

УДК: 621.311.6:001.891.5

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСХЕМ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С НАКАЧКОЙ ЗАРЯДА

В.К. Битюков[@], д.т.н., заведующий кафедрой, профессор

А.А. Иванов, аспирант

А.В. Миронов, аспирант

Н.Г. Михневич, заведующий лабораторией

В.С. Перфильев, магистрант

В.А. Петров, д.т.н., профессор

Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

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

Создан автоматизированный стенд для изучения характеристик микросхем различных видов мобильных источников стабилизированного вторичного электропитания с накачкой заряда, получающих энергию от батарей. Стенд имеет модульную структуру, включающую, помимо исследуемого модуля накачки заряда, также модули питания, управления, нагрузки, индикации и модуль USB для связи с компьютером. Стенд позволяет путем замены лишь одной маленькой измерительной платы проводить исследования микросхем различных типов. Управляющий модуль построен на базе микроконтроллера PIC18F2550. В состав автоматизированного измерительного комплекса входят мультиметр и осциллограф. Исследуемыми параметрами являются нагрузочные и регулировочные характеристики, формы пульсаций выходного напряжения, реакция микросхем на ступенчатое отключение нагрузки. Одной из важнейших целей исследований является изучение алгоритмов работы микросхем накачки заряда. Разработана программа управления стендом путем создания его виртуальной передней панели, что вместе с виртуальной панелью осциллографа и имеющимся программным обеспечением мультиметра позволяет управлять режимами работы оборудования и проведением измерений дистанционно при удаленном доступе по сети Интернет. С помощью созданного стенда получены новые экспериментальные данные для микросхемы MAX1759 по всем указанным выше характеристикам и впервые изучен алгоритм работы этой микросхемы в режиме понижения напряжения.

Ключевые слова: стенд, микросхема, характеристики, алгоритм работы, накачки заряда, программа управления, виртуальная панель.

TEST BENCH FOR STUDYING CHARACTERISTICS OF INTEGRATED CIRCUIT CHIPS OF SECONDARY REGULATED CHARGE PUMP POWER SUPPLY

V.K. Bityukov[@],
A. A. Ivanov,
A. V. Mironov,
N. G. Mikhnevich,
V.S. Perfiliev,
V. A. Petrov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
@Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

An automated test bench for the study of the characteristics of various kinds of chips of mobile sources of regulated charge pump secondary power supply receiving energy from batteries was created. Having a modular structure, the test bench includes, in addition to the test charge pump module, power supply, control, load, display modules, and a USB module for connection with a computer. The test bench enables carrying out research of various types of chips by changing only one small measuring board. The control module is based on PIC18F2550 microcontroller. The automated measuring system consists of a multimeter and oscilloscope. The investigated characteristics are output voltage as a function of load current, output voltage as a function of supply voltage, the forms of the output voltage ripple, the response of chips to a stepped load transition. One of the major goals of the research is to study algorithms of the charge pump circuits. A program for controlling the test bench by creating a virtual front panel was developed. Together with a virtual panel of the oscilloscope and available multimeter software this allows controlling the equipment operating parameters and making measurements remotely over the Internet. Using the created test bench new experimental data on all of the above characteristics for MAX1759 chip were obtained, and an algorithm of this chip in the buck mode operation was studied for the first time.

Keywords: test bench, integrated circuit chip, characteristics, algorithm, charge pump, control program, virtual panel.

Введение

Источники вторичного электропитания на базе интегральных DC–DC преобразователей с накачкой заряда находят все более широкое применение в качестве мобильных источников вторичного электропитания в устройствах небольшой мощности, к которым предъявляются высокие требования по величине КПД, малым габаритам и низкой стоимости. Микросхемы для таких источников питания выпускаются ведущими зарубежными производителями электронных компонентов. Однако литературы по принципам построения и схемным решениям таких преобразователей мало, а имеющиеся публикации не охватывают все типы преобразователей. Особенно малочисленны сведения по микросхемам, позволяющим получить стабилизированное напряжение и в режиме повышения напряжения батареи, и в режиме его понижения. Количество таких микросхем

крайне ограничено. К их числу относятся микросхемы MCP1252/3 компании Microchip Technology, микросхема MAX1759 компании Maxim Integrated и микросхема LTC3245 компании Linear Technology [1–3]. К сожалению, приводимые в описаниях этих микросхем основные технические характеристики и параметры являются далеко не полными и охватывают не все области их применения, а упрощенные блок-схемы не дают информации об алгоритме их работы. Например, для микросхемы MCP1252/3 зависимость выходного напряжения от входного дана лишь для одного значения выходного напряжения, равного 3 В, хотя микросхема позволяет регулировать выходное напряжение в диапазоне от 1.5 до 5.5 В, причем эта зависимость дана для лишь для микросхемы MCP1252, имеющей тактовую частоту переключения 650 кГц, а для аналогичной микросхемы MCP1253, имеющей частоту переключения 1 МГц, данных не приводится вообще. Аналогичная ситуация имеет место с другими характеристиками, например, с КПД, реакцией на ступенчатое изменение нагрузки, пульсациями выходного напряжения.

В периодической литературе сведения по методам исследований и результатам изучения всего комплекса характеристик DC–DC преобразователей с накачкой заряда отсутствуют.

Все выше сказанное обуславливает потребность в экспериментальном определении полного объема характеристик микросхем DC–DC преобразователей с накачкой заряда и выяснении алгоритма их работы.

В связи с необходимостью получения большого количества экспериментальной информации для проведения исследований предстояло создать аппаратуру, позволяющую получать входные напряжения в нужном диапазоне, изменять сопротивление нагрузки для получения токов до 100 мА в различных режимах и обеспечить возможность быстрого ступенчатого изменения сопротивления нагрузки. Такие исследования можно провести только на автоматизированном стенде с использованием современной измерительной техники. Поэтому первой и важнейшей задачей явилась разработка метода таких исследований и создание аппаратуры для его реализации.

Экспериментальный стенд и измерительная аппаратура

Структурная схема созданного стенда вместе с измерительным оборудованием показана на рис. 1 [4–6]. В стенде, кроме самого устройства накачки заряда, предусмотрена возможность регулировки и измерения входных и выходных параметров, наличие индикации, обеспечение его связи с компьютером. В нем реализован модульный принцип конструирования. В составе стенда имеется несколько модулей, находящихся в одном корпусе: модуль питания, модуль управления, входной модуль, модуль накачки заряда, модуль нагрузки и модуль USB. Кроме созданного стенда, в составе лабораторного комплекса имеется измерительное оборудование, включающее мультиметр 34405A фирмы Agilent Technologies и осциллограф GDS-72202 компании GW instek. Мультиметр, осциллограф и модуль управления стендом находятся под управлением компьютера типа IBM PC.

Подключаемый к сети модуль питания обеспечивает стабилизированным напряжением +5 В модуль управления, модуль индикации, модуль накачки заряда, модуль USB и осуществляет подачу переменного напряжения 9 В частотой 50 Гц на входной модуль. Входной модуль предназначен для регулировки входного напряжения модуля накачки заряда. Входной модуль реализован на интегральной микросхеме LM317, являющейся

регулируемым компенсационным стабилизатором с непрерывным регулированием. Установка выходного напряжения модуля накачки заряда осуществляется модулем управления в диапазоне от +2.5 до +5.5 В, при этом отображается положение цифрового переключателя на линейном светодиодном индикаторе. Точное значение выходного напряжения измеряется мультиметром.

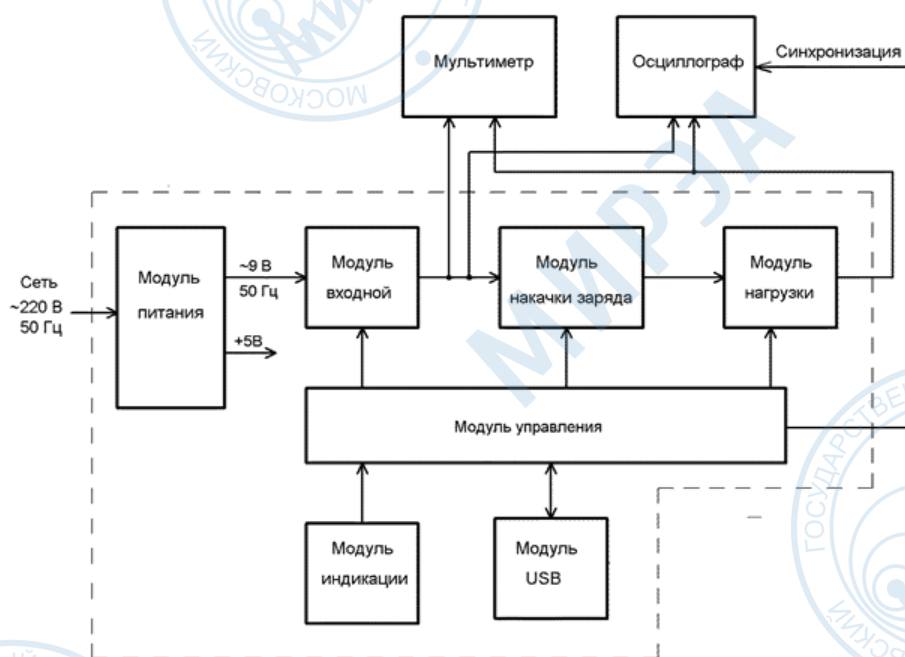


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда.

Модуль нагрузки выполнен на резистивной матрице R–2R, коммутируемой MOSFET транзисторами, при этом номер нагрузочного резистора отображается на цифровом светодиодном индикаторе. Матрица включает в себя 4 резистора ($R = 100 \text{ Ом}$), что позволяет получить 16 значений сопротивления нагрузки в диапазоне от 53 до 800 Ом.

Модуль управления выполнен на микроконтроллере PIC18F2550, который осуществляет управление основными модулями стенда и контроль их состояния, а также обеспечивает взаимодействие через модуль USB с компьютером. Для регистрации переходного процесса на выходе модуля накачки заряда при установке режима динамической нагрузки микроконтроллер осуществляет коммутацию нагрузочного резистора путем отключения и включения в цепь нагрузки резистора сопротивлением 60 Ом и формирование синхросигнала запуска осциллографа в виде прямоугольных импульсов амплитудой 5 В и длительностью около 30 мкс.

Принципиальная схема модуля накачки заряда приведена на рис. 2. Основой модуля накачки заряда является исследуемая микросхема. Такой была микросхема MAX1759, ставшая первым объектом исследований в настоящей работе. Для построения DC–DC преобразователя эта микросхема требует подключения всего трех внешних конденсаторов C1, C2 и C3. Частота переключения конденсатора накачки заряда C2 может составлять от 1.2 до 1.8 МГц. В этой связи для обеспечения приемлемого переходного процесса,

получения минимальных пульсаций выходного напряжения и обеспечения максимально-го тока нагрузки для входного и выходного конденсаторов C1 и C3 применены керамические SMD конденсаторы емкостью 10 мкФ, а керамический конденсатор накачки C2 имеет емкость 0.33 мкФ с эквивалентным последовательным сопротивлением $R_{ESR} < 0.02 \text{ Ом}$.

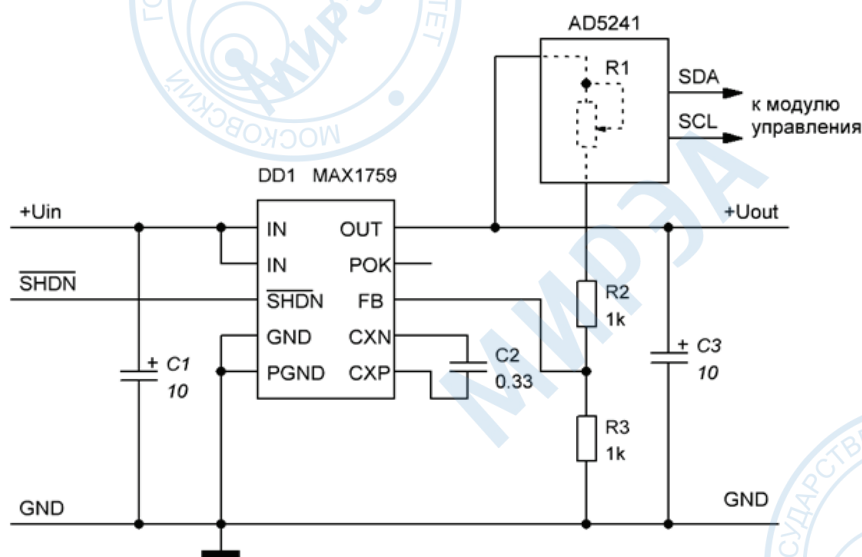


Рис. 2. Схема модуля накачки заряда.

Выходное напряжение устанавливается с помощью резистивного делителя, образованного резисторами R1, R2 и R3, включенными между выходом OUT и входом обратной связи FB. Резистор R1 реализован с помощью цифрового потенциометра AD5241 величиной 100 кОм и имеет 256 позиций, что позволяет устанавливать выходное стабилизированное напряжение на выходе модуля с шагом 0.11 В в диапазоне от 2.5 до 5.3 В. Установка позиции выходного цифрового потенциометра осуществляется модулем управления по двухпроводному интерфейсу I2C (SDA, SCL).

Кроме основного режима, в модуле накачки заряда предусмотрен режим ожидания, при котором выход OUT микросхемы MAX1759 переводится в высокоимпедансное состояние, а потребляемый микросхемой ток падает до 1 мкА, что ниже, чем ток саморазряда большинства химических источников тока. Перевод модуля в режим ожидания осуществляется подачей низкого напряжения (лог. «0») с модуля управления на вход SHDN микросхемы, что позволяет полностью отсоединить нагрузку от источника и тем самым продлить срок службы батареи. Эта функция может использоваться в распределенных системах питания с цифровым управлением.

Как отмечалось выше, одной из основных целей работы стало создание программного обеспечения, позволяющего осуществлять дистанционное управление стендом. Для этого прежде всего нужно было получить на экране монитора изображение его лицевой панели и обеспечить управление стендом путем кликов мыши на кнопках данного изображения. Все переключения в созданном стенде осуществляются электронным микроконтроллерным переключателем, упрощенная структурная схема которого показана на рис. 3.

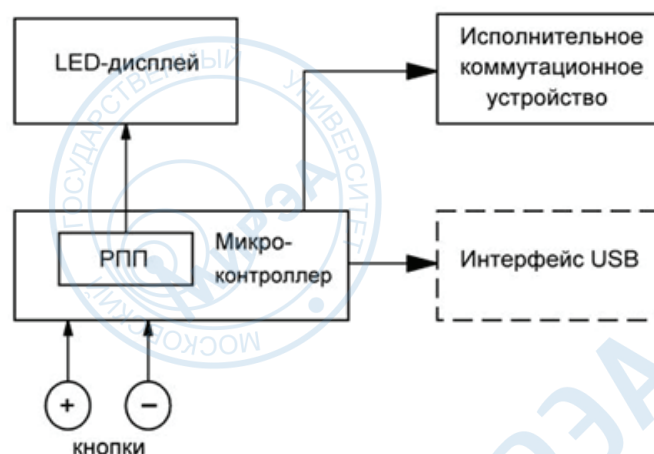


Рис. 3. Схема микроконтроллерного переключателя.

Регистр положения переключателя (РПП) сохраняет текущее положение переключателя. Код РПП может быть изменен микроконтроллером при поступлении запроса от ПК (ПК) или кнопочным переключателем, расположенным на передней панели лабораторного стенда. Каждая кнопка стенда имеет порядковый номер (адрес) и выполняет одно заданное действие: либо увеличивает значение кода РПП, либо его уменьшает. Чтобы изменить положение переключателя со стороны ПК, достаточно кликнуть мышкой по виртуальной кнопке, что приводит к формированию и передаче стенду послышки-запроса. Прием стендом послышки-запроса приводит к изменению кода РПП переданной кнопки и к последующей передаче его нового значения в послышке-сообщении к ПК. Необходимо отметить, что для синхронизации РПП стенда с ПК предусмотрена также передача, по запросу ПК, послышки-сообщения, содержащей текущие данные всех РПП стенда.

Стенд ИВЭ имеет в своем составе интерфейсный модуль USB, который реализован на базе аппаратного моста USB – UART фирмы FTDI. Микросхема FT232R позволяет организовать последовательный обмен данными между микроконтроллером и компьютером через шину USB по протоколу RS-232. На стороне ПК устанавливается драйвер, создающий виртуальный COM-порт.

Таким образом, задача построения виртуальной лицевой панели сводилась к созданию графического представления передней панели стенда и написанию программ обработчиков событий, отвечающих за тот или иной орган управления. Неотъемлемой частью программного обеспечения является периодическая проверка входящих сообщений с целью установления идентичных состояний у виртуального и реального стендов.

Графическое представление лицевой панели стенда проектировали программными средствами компании Adobe, такими как Photoshop и Illustrator. Первоначально на рабочее поле в среде разработки RAD Studio Embarcadero C++ Builder помещают изображение стенда, которое использовали при изготовлении лицевой панели реального стенда. Для этого изображение было переведено из формата .cdr, который используется для хранения файлов проектов программой Corel Draw, в формат .jpg, а также удалены динамические области (т.е. области изображения, которые изменяются в процессе работы стенда). Указанные операции производили при помощи программы Corel Draw (для того, чтобы экспортировать файл проекта в графический файл) и программы Photoshop (для удаления

динамических областей при помощи инструментов «Ластик» и «Заливка»).

Созданная виртуальная лицевая панель стенда практически полностью идентична реальной лицевой панели [7]. Добавлен лишь индикатор, условно показывающий положение переключателя, с помощью которого устанавливаются величины выходного напряжения. Условность заключается в засветке места в интервале регулирования этого напряжения, в которое этот переключатель установлен в настоящий момент, что улучшает удобство работы со стендом по сравнению с использованием реальной лицевой панели.

Необходимо отметить, что благодаря созданной виртуальной лицевой панели стенда можно осуществлять не только локальное управление стендом от находящегося рядом компьютера, но также проводить полноценный эксперимент при удаленном доступе по сети Интернет. Для реализации такого эксперимента используется программа Ammuu Admin v 3.0. Она обеспечивает подключение любого компьютера в сети Интернет к локальному компьютеру, соединенному со стендом и связанным со стендом измерительным оборудованием. По терминологии программы Ammuu Admin, компьютер, с которого осуществляется управление локальным компьютером, является оператором, а электрически связанный с оборудованием экспериментального стенда компьютер является клиентом. Как отмечалось выше, измерительным оборудованием для проведения эксперимента является осциллограф GDS-72202 и мультиметр AG 34405A. Выбор осциллографа обусловлен тем, что в поставляемом вместе с осциллографом программном обеспечении имеется его виртуальная лицевая панель, в точности воспроизводящая реальную лицевую панель прибора и обеспечивающая полнофункциональное управление прибором путем нажатия мышью соответствующих кнопок виртуальной панели либо путем вращения колеса мыши при наведении ее на ручки виртуальной панели осциллографа. Мультиметр 34405A также имеет программное обеспечение, позволяющее проводить измерения с помощью линейки инструментов, встраиваемой в программы Word или Excel. Проведение эксперимента при осуществлении удаленного доступа к измерительному оборудованию было проверено и хорошо себя зарекомендовало в работе.

Объект исследований

В качестве объекта исследований микросхем DC–DC преобразователей выбрана малогабаритная микросхема MAX1759, обладающая уникальной архитектурой накачки заряда, позволяющая получать стабилизированное регулируемое выходное напряжение $U_{вых}$ в диапазоне от 2.5 до 5.5 В и токе нагрузки до 100 мА при любых значениях входного напряжения $U_{вх}$ в диапазоне от 1.6 до 5.5 В. Микросхема является преобразователем DC–DC, который стабилизирует выходное напряжение при изменении входного напряжения в диапазоне как выше, так и ниже выходного. Данное свойство весьма необходимо, например, при использовании в качестве источника питания различной малогабаритной аппаратуры Li⁺-батарей, которые в течение срока службы меняют свое напряжение от 3.6 до 1.5 В. В этом случае для того, чтобы получать на выходе преобразователя DC–DC напряжение 3.3 В, сначала требуется понижающий преобразователь. При снижении напряжения батареи ниже 3.3 В требуется повышающий преобразователь. Уникальные возможности поддержания выходного напряжения ниже или выше входного напряжения достигаются применением оригинальной схемы управления, которая реализует режим

регулируемого удвоителя напряжения ($U_{\text{вх}} < U_{\text{вых}}$), а также режим понижающего стробируемого ключа ($U_{\text{вх}} > U_{\text{вых}}$), в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки.

К сожалению, алгоритм выбора режима работы с понижением или повышением входного напряжения в документации не описан. Отмечено только, что когда $U_{\text{вх}}$ ниже, чем $U_{\text{вых}}$, накачка заряда работает как регулируемый повышающий ступеньками удвоитель напряжения, а когда $U_{\text{вх}}$ больше, чем $U_{\text{вых}}$, накачка заряда работает как понижающий напряжение управляемый импульсами ключ. Указывается, что в последнем случае, если ток нагрузки мал, контроллер соединяет отрицательный полюс передающего заряд конденсатора с «землей», а заряд переносится путем попеременного подключения этого конденсатора к входному и выходному напряжению. Отмечается, что так происходит не всегда. В случае больших токов нагрузки такой режим не позволяет получать нужные величины $U_{\text{вых}}$, и, несмотря на то, что $U_{\text{вх}} > U_{\text{вых}}$, контроллер автоматически переводит схему накачки в режим повышения напряжения. Эти общие замечания не подкрепляются какими-либо численными характеристиками токов нагрузки и выходных напряжений. Формы сигналов выходного напряжения даны лишь для одного значения входного напряжения при одном значении тока нагрузки. Аналогичная ситуация с реакцией на ступенчатое изменение тока нагрузки.

Далее были проведены исследования регулировочных и нагрузочных характеристик, то есть соответственно зависимостей выходного напряжения от входного при различных токах нагрузки и зависимостей напряжения на выходе от тока нагрузки при различных входных напряжениях, определение КПД в различных режимах, изучение реакции выходного напряжения на ступенчатое изменение нагрузки и расшифровка алгоритма работы микросхемы [8–12].

Результаты и их обсуждение

Измерения регулировочных характеристик и форм выходного напряжения. Регулировочные характеристики, которые, по сути, должны представлять собой зависимость выходных параметров от входных, в схемах стабилизаторов напряжения с накачкой заряда зависят от сопротивления нагрузки. В связи с большим объемом полученной экспериментальной информации ниже будут приведены лишь некоторые примеры результатов для одного значения сопротивления нагрузки 820 Ом.

На рис. 4 в качестве такого примера показаны формы переменной составляющей выходного напряжения при уровне ~2.5 В и восьми значениях входного напряжения, равных 5.5 В (1), 4.6 В (2), 3.1 В (3), 2.9 В (4), 1.70 В (5), 1.68 В (6), 1.64 В (7) и 1.63 В (8). Обращает на себя внимание различие периодов пульсаций выходного напряжения. Так, например, при $U_{\text{вх}} \sim 5.5$ В период пульсаций составляет примерно 225 мкс, при $U_{\text{вх}} \sim 4.6$ В около 150 мкс, при $U_{\text{вх}} \sim 3.1$ В около 40 мкс, а при остальных значениях входного напряжения период пульсаций $U_{\text{вых}}$ — около 30 мкс. При этом сначала наблюдается уменьшение величины пульсаций, а затем происходит ее стабилизация.

Результаты измерений нагрузочных характеристик и реакции на ступенчатое отключение нагрузки. В соответствии с возможностями стенда по выбору положения переключателя резисторов нагрузки для каждого из режимов исследования нагрузочных характеристик $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ получено по 15 точек. На рис. 5 показаны полученные результаты

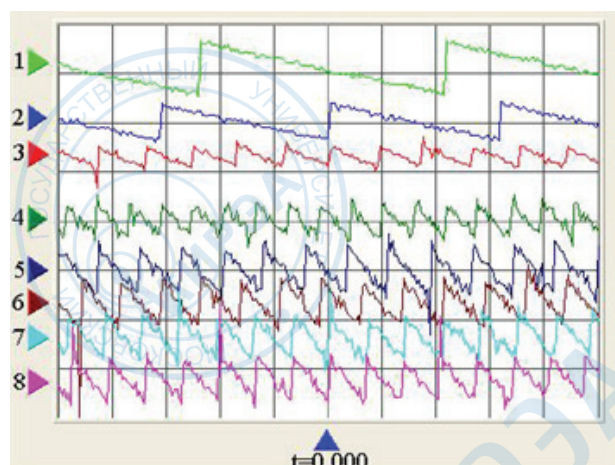


Рис. 4. Формы переменной составляющей выходного напряжения при $U_{\text{вых}} \sim 2.5$ В и различных входных напряжениях:
 1, 2 – 50 мкс/дел., 100 мВ/дел.; 3 – 50 мкс/дел., 50 мВ/дел.;
 4, 5, 6, 7, 8 – 50 мкс/дел., 20 мВ/дел

для трех значений входного напряжения $U_{\text{вх}}$: минимального, которое составило примерно 1.7 В, среднего, составляющего ~ 3.0 В, и максимального ~ 5.5 В. При этом для каждого из приведенных величин входного напряжения значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ устанавливали примерно равными 2.5 В, 3.6 В и 5.2 В, то есть минимальное, среднее и максимальное из возможного диапазона стабилизированного выходного напряжения. Таким образом, для каждого уровня напряжения на нагрузке получали три нагрузочные характеристики, за исключением режима с $U_{\text{вых}} \sim 5.2$ В, для которого получены только две характеристики, так как при входном напряжении $U_{\text{вх}} \sim 1.7$ В уровень выходного напряжения не может быть реализован. Линейные зависимости хорошо аппроксимируют экспериментальные точки. Стандартное отклонение в основном не превышает 0.002 В, за исключением режима с $U_{\text{вх}} \sim 1.7$ В и $U_{\text{вых}} \sim 3.6$ В. Этот режим является особым, поскольку здесь выходное напряжение существенно уменьшается с увеличением тока нагрузки.

Важное значение имеет зависимость форм пульсаций выходного напряжения от тока нагрузки. На рис. 6 и 7 в качестве примера показаны эти формы для двух режимов. В первом из них входное напряжение составляло ~ 5.5 В, а выходное ~ 2.5 В. Ток нагрузки изменяли путем изменения сопротивления нагрузочного резистора. Результаты, показанные на рис. 7, соответствуют входному напряжению 5.5 В и выходному ~ 5.2 В. Из представленных здесь форм 5 и 6 (токи нагрузки составляют соответственно 65.3 и 96.7 мА) видно изменение режима работы микросхемы, несмотря на то, что везде преобразователь работает в режиме понижения напряжения.

В связи с тем, что микросхема MAX1759, наряду с использованием в качестве стационарного стабилизированного источника напряжения постоянного тока, предназначена также для работы в условиях включения и выключения нагрузки, исследованы переходные процессы в этих режимах работы. На рис. 8 в качестве примера показаны результаты для переменной составляющей выходного напряжения, полученные в условиях, когда постоянная составляющая (среднее значение) $U_{\text{вых}}$ равна примерно 3.6 В, и устанавливались три различных значения напряжения на входе, из которых одно превышает выходное, другое близко к нему и третье – в два раза меньше $U_{\text{вых}}$. Разрыв цепи нагрузки про-

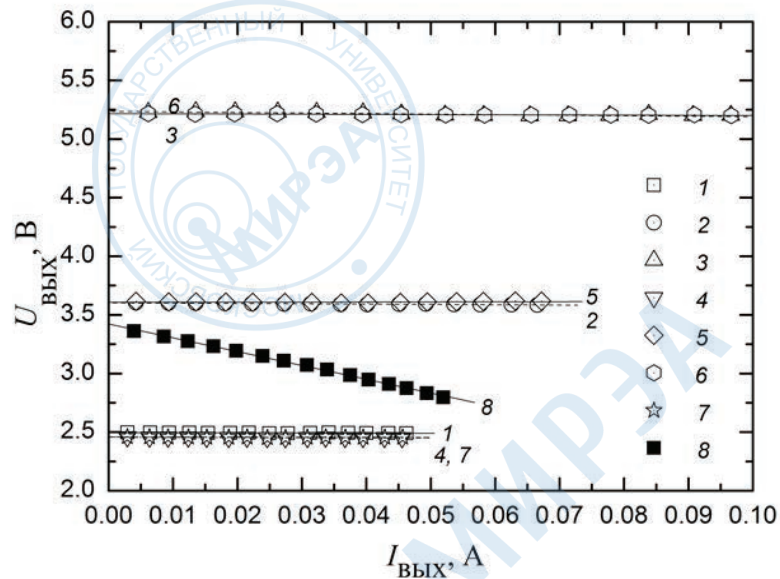


Рис. 5. Нагрузочные характеристики:
1, 2, 3 – $U_{\text{вх}} \sim 5.5$ В; 4, 5, 6 – $U_{\text{вх}} \sim 3.0$ В; 7, 8 – $U_{\text{вх}} \sim 1.7$ В.

изводили периодически. Период коммутации составлял примерно 300 мкс, а промежуток времени, в течение которого цепь нагрузки находилась в разрыве, составлял примерно 30 мкс.

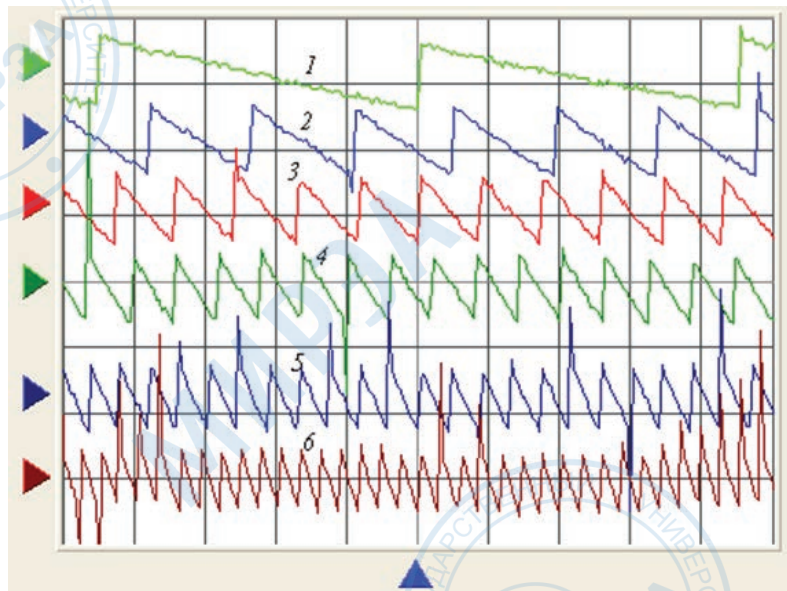


Рис. 6. Формы переменной составляющей выходного напряжения при $U_{\text{вх}} \sim 5.5$ В, $U_{\text{вх}} \sim 2.49$ В (50 мкс/дел., 100 мВ/дел.) при различных токах нагрузки: 1 – 2.94 мА, 2 – 9.38 мА, 3 – 15.6 мА, 4 – 21.9 мА, 5 – 31.3 мА, 6 – 46.4 мА.

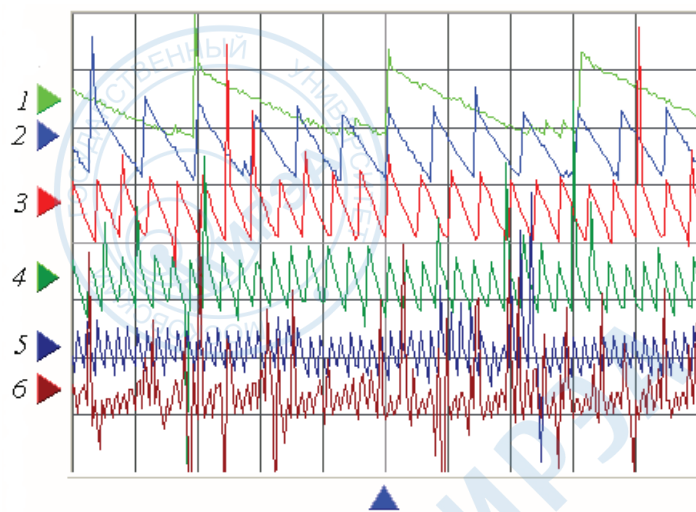


Рис. 7. Формы переменной составляющей выходного напряжения при $U_{вх} \sim 5.5$ В, $U_{вых} \sim 5.2$ В (50 мкс/дел., 100 мВ/дел.) при различных токах нагрузки: 1 – 6.1 мА, 2 – 19.6 мА, 3 – 32.4 мА, 4 – 45.6 мА, 5 – 65.3 мА, 6 – 96.7 мА.

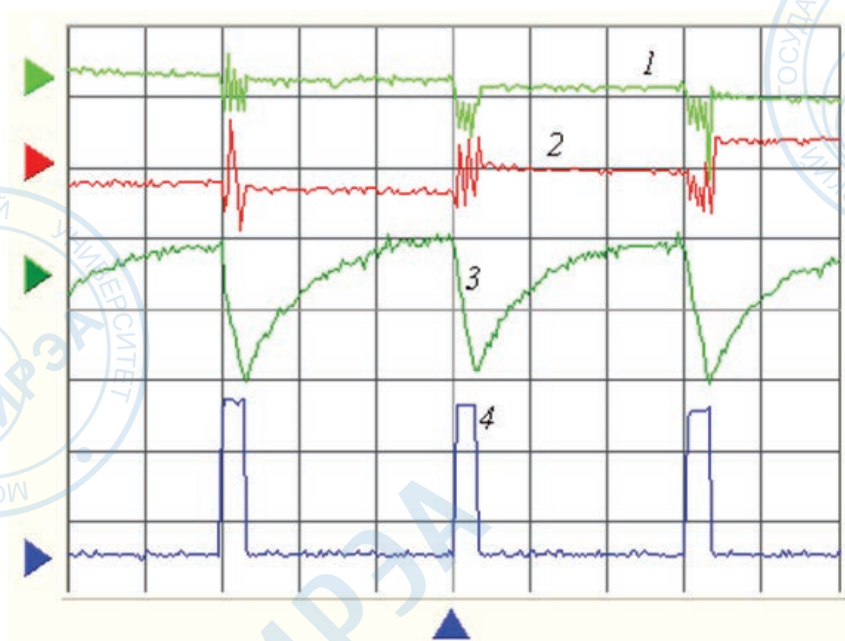


Рис. 8. Реакция переменной составляющей выходного напряжения на ступенчатое отключение нагрузки при $U_{вых} \sim 3.6$ В: 1 – $U_{вх} \sim 5.5$ В, 2 – $U_{вх} \sim 3.1$ В, 3 – $U_{вх} \sim 1.7$ В, 100 мкс/дел., 100 мВ/дел.; 4 – импульсы управления нагрузкой, 100 мкс/дел., 2 В/дел.

Как можно видеть из рис. 8, при работе в режиме понижения напряжения в момент отключения нагрузки наблюдается пачка пульсаций высокой частоты, а в промежутках между отключениями амплитуды переменной составляющей близки к постоянным значениям, однако их величины отличаются даже для соседних периодов.

Алгоритм работы микросхемы MAX1759. Основным элементом схемы с накачкой заряда является «летающий» конденсатор. Он выполняет накопление и управляемый пе-

ренос энергии с входа на выход. Анализируя динамику изменения напряжения на конденсаторе, можно исследовать метод накачки заряда и алгоритм работы микросхемы. С этой целью от обоих полюсов «летающего» конденсатора микросхемы были сделаны выводы, к которым подключался осциллограф.

Из описания микросхемы следует, что в случае, когда выходное напряжение меньше входного, микросхема обеспечивает стабилизацию напряжения за счет работы в ключевом режиме, при котором отрицательный полюс «летающего» конденсатора накачки заряда постоянно подключен к «земле», а положительный – поочередно подсоединяется к батарее с $U_{вх}$, а затем к выходному конденсатору с $U_{вых}$, который подключен к нагрузке. Однако продолжительность этих стадий не указана.

С целью выяснения упомянутых выше факторов зарегистрированы формы переменных составляющих напряжения на «летающем» конденсаторе $U_{лет}$ и напряжения на выходе $U_{вых}$. В качестве примера на рис. 9 показаны три пары таких значений при разных выходных токах $I_{вых}$, равных 25, 33 и 40 мА. Напряжение $U_{вх}=5.2$ В, а $U_{вых}=3.3$ В.

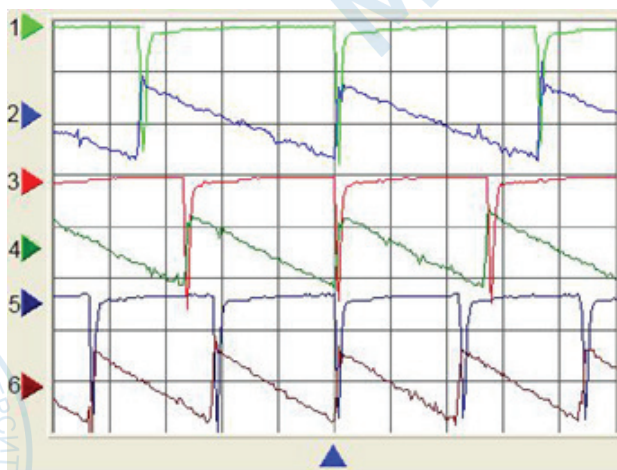


Рис. 9. Переменные составляющие напряжения на $C_{лет}$ (1, 3, 5 – 500 мВ/дел.) и $U_{вых}$ (2, 4, 6 – 50 мВ/дел.), 5 мкс/дел.: 1, 2 – $I_{вых} \sim 25$ мА, 3, 4 – $I_{вых} \sim 33$ мА, 5, 6 – $I_{вых} \sim 40$ мА.

Очевидно (рис. 9), что время разряда $C_{лет}$ точно соответствует времени повышения напряжения $U_{вых}$. Затем немедленно начинается спад $U_{вых}$ и повышение $U_{лет}$. Спад $U_{вых}$ продолжается в течение времени, много большего периода импульсов осциллятора. Длительность спада зависит от величины выходного тока. Поскольку напряжение с делителя напряжения, регулирующего $U_{вых}$, попадает на компаратор микросхемы и сравнивается с опорным эталонным напряжением ($U_{оп}=1.235$ В), то из рис. 9 можно заключить, что разряд «летающего» конденсатора начинается с того момента, когда $U_{вых}$ становится меньше $U_{оп}$. Когда напряжение с делителя превышает опорное, «летающий» конденсатор находится подключенным к $U_{вх}$.

На рис. 10, в его средней части, более детально показано изменение напряжения на «летающем» конденсаторе при работе микросхемы в том же режиме понижения напряжения при различных токах нагрузки. Видно, что время разряда конденсатора составляет примерно 330 нс.

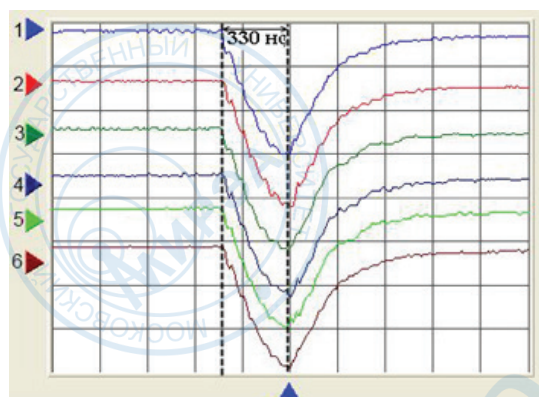


Рис. 10. Формы переменной составляющей напряжения на «летающем» конденсаторе при различных токах нагрузки (500 мВ/дел., 250 нс/дел.): 1 – 24 мА; 2 – 39 мА; 3 – 53 мА; 4 – 71 мА; 5 – 83 мА; 6 – 105 мА.

Специфику работы микросхемы MAX1759 в различных режимах лучше всего анализировать на основе полученных форм переменных составляющих выходного напряжения совместно с упрощенной функциональной диаграммой (рис. 11), представленной в [2]. Из такого анализа следует вывод о том, что можно выделить три группы режимов: $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вх}}$.

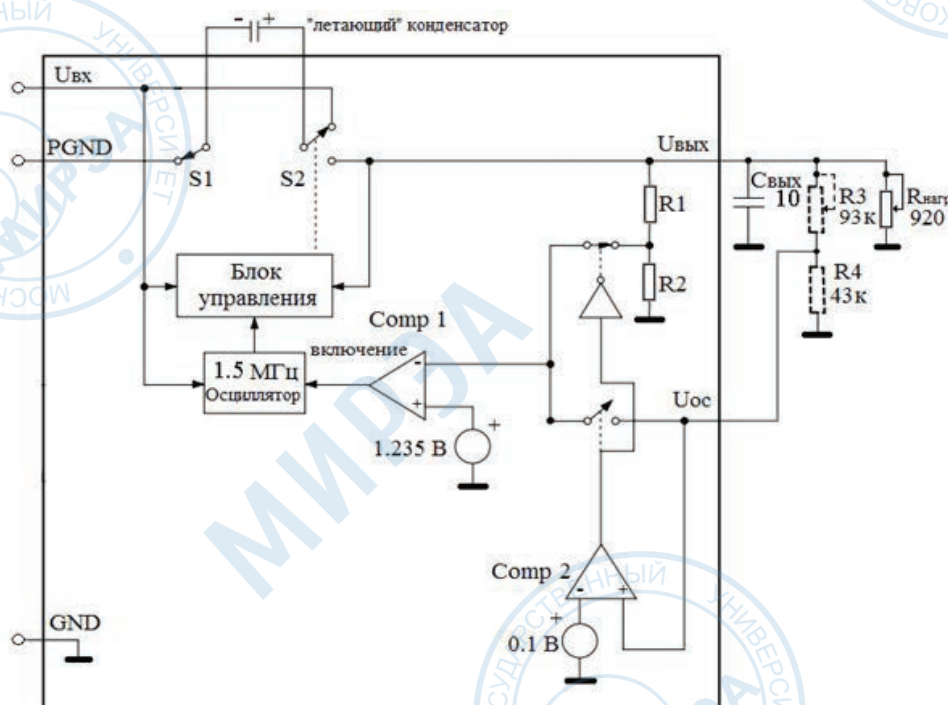


Рис. 11. Упрощенная функциональная схема MAX1759 и ее подключение к нагрузке в режиме понижения напряжения.

В режиме понижения напряжения проведенные исследования позволили получить алгоритм работы микросхемы, представленный на рис. 12. Согласно ему, вначале определяется, необходимо ли понижать напряжение, и если $U_{вх} > U_{вых}$, то начинается работа в ключевом режиме. Управление коммутацией ключа осуществляется блоком управления, на который от осциллятора могут поступать импульсы тактовой частоты. «Летающий» конденсатор заряжается в течение половины периода тактового импульса и остается подключенным к $U_{вх}$ до тех пор, пока компаратор Comp1 (рис. 11) не обнаружит, что напряжение обратной связи $U_{ос}$, поступающее с делителя напряжения, стало равным опорному напряжению $U_{оп}$. В этот момент летающий конденсатор отключается от $U_{вх}$ и подключается к $U_{вых}$. Тактовый импульс поступает от осциллятора на блок управления, и в течение половины этого импульса происходит разряд «летающего» конденсатора, то есть перенос его заряда к выходному конденсатору. По истечении половины тактового импульса «летающий» конденсатор снова подключается к входному напряжению, и вновь начинается перенос заряда от $U_{вх}$ к $C_{лет}$.

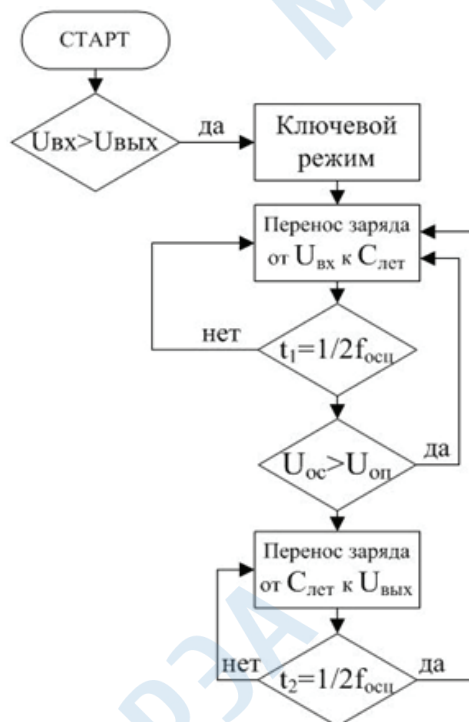


Рис. 12. Алгоритм работы микросхемы MAX1759 в режиме понижения напряжения.

Проведенные эксперименты показали, что время, в течение которого осуществлялся перенос заряда, много меньше, чем время стадии разряда выходного конденсатора. В целом же частота двухстадийных циклов накачки и разряда выходного конденсатора определяется в основном временем разряда выходного конденсатора. Из полученных данных следует, что чем больше $U_{вх}$ превышает $U_{вых}$, тем больше верхний уровень допустимого напряжения на выходном конденсаторе и тем больше время его разряда. В соответствии с паспортными данными, тактовая частота переключения микросхемы, вырабатываемая внутренним осциллятором, в диапазоне входных напряжений от 1.6 до 5.5 В может

находиться в пределах от 1.2 до 1.8 МГц. Казалось бы, что с такой частотой осуществляется накачка заряда. Однако при работе в ключевом режиме частота двухстадийных циклов накачки и разряда выходного конденсатора много меньше. В цикле передачи заряда выходному конденсатору и при его последующем разряде контроллер микросхемы осуществляет пропуск импульсов тактовой частоты микросхемы. Величина повышения напряжения на выходном конденсаторе тем больше, чем больше входное напряжение. Соответственно больше и величины пульсаций. Время разряда и число пропущенных импульсов осциллятора микросхемы зависит от тока нагрузки, то есть от сопротивления нагрузочного резистора. Однако не всегда микросхема при $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}}$ работает в описанном выше ключевом режиме. При больших токах нагрузки схема даже при таком соотношении напряжений может автоматически переключаться в режим накачки с увеличением выходного напряжения, когда конденсатор переноса заряда работает как удвоитель напряжения и в режиме переноса заряда подключается к выходному конденсатору последовательно с источником входного напряжения. Тогда микросхема работает в таком же режиме, как и в случае $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$, то есть в режиме повышения выходного напряжения.

Выполненные исследования реакции микросхемы на ступенчатое изменение или отключение нагрузки показали, что такая реакция зависит от соотношений входного и выходного напряжений, токов нагрузки и соответствующих ступенчатых изменений этих величин. Вопрос требует специального подробного изучения, которое следует выполнить в рамках дальнейшего развития настоящей работы. Необходимо также завершить исследование изучения алгоритма работы микросхемы в режиме повышения напряжения и в режиме, когда входное и выходное напряжения близки.

Заключение

Проведенные исследования на созданном автоматизированном экспериментальном стенде для изучения характеристик микросхем интенсивно разрабатывающихся в настоящее время различных видов мобильных источников стабилизированного вторичного электропитания с накачкой заряда, получающих энергию от батарей, подтвердили правильность выбранных методических и конструкторских решений. Получен ряд новых научных результатов о специфике работы таких микросхем. Эксперименты могут проводиться не только под локальным управлением от компьютера, но и при удаленном доступе.

Литература:

1. Low Noise, Positive-Regulated Charge Pump MCP1252/3, Data Sheet DS2175A, Microchip Technology, 2002, 18 pp.
2. Buck/Boost Regulating Charge Pump in μ MAX, MAX1759, Data Sheet 19-1600. Maxim Integrated Products, 2000, 10 pp.
3. Wide VIN Range, Low Noise, 250 mA Buck-Bust Charge-Pump LTC3245, Data Sheet 3245a, Linear Technology, 2013, 18 pp.
4. Битюков В.К., Богатов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Исследование характеристик стабилизированных источников электропитания, построенных на базе регули-

емых DC–DC преобразователей с накачкой заряда // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 5. С. 5–15.

5. Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Учебно-исследовательский стенд регулируемого DC–DC преобразователя с накачкой заряда // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2014. № 1. С. 52–53.

6. Битюков В.К., Богатов А.В., Иванов А.А., Куликов Г.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Патент на полезную модель №148265 Российская Федерация. МПК G01R 31/317. Устройство для контроля параметров микросхем; патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ МИРЭА. 2014132449/28 заявл. 06.08.2014; опубл. 27.11.2014. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» 2014, № 33.

7. Битюков В.К., Иванов А.А., Михневич Н.Г., Перфильев В.С., Петров В.А. Виртуальная лицевая панель реального стенда для дистанционного управления исследованием характеристик стабилизированных источников вторичного электропитания // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 1. С.52–57.

8. Битюков В.К., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Алгоритм работы микросхемы регулируемого стабилизатора MAX1759 в режиме понижения напряжения // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2015. Т. 1. С. 344–347.

9. Битюков В.К., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Алгоритм работы стабилизированного DC–DC преобразователя на основе микросхемы MAX1759 с накачкой заряда в режиме понижения напряжения // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 53–56.

10. Битюков В.К., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Экспериментальное исследование стабилизированных источников вторичного электропитания // Учебный эксперимент в образовании. 2015. № 1 (73). С.68–82.

11. Битюков В.К., Петров В.А. Стабилизированные источники вторичного электропитания, построенные на базе регулируемых DC-DC преобразователей с накачкой заряда. Методические указания по выполнению лабораторной работы № 1287. М.: МГТУ МИРЭА, 2014. 20 с.

12. Битюков В.К., Петров В.А. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Методические указания по выполнению лабораторной работы № 1364. М.: МГТУ МИРЭА, 2015. 36 с.