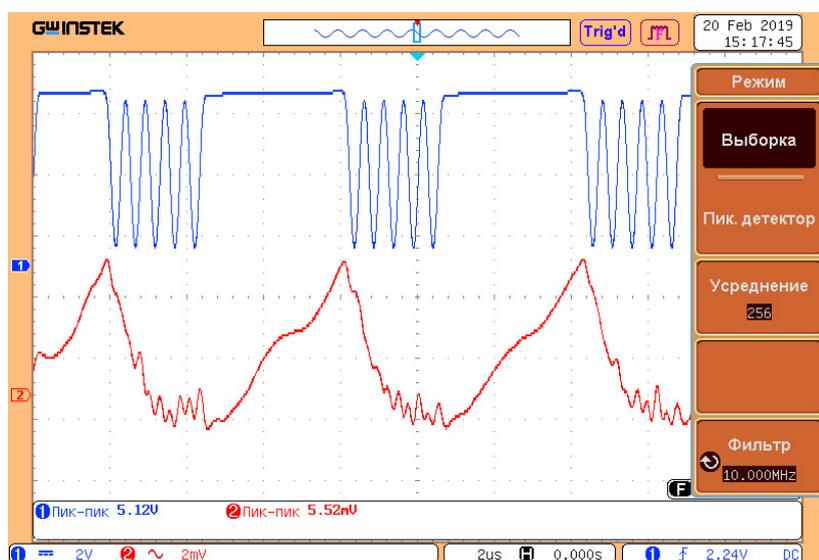


Рис. 14. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений 1 – V_{Cr} (2 В/дел) и 2 – V_{out} (2 мВ/дел) при токе нагрузки 50 мА.

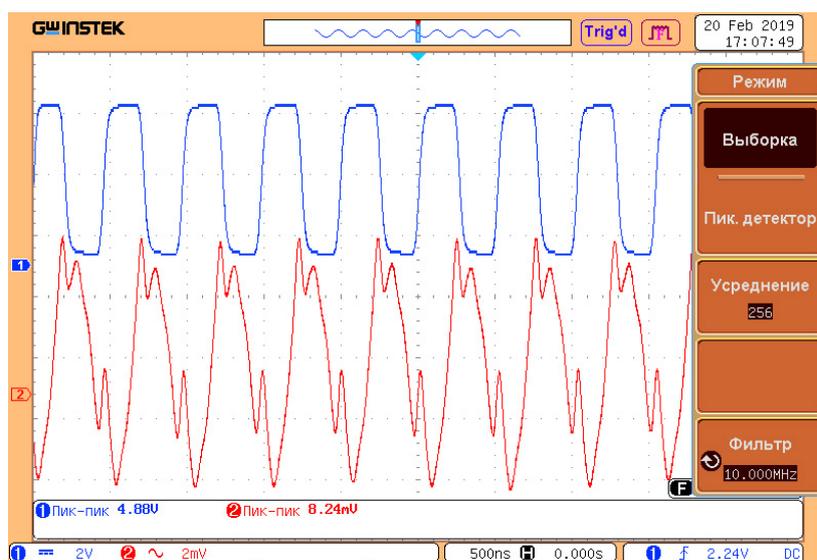


Рис. 15. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений 1 – V_{Cr} (2 В/дел) и 2 – V_{out} (2 мВ/дел) при входном напряжении 5.5 В, выходном напряжении –4.9 В и токе нагрузки 250 мА.

Анализ полученных результатов

Производитель микросхемы LM27762 компания *Texas Instruments* предоставляет возможность пользователям на основе созданной модели LM27762 выполнять проекты в программном обеспечении *WEBENCH Power Designer*. Расчеты проводятся непосредственно на сайте компании. К сожалению, описания разработанной модели нет. Однако в очень кратком описании инвертора, имеющемся в [3], отмечается, что «*выходные характеристики схемы инвертора могут быть аппроксимированы идеальным источником напряжения с последовательно соединенным резистором. Напряжение источника равно $(-V_{in})$. Выходное сопротивление R_{out} является функцией сопротивления замкнутых MOSFET ключей, частоты осциллятора, емкости и ESR конденсаторов C_1 и C_{cr} . Поскольку переключаемый ток заряда и разряда C_1 приблизительно равен двум значениям выходного тока, влияние ESR конденсатора накачки C_1 умножается на 4 в выходном сопротивлении. Выходной конденсатор системы накачки C_{cr} заряжается и разряжается при токе, приблизительно равном выходному току; следовательно, величина его ESR должна учитываться только один раз в выходном сопротивлении*». Хотя это замечание относится только к той части микросхемы, которая отвечает за накачку заряда, а другой информации в [3] нет, как нет и характеристик использованных в микросхеме ключей и конденсаторов, ясно, что созданная модель работы микросхемы является приближенной и необходимо сравнить результаты моделирования с результатами эксперимента. Такое сравнение было сделано в настоящей работе. В целом сравнение результатов моделирования системы накачки заряда микросхемы LM27762 при ее работе в режиме пачек с соответствующими результатами эксперимента показывает, что на качественном уровне совпадение результатов расчета с экспериментом можно считать удовлетворительным. Однако из-за большого количества допущений в созданной модели микросхемы расхождения по числу циклов «разряд–заряд» по размаху пульсаций на выходе системы накачки и по промежуткам времени между пачками расхождения весьма значительные.

К сожалению, приводимые в [3] на имеющихся там рисунках 1 и 2 в виде графиков типичные электрические характеристики пульсаций напряжения на выходе микросхемы очень ограничены. Из первого рисунка можно лишь заключить, что при входном напряжении 3.7 В и выходном –3 В при увеличении тока нагрузки от 5 до 75 мА пульсации отрицательного выходного напряжения составляют около 0.7 мВ, а при дальнейшем увеличении тока нагрузки от 75 до 250 мА увеличиваются от 0.7 мВ до 3.2 мВ. Второй график показывает зависимость напряжения пульсаций от входного напряжения при выходном напряжении – 3 В и токе нагрузки 100 мА. Здесь при увеличении входного напряжения от 3 до 3.2 В пульсации уменьшаются от 2.2 до 1.2 мВ, а затем при дальнейшем увеличении входного напряжения от 3.2 В до 4.1 В слегка увеличиваются от 1.2 до 1.3 мВ. Эта информация по пульсациям выходного напряжения, по-видимому, была получена экспериментально, так как модель не позволяет ее получить, и она явно недостаточна для того, чтобы судить о пульсациях отрицательного напряжения на выходе микросхемы в различных режимах. Приведенные в таблице экспериментально полученные величины пульсаций заметно превосходят пульсации, представленные в [3].

Обнаруженное расхождение результатов экспериментов с результатами моделирования, полученными при использовании модели производителя LM27762, не является частным случаем. Это известно и было предметом специального изучения в [16] для некоторых других микросхем. Реальная проверка совершенства микросхем должна опираться на три фактора: эксперимент, моделирование и совместный анализ полученных результатов.

Благодарности

В заключение необходимо отметить, что представленные в статье результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 8.5577.2017/8.9 на выполнение проекта по теме «Исследование шумовых характеристик и пульсаций микросхем мобильных источников вторичного электропитания».

Литература:

1. 5V Input Multi-channel System Power Supply IC BD9862MUV. Datasheet No. 10035EAT16. Rohm Semiconductor. 2010. P. 1-16.
2. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. P. 1-19.
3. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). P. 1-29.
4. Битюков В.К., Петров В.А., Сотникова А.А. Работа инвертирующего DC–DC преобразователя с накачкой заряда и LDO в микросхеме LM27762. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2019;1(28):35-43.
5. Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC–DC преобразователя при близком к предельному входном напряжении. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):31-43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>
6. Ремнев А.М., Смердов В.Ю. Анализ силовых ключей импульсных источников питания. *Схемотехника*. 2001;6:8-11.
7. Чернышов Н.Г., Чернышова Т.И. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. 52 с.
8. Лурье М.С., Лурье О.М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники. Красноярск: СибГТУ, 2007. 138 с. ISBN 978-5-8173-0473-2
9. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Моделирование процессов в схеме силового преобразователя при регулировании его выходного напряжения. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2013;1:408-411.
10. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование DC/DC преобразователей. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2016;14(11):69-82.
11. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование устройства контроля положения привода в пространстве. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2016;21(4):11-19.

12. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У., Увайсова С.С. Компьютерное моделирование работы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением. *Информационные технологии*. 2016;22(4):261-266.
13. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. Источники вторичного электропитания. Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия. 2019. 376 с. ISBN 978-5-972-902675
14. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of Switching of High-Power FETs Using the Electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176-181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025>
15. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments. 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
16. Hymowitz C., Ho P., Sandler S. Why Regulators Need Testing, Modeling and Analysis. *Space Power*. 2015. AEI Systems. 2015. P. 1-13.

References:

1. 5V Input Multi-channel System Power Supply IC BD9862MUV. Datasheet No. 10035EAT16. Rohm Semiconductor. 2010. P. 1-16.
2. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. P. 1-19.
3. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). P. 1-29.
4. Bityukov V.K., Petrov V.A., Sotnikova A.A. Operation of inverting DC–DC converter with charge pumping and LDO in the LM27762 microcircuit. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey» = Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»*. 2019;1(28):35-43. (in Russ.).
5. Bityukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Negative Output Voltage Ripples of Bipolar DC–DC Converter LM27762 Near Maximum Input Voltage. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(4):31-43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>
6. Remnev A.M., Smerdov V.Yu. Analysis of power switches of switch-mode power supply. *Skhemitekhnika = Circuit Design*. 2001;6:8-11 (in Russ.).
7. Chernyshov N.G., Chernyshova T.I. *Modelirovaniye i analiz skhem v Electronics Workbench* (Simulation and analysis of circuits in Electronics Workbench). Tambov: TGTU Publishing House; 2005. 52 p. (in Russ.).
8. Lur'e M.S., Lur'e O.M. *Imitatsionnoye modelirovaniye skhem preobrazovatel'noi tekhniki* (Simulation modeling of circuits of converting equipment). Krasnoyarsk: SibGTU Publishing House; 2007. 138 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8173-0473-2
9. Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaisov S.U. Simulation of processes in a power converter circuits, its output voltage being under control. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations based on information and communication technologies*. 2013;1:408-411 (in Russ.).
10. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. Circuit simulation of DC/DC converters. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy = Information-Measuring and Control Systems*. 2016;14(11):69-82 (in Russ.).
11. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. Circuit simulation device controls of actuator position in space. *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2016;21(4):11-19 (in Russ.).
12. Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaisov S.U., Uvaisova S.S. Computer simulation of the power converter with harmonic wave output. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2016;22(4):261-266. (in Russ.).
13. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. Источники вторичного электропитания. Учебник. (Secondary power sources). Moscow: Infra-Inzheneriya; 2019. 376 p. (in Russ.). ISBN 978-5-972-902675
14. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of Switching of High-Power FETs Using the Electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176-181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025>
15. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments. 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
16. Hymowitz C., Ho P., Sandler S. Why Regulators Need Testing, Modeling and Analysis. *Space Power*. 2015. AEI Systems. 2015. P. 1-13.

Об авторах:

Битюков Владимир Ксенофонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Михневич Николай Григорьевич, заведующий лабораторией кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Петров Вадим Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC-DC преобразователя LM27762

About the authors:

Vladimir K. Bitjukov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nikolay G. Mikhnevich, Head of laboratory of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Vadim A. Petrov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).