

УДК 621.311.6

## **РАБОТА DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ MCP1253 С НАКАЧКОЙ ЗАРЯДА В РЕЖИМЕ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

**В.К. Битюков**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

**В.А. Петров**<sup>@</sup>, д.т.н., профессор

**А.А. Сотникова**, студентка

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики,  
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: vapetrov@mirea.ru*

Представлены результаты исследования характеристик DC-DC преобразователя MCP1253 с накачкой заряда в режиме понижения напряжения. Полученные временные зависимости пульсаций выходного напряжения и напряжения на «летающем» конденсаторе характеризуют работу преобразователя при различных значениях входного и выходного напряжений в широком диапазоне изменения тока нагрузки, в том числе при предельно низких токах - до 2 мА и высоких - до 95 мА. На основе изученных временных зависимостей сделаны выводы о различных алгоритмах работы системы стабилизации выходного напряжения в микросхеме MCP1253.

**Ключевые слова:** микросхема, DC-DC преобразователь, накачка заряда, «летающий» конденсатор, удвоитель напряжения, алгоритм работы.

## **OPERATION OF DC-DC CHARGE PUMP CONVERTER MCP1253 IN BUCK MODE**

**V.K. Bityukov**,

**V.A. Petrov**<sup>@</sup>,

**A.A. Sotnikova**

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia  
<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: vapetrov@mirea.ru*

The algorithm of operation of MCP1253 charge pump converter in buck mode is studied for the first time by detailed measurements of ripples of output voltage and flying capacitor voltage. Some experimental results for MCP1253 operation in regulation buck mode at combinations of input voltage 5.1 V and output voltage 3.5 V, input voltage 5.1 V and output voltage 4.8 V and

input voltage 2.2 V and output voltage 1.7 V for the range of load current from 2 to 100 mA are presented as examples. Realized investigations revealed that algorithm of MCP1253 operation in buck mode, described by its manufacturer, is not defined the all different cases of its use. The algorithm depends on the ratio between input and output voltages, their values and load currents.

**Keywords:** integrated circuit, DC-DC converter, charge pump, buck mode, flying capacitor, voltage doubler, algorithm of operation.

### Введение

В настоящее время широкое применение находят мобильные стабилизированные источники вторичного электропитания, построенные на базе регулируемых DC-DC преобразователей с накачкой заряда. Большинство производителей электронных компонентов предлагает множество микросхем, предназначенных для построения либо повышающих, либо понижающих, либо полярно-инвертирующих преобразователей. И лишь небольшое число микросхем предназначено для получения регулируемого стабилизированного напряжения на выходе как в режиме понижения, так и в режиме повышения входного напряжения. К таким преобразователям напряжения относятся микросхема MAX1759 производства компании Maxim Integrated [1] и микросхема MCP1253 производства компании Microchip Technology [2].

В технических характеристиках MCP1253 указан диапазон входного напряжения от 2 до 5.5 В [2], при этом преобразователь дает возможность регулирования выходного напряжения от 1.5 до 5.5 В. Это актуально в связи с переходом электроники к низкому напряжению 1.5 В. Однако приводимые в описании этой микросхемы основные технические характеристики, общие с описанием ее модификации MCP1252, являются далеко не полными и не охватывают все режимы ее применения. В частности, зависимость выходного напряжения от входного дана только для номинального значения выходного напряжения, равного 3 В, причем эта зависимость дана лишь для микросхемы MCP1252, имеющей тактовую частоту переключения 650 кГц, а для микросхемы MCP1253 того же семейства, имеющей частоту переключения 1 МГц, данных не приводится вообще. Отсутствуют данные по зависимости выходного напряжения от тока нагрузки при различных режимах. Аналогичная ситуация имеет место и с другими характеристиками.

Отдельно необходимо коснуться описания алгоритма работы микросхемы. Из имеющихся в [2, 3] описаний нельзя получить достаточно полные данные об алгоритмах работы микросхемы в разных режимах. В [2] представлен один из возможных алгоритмов работы, при этом не указано, к какому режиму он относится, а использованные в объяснении алгоритма ключи S1 и S2 не показаны на функциональной блок-схеме. В [3] описан алгоритм работы микросхемы при понижении напряжения немного подробнее. Из этого описания становится ясным, что именно этот алгоритм представлен и в [2]. В [3] дана схема работы системы накачки заряда, показанная на рис. 1.

Согласно приведенной в [2] функциональной схеме и имеющемуся в [3] описанию в режиме понижения напряжения, ключ SW1 всегда замкнут, а ключ SW2 всегда разомкнут. Работа микросхемы, выступающей в качестве преобразователя и стабилизатора, состоит из трех фаз. Первая фаза – фаза заряда «летающего» конденсатора, в которой

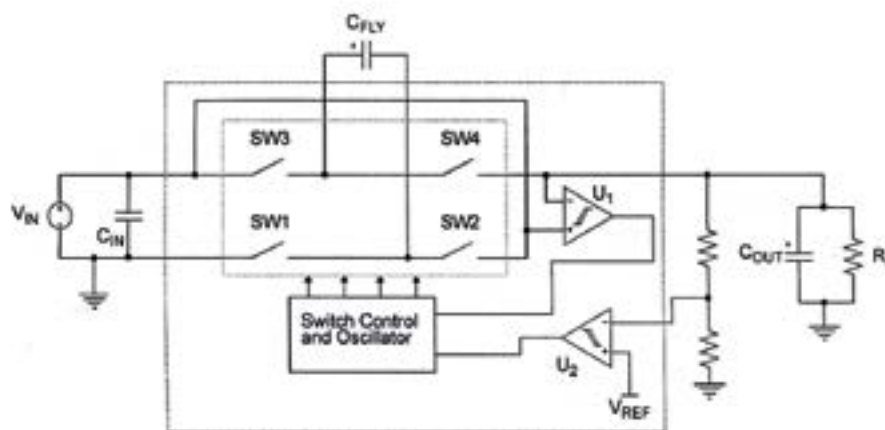


Рис. 1. Система накачки заряда, представленная в [3].

замкнут ключ SW3, длится половину периода цикла внутреннего осциллятора. В течение этой фазы «летающий» конденсатор подключен ко входу, благодаря чему он и заряжается. После окончания первой фазы открываются все ключи, начинается вторая фаза – фаза покоя. Происходит сравнение напряжения обратной связи с опорным. Если напряжение обратной связи будет меньше опорного, преобразователь перейдет в третью фазу – фазу разряда «летающего» конденсатора на выходной конденсатор и нагрузку, которая реализуется путем замыкания ключа SW4 и по продолжительности может быть разной, вплоть до половины периода осциллятора. В этой фазе вновь происходит сравнение напряжения обратной связи с опорным. Если до истечения времени, соответствующего половине периода осциллятора, напряжение обратной связи станет больше опорного, система регулирования возвратится во вторую фазу. Сравнение напряжений осуществляется с помощью гистерезисного компаратора, который имеет два порога срабатывания. Когда выходное напряжение достигает нижнего порога, начинается его повышение за счет разряда «летающего» конденсатора, а когда оно доходит до уровня верхнего порога, наступает фаза покоя, и напряжение падает.

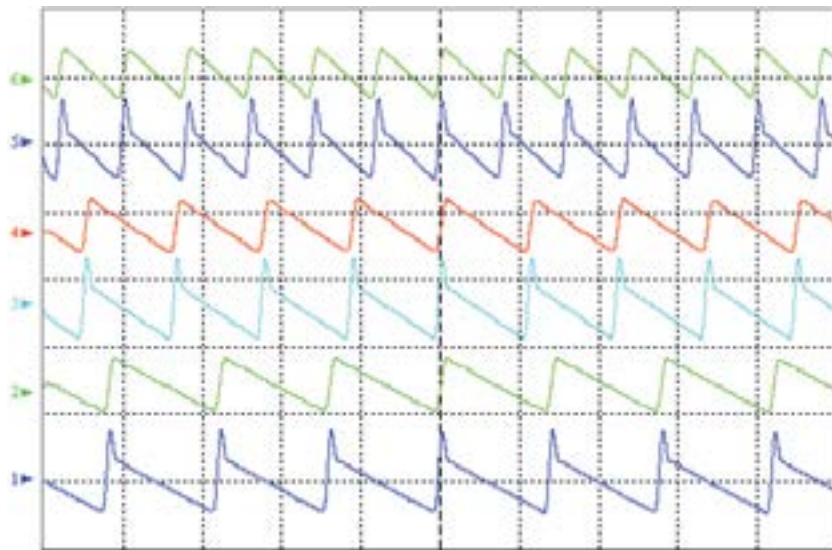
Однако из приведенной выше имеющейся информации нельзя заключить, как будет работать система накачки заряда в режиме понижения напряжения при больших токах нагрузки, при близких значениях входного и выходного напряжения и при входных напряжениях, много больших выходных. Это и было основной целью настоящей работы. Важно отметить, что для ее реализации требовалось получение большого количества экспериментальной информации. Необходимо было создать аппаратуру, позволяющую получать входные напряжения в нужном диапазоне, изменять выходные напряжения в заданных пределах, а также изменять сопротивление нагрузки для получения токов нагрузки до 100 мА в различных режимах. Такие исследования можно было провести только на автоматизированном стенде с использованием современной измерительной техники.

На кафедре теоретической радиотехники и радиофизики Московского технологического университета (МИРЭА) ранее был разработан метод подобных исследований и создана аппаратура для его реализации. Приборно-методическое описание решения задачи исследования описано в [4, 5]. На созданном экспериментальном стенде уже проводилось исследование микросхемы MAX1759, тоже являющейся системой накачки заряда. В

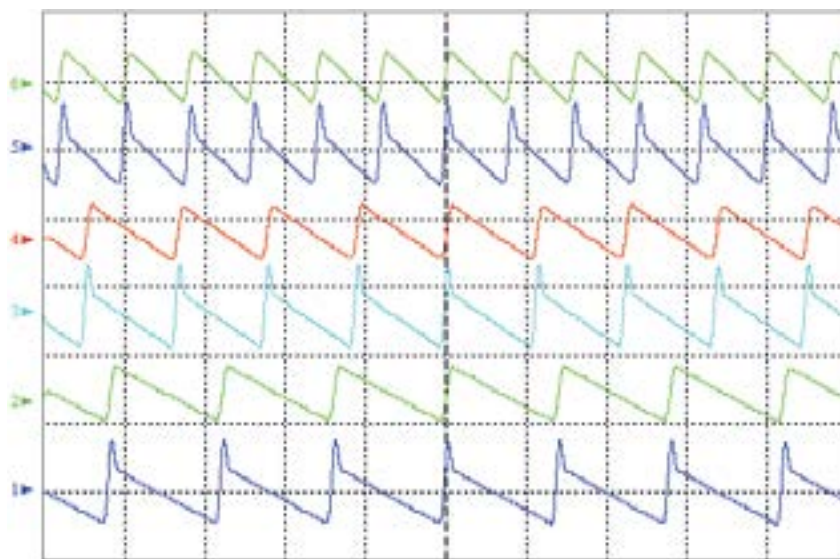
результате удалось получить данные о различных режимах ее работы. В [4, 5] отражены результаты исследований работы MAX1759 в режиме понижения напряжения. Эта микросхема работает по алгоритму, отличному от представленного в [2, 3].

### Результаты экспериментов

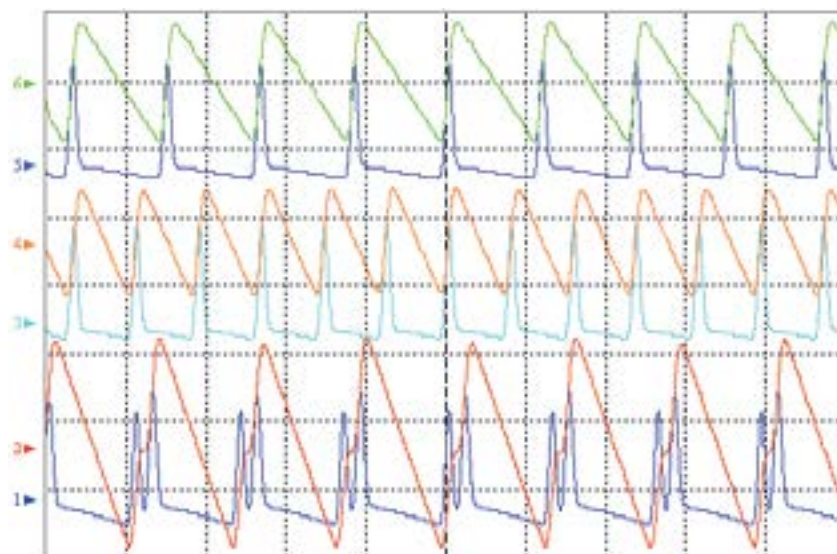
На рисунках 2 – 4 представлены некоторые результаты измерения пульсаций выходного напряжения для работы в режиме, когда при входном напряжении  $U_{\text{вх}} = 5.1$  В и выходном –  $U_{\text{вых}} = 3.5$  В изменялись токи нагрузки от 11 до 91 мА.



**Рис. 2.** Переменные составляющие (20 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 3.5$  В (2, 4, 6 – 50 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3, 5 – 50 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 11 мА; 3, 4 – 14 мА; 5, 6 – 19 мА.



**Рис. 3.** Переменные составляющие (5 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 3.5$  В (2, 4 – 20 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3 – 50 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 33 мА; 3, 4 – 31 мА.

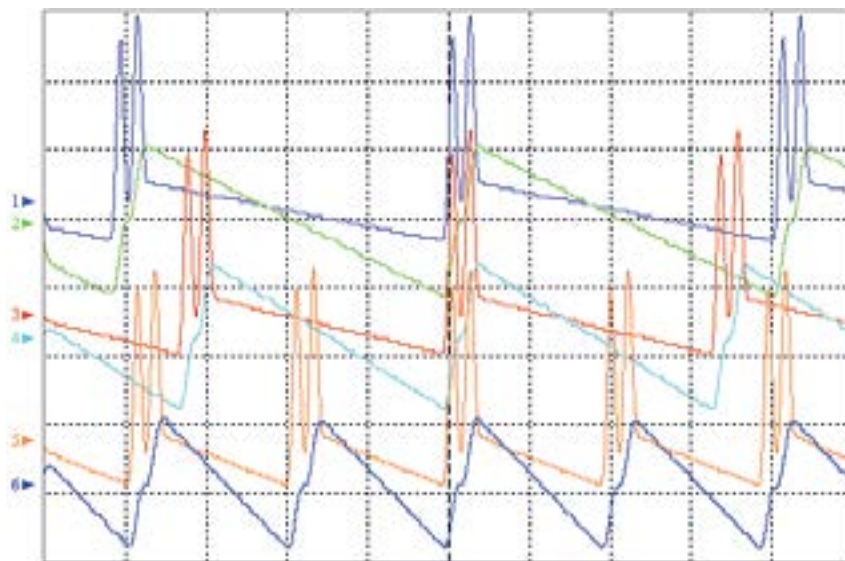


**Рис. 4.** Переменные составляющие (5 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 3.5$  В (2, 4, 6 – 20 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3, 5 – 200 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 91 мА; 3, 4 – 73 мА; 5, 6 – 50 мА.

Из приведенных на этих рисунках результатов видно, как увеличивается частота пульсаций выходного напряжения с увеличением тока нагрузки. Например, при токе нагрузки 11 мА эта частота составляет около 35 кГц, а при токе нагрузки 73 мА – примерно 230 кГц. Видно также, что в каждом цикле момент начала увеличения выходного напряжения совпадает с моментом увеличения напряжения на «летающем» конденсаторе, то есть с моментом начала его заряда. Это возможно в случае, когда в момент заряда «летающего» конденсатора ключ SW4 (рис. 1) замкнут, и величина выходного напряжения увеличивается за счет напряжения на входе. О таком алгоритме работы микросхемы в [2, 3] не сообщается.

Продолжительность заряда «летающего» конденсатора составляет около 500 нс, то есть половину периода тактовой частоты осциллятора. Время разряда «летающего» конденсатора можно оценить по участку крутого уменьшения напряжения на нем. Средняя величина времени разряда также примерно равна 500 нс. Таким образом, длительность всего цикла заряд–разряд составляет около 1 мкс, что близко к периоду тактовой частоты осциллятора микросхемы. После участка крутого уменьшения напряжения на «летающем» конденсаторе имеется участок более медленного спада. Его продолжительность уменьшается по мере увеличения тока нагрузки. Амплитуда (размах) пульсаций выходного напряжения составляет от 30 до 40 мВ, за исключением представленного на рис. 4 режима для максимального тока нагрузки, близкого к 100 мА. В этом режиме одного цикла заряд–разряд оказалось недостаточно. На напряжении «летающего» конденсатора видны два цикла, а на выходном – имеются соответствующие немонотонности на передних фронтах пульсаций, амплитуда которых составляет около 60 мВ.

Эксперименты показывают, что чем меньше разность между входным и выходным напряжениями, тем при меньших токах начинается появление двух циклов заряд–разряд. На рис. 5 представлены иллюстрирующие это утверждение формы переменных составляющих выходного напряжения и соответствующие им формы напряжения на «летающем»

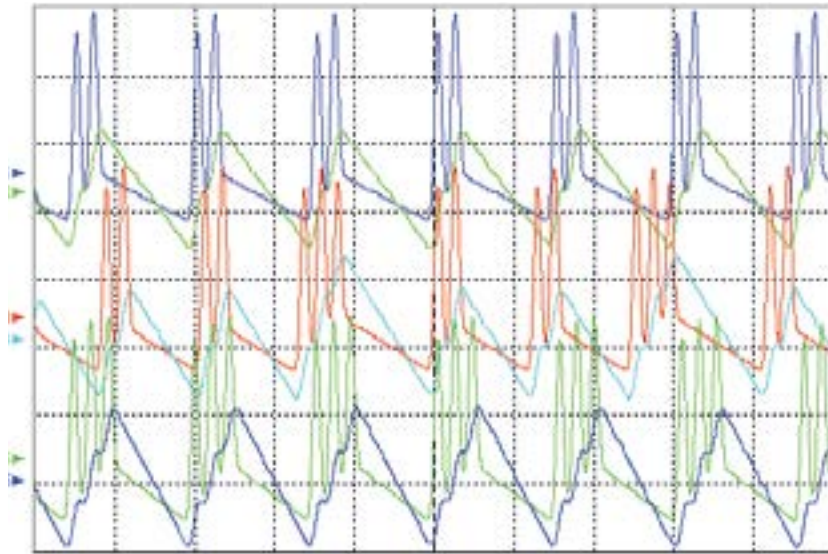


**Рис. 5.** Переменные составляющие (5 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 4.8$  В (2, 4, 6 – 20 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3, 5 – 50 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 15 мА; 3, 4 – 18 мА; 5, 6 – 31 мА.

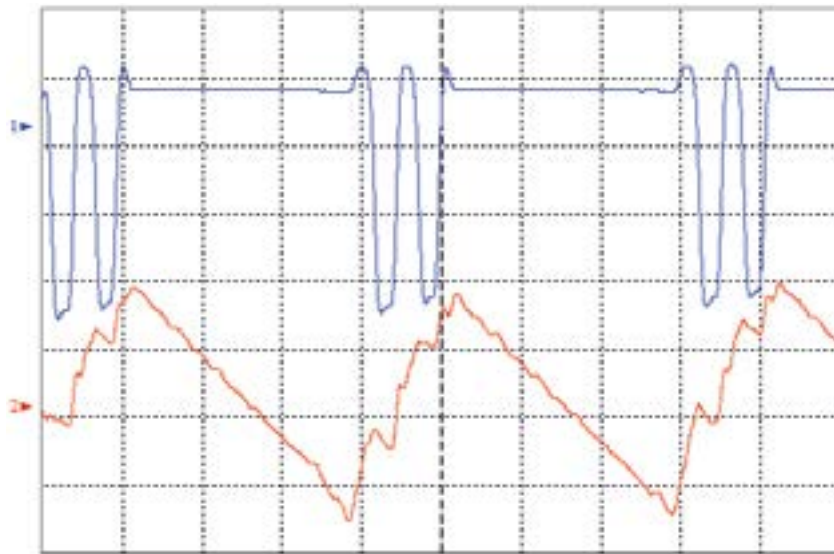
конденсаторе, полученные при том же входном напряжении  $\sim 5.1$  В, но для напряжения на выходе  $\sim 4.8$  В. Передние фронты пульсаций выходного напряжения неровные – на них имеются всплески. Это происходит потому, что одного цикла заряд–разряд не хватает, чтобы поднять напряжение до верхнего уровня. В данном случае требуется два цикла заряд–разряд конденсатора, причем время заряда примерно совпадает со временем разряда и их суммарная длительность составляет около 1 мкс, что соответствует тактовой частоте осциллятора 1 МГц.

На рис. 6 показаны аналогичные формы напряжения для больших токов. Видно, как увеличивается количество циклов заряд–разряд «летающего» конденсатора при увеличении выходного тока. Для тока 45 мА хорошо виден процесс перехода от двух циклов к трем. Время каждого цикла по-прежнему около 1 мкс. Кроме циклов заряд–разряд, на формах напряжения на «летающем» конденсаторе имеются участки медленного разряда. Они соответствуют спадам выходного напряжения. В это время «летающий» конденсатор не подключен к нагрузке, а уменьшение его напряжения происходит за счет тока утечки на «землю».

Постепенно с увеличением выходного тока преобразователь перестраивается на другой режим работы. Формы переменных составляющих выходного напряжения и напряжения на «летающем» конденсаторе для тока 77 мА представлены на рис. 7. В отличие от рассмотренных выше режимов с меньшими токами здесь видны циклы разряд–заряд. «Летающий» конденсатор большую часть времени хорошо заряжен. После последнего разряда он не находится в фазе покоя, а сразу заряжается и переводится в другой режим работы. Обращает на себя внимание тот факт, что размах изменения напряжения на «летающем» конденсаторе для этого режима, в отличие от режимов с меньшими токами, составляет около 3.5 В. Такое возможно только, если микросхема начинает работать в режиме удвоителя напряжения.

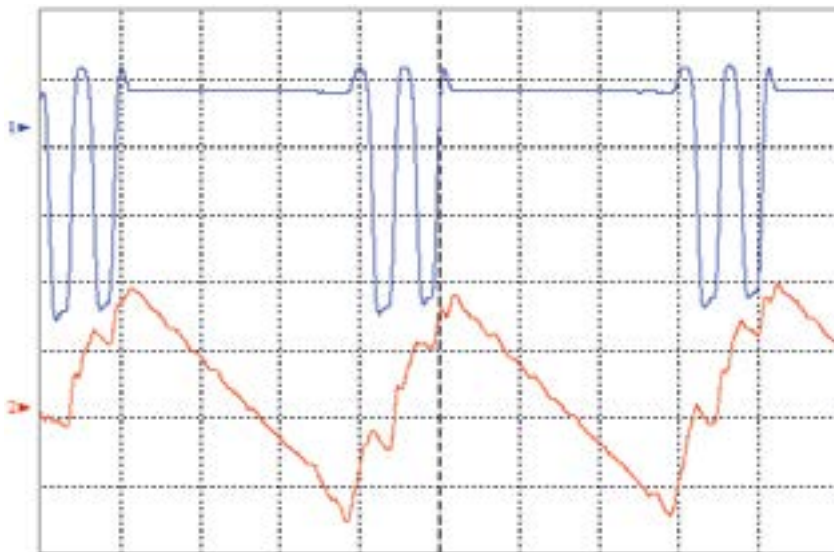


**Рис. 6.** Переменные составляющие (5 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 4.8$  В (2, 4, 6 – 20 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3, 5 – 50 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 39 мА; 3, 4 – 45 мА; 5, 6 – 55 мА.



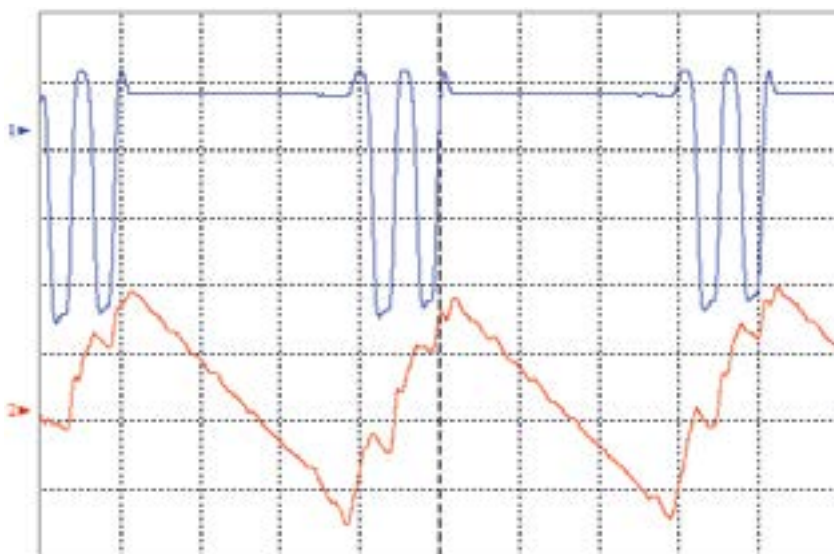
**Рис. 7.** Переменные составляющие (2 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 4.8$  В (2 – 20 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1 – 1 В/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1$  В и токе нагрузки 77 мА.

Представление о режиме удвоителя напряжения дает результат, показанный на рис. 8. Здесь напряжение на летающем конденсаторе измерялось при открытом входе осциллографа. Оно позволяет оценить величину максимального подъема напряжения на «летающем» конденсаторе и напряжение на нем при максимальном его разряде.



**Рис. 8.** Переменная составляющая (2 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 4.8 \text{ В}$  (2 – 20 мВ/дел.) и напряжение (2 мкс/дел.) на «летающем» конденсаторе, измеренное при открытом входе осциллографа (1 – 1 В/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 5.1 \text{ В}$  и токе нагрузки 77 мА.

Проведенные эксперименты показали, что иногда преобразователь работает вблизи предельных режимов по току без перехода в режим удвоителя напряжения и при сравнительно небольшой разнице в величинах входных и выходных напряжений. Чтобы поддерживать напряжение на выходе, в таких случаях требуется значительное количество циклов заряд–разряд «летающего» конденсатора. Передние фронты основных пульсаций выходного напряжения становятся длиннее, что в целом приводит к увеличению их периода. Пример такой работы отражает рис. 9. Показанные на нем временные зависимости соответствуют малому входному напряжению и близкому к минимальному выходному.



**Рис. 9.** Переменные составляющие (2 мкс/дел.) выходного напряжения  $U_{\text{вых}} \sim 1.7 \text{ В}$  (2, 4, 6 – 10 мВ/дел.) и напряжения на «летающем» конденсаторе (1, 3, 5 – 200 мВ/дел.) при  $U_{\text{вх}} \sim 2.2 \text{ В}$  при различных значениях тока нагрузки: 1, 2 – 77 мА; 3, 4 – 85 мА; 5, 6 – 95 мА.



Время цикла заряд–разряд в этом случае составляет около 0.8 мкс, то есть частота пульсаций напряжения на «летающем» конденсаторе даже немного выше, чем тактовая частота осциллятора микросхемы.

### Выводы

Проведенные исследования преобразователя напряжения MCP1253 с накачкой заряда в режиме понижения напряжения показали, что описанный в [2, 3] алгоритм работы микросхемы, состоящий из трех фаз, упомянутых во Введении, не характеризует всех случаев ее использования при всех предусмотренных документацией возможных параметрах на входе и выходе. Алгоритм много сложнее. Он зависит от соотношения входного и выходного напряжений, токов нагрузки и даже от уровней этих напряжений.

Представленные в статье результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Задание № 8.5577.2017/БЧ на выполнение проекта по теме "Исследование шумовых характеристик и пульсаций микросхем мобильных источников вторичного электропитания").

### Литература:

1. Buck/Boost Regulating Charge Pump in  $\mu$ MAX, MAX1759, Data Sheet 19-1600. Maxim Integrated Products, 2000, 10 pp.
2. Low Noise, Positive-Regulated Charge Pump MCP1252/3, Data Sheet DS2175A, Microchip Technology, 2002, 18 pp.
3. Converting a 5.0 V Supply Rail to a Regulated 3.0 V. Microchip Technology Application Note AN1025 (DS01025A), 2006, 8 pp.
4. 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.
5. 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.