

Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии

«мягкой» коммутации ключей.

Часть 5. Исследование макета преобразователя постоянного напряжения¹

В.Ю. Васильев, А.А. Антонов, И.В. Пичугин, Ю.Д. Козляев, Ю.Е. Семёнов

Целью работы является разработка источников вторичного электропитания мощностью 2000 Вт и выше, реализующих технологию «мягкой» коммутации при нуле или близком к нулю напряжении на ключе (Zero Voltage Switching). Работа состоит из пяти частей, в которых рассматриваются различные аспекты проблемы конструирования источников питания. В первой части работы приведены результаты анализа информационных материалов и оценка важнейших параметров некоторых зарубежных источников питания. Во второй части работы рассмотрены варианты схемотехнической реализации источников питания и возможные направления использования технологии «мягкой» коммутации. В третьей части работы приведены результаты разработки макета силового модуля источника питания. В четвёртой части работы рассмотрены особенность и примеры реализации технологии «мягкой» коммутации ключей при нуле напряжения (ZVS). В настоящей, заключительной части работы, рассматриваются результаты экспериментального исследования макета преобразователя постоянного напряжения с использованием адаптивных драйверов для реализации «мягкой» коммутации ключей.

Ключевые слова: AC/DC модульные источники электропитания, «мягкая» коммутация, Zero Voltage Switching (ZVS), электромагнитные помехи.

1. Введение и постановка задачи

Работа является заключительной частью серии публикаций, объединённых общим названием. В первой части работы [1] был проведён анализ информационных материалов с целью определения наиболее перспективных направлений развития преобразовательных устройств, называемых в литературе источниками вторичного электропитания (ИВЭП), или источниками питания (ИП). Анализ информационных материалов и результатов экспериментальных измерений характеристик ИП для определения перспективных направлений схемотехнического конструирования основных элементов ИП выполнен в [2]. Результаты разработки функционально законченного макета ИП мощностью 2000 Вт рассмотрены в [3]. Особенности реализации технологии «мягкой» коммутации ключей при нуле напряжения (ZVS), а также расчёт преобразователя напряжения с определёнными параметрами, представлены в [4].

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации НИР «Разработка перспективных технологий и конструкций изделий интеллектуальной силовой электроники для применения в аппаратуре бытового и промышленного применения, на транспорте, в топливно-энергетическом комплексе и в специальных системах (интеллектуальные драйвера «мягкой коммутации» мощных источников электропитания)» ГК № 16.426.11.0055).

В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментального исследования прототипа адаптивного драйвера «мягкой» коммутации силовых ключей, осуществляющего включение силового транзистора в режиме нулевого тока (ZCS) и выключение при нуле напряжения (ZVS), разработанного на основании проведённого ранее комплекса исследований [1 – 4] и предыдущего опыта экспериментального макетирования ИП [5]. Кроме того, рассматриваются результаты Spice-моделирования и экспериментального исследования макета преобразователя постоянного напряжения (DC/DC-преобразователя), разработанного с применением прототипов драйверов «мягкой» коммутации ключей ZVS (далее D-ZVS) и характеризуемого параметрами и схемой силовой части, представленной в [4].

Исследования проводились на основе принципиальных схем, рассмотренных ранее. В частности, в [4] приведены схема стойки ключей с необходимым обрамлением для реализации режима ZVS, диаграммы работы преобразователя на её основе, расчётные соотношения и пример расчёта параметров преобразователя и основных параметров D-ZVS, а также полная схема преобразователя, выполненного на базе мостового инвертора мощностью порядка 5 кВт. Отметим, что в части 2 данной работы [2] были рассмотрены специализированные микросхемы и микроконтроллеры, позволяющие реализовать различные приёмы коммутации силовых ключей в различных конфигурациях. Рассмотренные методы чаще всего требуют применения гальванической развязки цепей управления и силовых ключей, промежуточных буферных усилителей, а также цепей детектирования напряжений и токов.

К тому же, специализированные микросхемы чаще всего ориентированы на резонансные режимы работы преобразователя, ограниченные по уровню реализуемых мощностей. Использование интеллектуальных микросхем зарубежного производства – микроконтроллеров – позволяет реализовать любой возможный метод управления, однако недостатком такого подхода является снижение надёжности ИП.

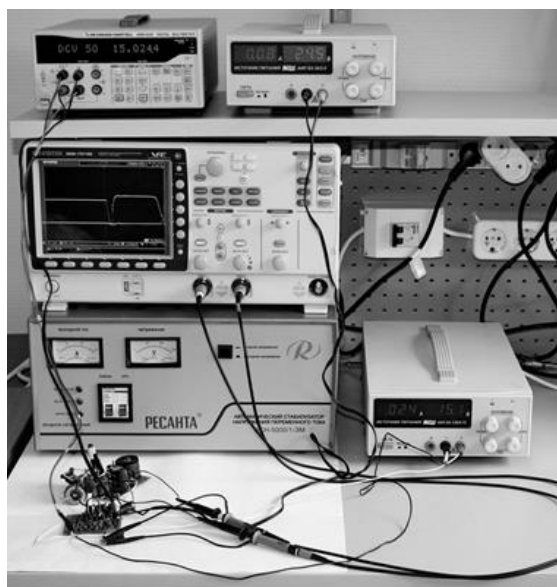
В настоящей работе изложены результаты создания интеллектуального драйвера силового ключа, сочетающего элементы сильноточной электроники и набор необходимых функций контроля и управления:

- контроль напряжения «сток – исток» силового ключа и фиксация момента снижения напряжения до нулевого уровня;
- контроль тока ключа и фиксация момента достижения током заданной пороговой величины;
- включение силового ключа в режиме ZCS и выключение в режиме ZVS;
- управление разрядом затворной ёмкости силового ключа с учётом эффекта ёмкости Миллера;
- дополнительные входы для связи с центральной системой управления (ЦСУ), детально рассмотренной в работе [3];
- быстродействующая защита от превышения максимального тока ключа в случае автономной работы либо выхода из строя ЦСУ.

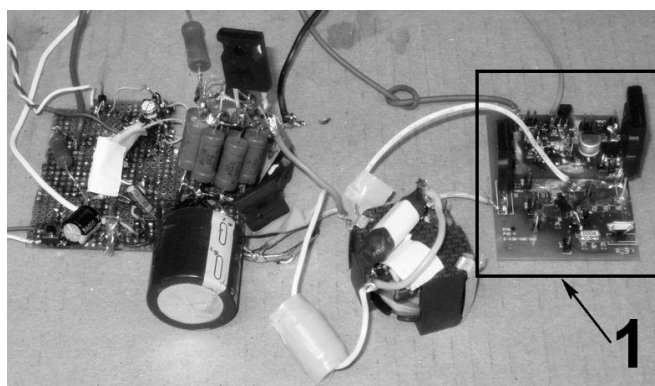
Задачей работы является создание адаптивных интеллектуальных драйверов силовых ключей, осуществляющих коммутацию в «мягких» режимах ZVS-ZCS, и реализация макета DC/DC-конвертора полумостового типа с использованием прототипов драйверов в схеме управления ключами стойки.

2. Адаптивные интеллектуальные драйверы силовых ключей

Адаптивные драйверы D-ZVS были исследованы с помощью экспериментального стенда (рис. 1а), состав которого приведен в табл. 1. На рис. 1б, справа, представлен прототип модуля D-ZVS, изготовленный на печатной плате 45×55 мм. На этом же рисунке слева показан разработанный эквивалент нагрузки, использованный при исследовании одиночного модуля D-ZVS.



(а)



(б)

Рис.1. Стенд для исследования характеристик модуля D-ZVS (а) и прототип D-ZVS (обозначен цифрой 1) со схемой запуска и эквивалентом нагрузки (б)

Таблица 1. Приборы и устройства испытательного стенда.

Наименование	Тип
Лабораторный источник электропитания	АИП Б5.120/0,75
Лабораторный источник электропитания	АИП Б5.30/3
Осциллограф цифровой запоминающий	Tektronix MSO2024, GDS73152
Анализатор спектра цифровой	АКС-1301
Исследуемый драйвер ZVS	DRV_ZVS
Силовой ключ для запуска драйвера ZVS	Макетный образец
Генератор коротких импульсов с большим периодом	Макетный образец
Эквивалент нагрузки	Макетный образец
Мощный источник высокого напряжения	Макетный образец

Эпюры и осциллограммы базовых сигналов (напряжения, тока), полученные в результате Spice-моделирования (с использованием общепринятых программ моделирования) и экспериментального исследования прототипа D-ZVS, показаны на рис. 2 и рис. 3, соответственно. Сигналы получены относительно минусовой шины силовой цепи.

Как наглядно показывает осциллограмма (рис. 2б), силовой ключ переводится в открытый режим при напряжении «сток – исток», равном нулю, при этом ток силового ключа начинает линейно нарастать с нулевого значения, что соответствует режиму ZCS. Рост тока линейен на всём интервале проводимости, рост прекращается на уровне запрограммированного максимума. Затем следуют короткая фаза удержания тока и резкий его спад до нуля, сопровождаемый ростом напряжения на силовом ключе. Таким образом, высокое напряжение на силовом ключе появляется после завершения фазы протекания тока, что определяет режим ZVS. Таким образом, прототип D-ZVS обеспечивает коммутацию силового ключа в «мягком» режиме ZVS-ZCS.

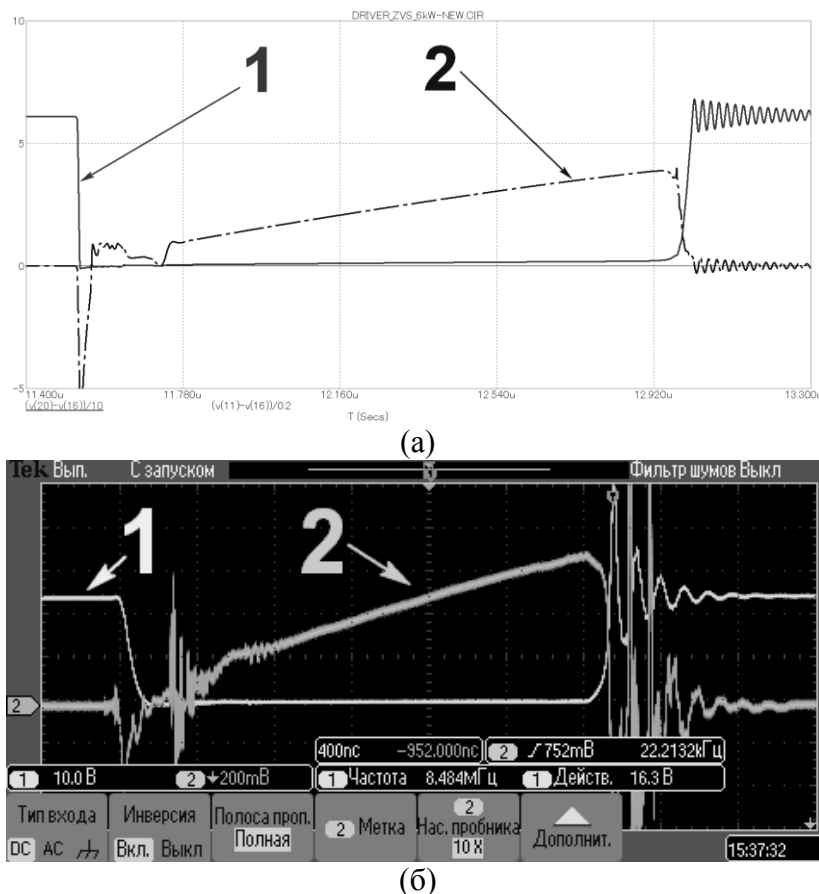
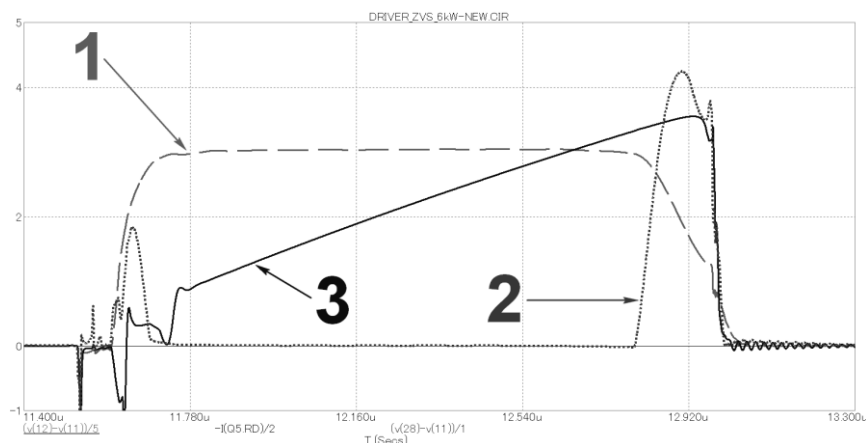


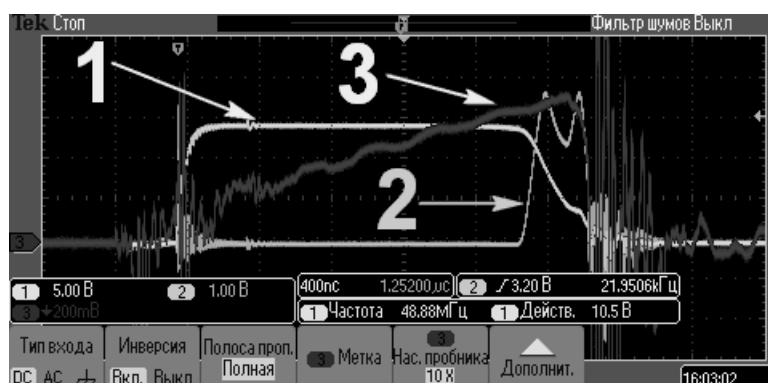
Рис. 2. Расчётные (а) и экспериментальные (б) эпюры напряжения «сток – исток» на силовом ключе (1) и напряжения на токовом шунте (2)

На рис. 3 приведены результаты моделирования и экспериментального исследования для напряжения «затвор – исток» (линия 1), тока разряда затворной ёмкости (линия 2) и тока силового ключа (линия 3). Эпюры напряжений получены относительно истока силового ключа. Линии 1 и 2 показывают, что разряд затворной ёмкости силового ключа имеет две стадии: на первой скорость разряда ограничена, на второй происходит форсированный «доразряд», сопровождаемый резким снижением тока силового ключа, за которым следует рост напряжения на ключе. Как было показано в предыдущих расчётах [4], скорость роста напряжения на силовом ключе предопределена параметрами контура силовой части.

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают возможность реализации на базе специализированного драйвера переключения силового транзистора в «мягком» режиме, соответствующем ZVS. Выбросы и апериодические колебания были получены на этапе моделирования путём искусственного добавления в силовой контур паразитных элементов. Эксперимент показал, что в сравнении с результатами моделирования паразитные явления на начальной и завершающей стадии интервала работы ключа выражены более интенсивно, что связано с неточностью оценки паразитных связей в макете силового контура. Несмотря на этот факт, прототип продемонстрировал качественное соответствие модели, стабильность и управляемость процесса переключения силового транзистора в соответствии с заданным режимом. Полученные результаты были подтверждены ещё на трёх изготовленных образцах прототипов D-ZVS.



(a)



(б)

Рис. 3. Расчётные (а) и экспериментальные (б) эпюры напряжения «затвор – исток» (1), напряжения на разрядном элементе прототипа D-ZVS (2), тока силового ключа (3)

3. Макет преобразователя постоянного напряжения на основе инвертора с «мягкой» коммутацией ключей (ZVS) с использованием модулей D-ZVS

В работе [3] были представлены результаты разработки и обследования макета ИП, созданного по классической схемотехнике с использованием управления в режиме «жёсткой» коммутации силовых ключей посредством ШИМ-модуляции (варианты схемотехнической реализации ИП проанализированы в [2]). Макет продемонстрировал стабильную работу системы управления и силовой части, высокую эффективность преобразования энергии и уровень электромагнитных помех, характерный для аналогичных ИП зарубежного производства. Модифицирование узлов в законченном исполнении не представлялось возможным, поэтому был разработан самостоятельный макет DC/DC-преобразователя, включающий инвертор и выходной выпрямитель диодного типа.

Реализация режима ZVS была проведена путём модифицирования стойки ключей по схеме, представленной в [4]. Дополнительно при разработке решались следующие задачи: создание преобразователя с лучшими удельными характеристиками, получаемыми путём увеличения частоты преобразования и использования адаптивных модулей D-ZVS (обоснование было приведено выше в данной статье). Задача создания общей системы управления и сочленения узлов была решена в [3], поэтому проводилась отработка отдельного модуля DC/DC-преобразователя для определения его параметров и настройки, а затем предполагалось интегрировать его в состав ИП с последующим сочленением с ЦСУ.

В соответствии с обозначенными выше задачами, для проведения исследований на базе DC/DC-преобразователя был создан модифицированный макет с прототипами адаптивных драйверов D-ZVS (рис.4).

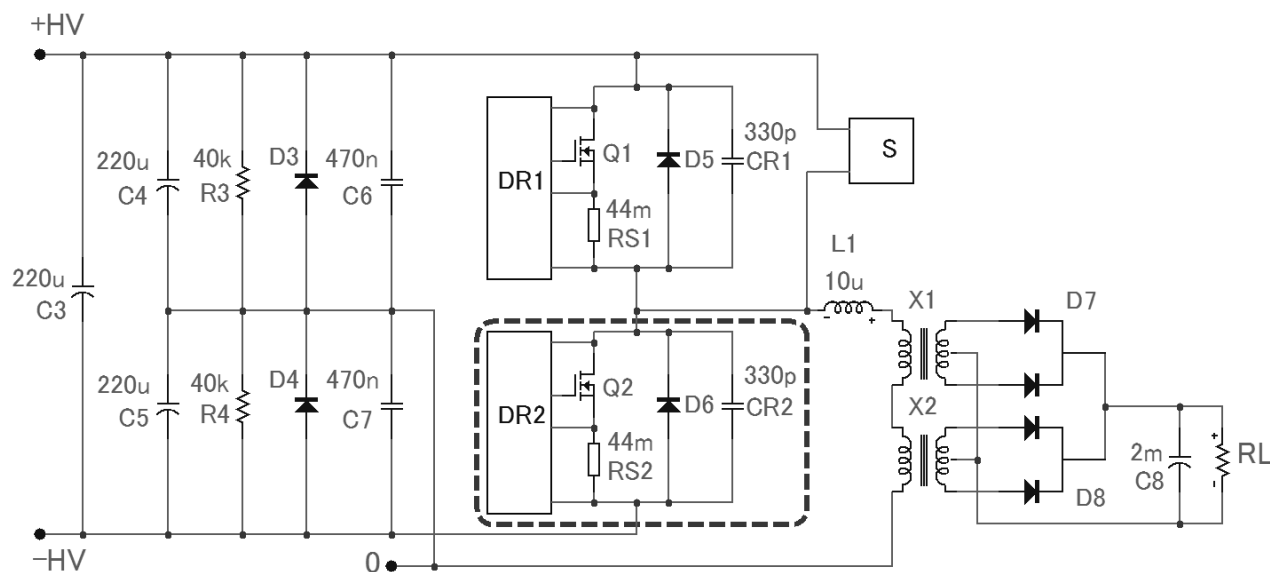


Рис. 4. Электрическая схема DC/DC-преобразователя, модифицированного для осуществления коммутации силовых ключей стойки в режиме ZVS

Для описания режима работы преобразователя достаточно рассмотреть работу одного из ключей стойки: второй ключ работает идентично. На рис. 5 представлены прогнозируемые эпюры напряжений, полученные методом Spice-моделирования и полностью характеризующие работу нижней пары «драйвер – ключ» (DR2-Q2, выделено штриховой линией на рис. 4) полумостовой стойки: напряжение «сток – исток» (линия 1), ток ключа (линия 2), напряжение «затвор – исток» (линия 3). Напряжение первичного источника высокого напряжения составляло 400 В, сопротивление нагрузки – 1.0 Ом. Как следует из графиков, ток ключа Q2 имеет пилообразную форму с частотой повторения $f \approx 250$ кГц ($T \approx 4$ мкс) и амплитудой $I_m = 26$ А. Оценка входной, выходной мощности потребления и эффективности преобразователя будет проведена ниже.

На рис. 6а,б представлены эпюры напряжений, полученные в результате исследования экспериментального макета с модулями D-ZVS: «сток – исток» и ток ключа (падение напряжения на токовом шунте), «сток – исток» и «затвор – исток». Напряжение «сток – исток» является синхронизирующим. Измерения подтвердили результаты моделирования и, как и в случае исследования модуля D-ZVS, единственное расхождение с моделью наблюдается в наличии паразитных эффектов. Эти явления могут повлиять на стабильность системы на высокой частоте, но наибольшее их влияние будет связано с мощными наводками на шинах управления и контроля. Из этого факта следует, что для стабильного функционирования ИП на частоте более 200 кГц следует тщательно прорабатывать силовые межсоединения на печатной плате и отказаться от навесного монтажа.

На рис. 7 представлены эпюры напряжений на вторичных обмотках трансформатора, полученные в результате Spice-моделирования и экспериментального исследования. Выходное напряжение составило в среднем 50 В на нагрузке 1 Ом. Это позволило оценить эффективность макета с использованием технологии ZVS, функционирующего на частоте 250 кГц, совместно с выходным выпрямителем диодного типа. Как было упомянуто выше, в первичной обмотке развивается пилообразный ток амплитудой 26 А. При напряжении первичного источника 400 В потребляемая мощность составляет 2600 Вт. Выходная мощность составляет (в среднем) 2500 Вт. Таким образом, расчётная эффективность DC/DC-конвертора близка к величине 96 %. С учётом потерь мощности на выходных диодах (около 60 Вт) потери мощности в стойке ключей составили 40 Вт, по 20 Вт на силовых ключах

Q1 и Q2. Стоит отметить, в расчётной модели не учитывались потери в индуктивных элементах, а также потери, связанные с наличием определённого сопротивления соединений.

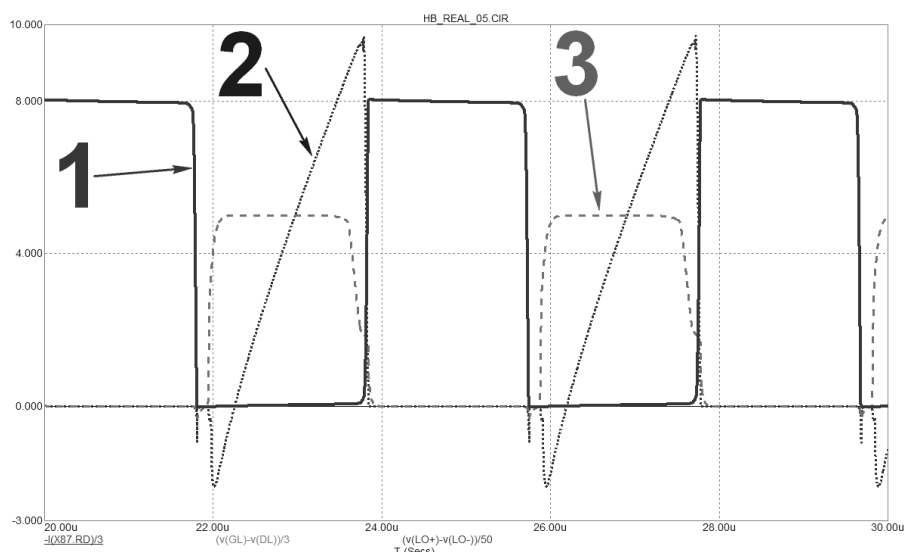


Рис. 5. Расчётные эпюры напряжений и ток нижнего ключа полумостовой стойки: «сток – исток» (линия 1), ток ключа (линия 2), напряжение «затвор – исток» (линия 3)

При исследовании экспериментального макета преобразователя с выходным выпрямителем диодного типа, функционирующего на частоте ≈ 200 кГц, были получены следующие данные: выходная мощность 2000 Вт; КПД 94 %; суммарные потери мощности порядка 130 Вт. Потери мощности на индуктивных элементах составили около 30 Вт.

Современные активные корректоры мощности имеют эффективность более 96 %. Это позволяет провести оценку эффективности полного ИП, построенного с экспериментальным преобразователем с применением модулей D-ZVS и активным корректором коэффициента мощности: 90 % и более, что соответствует разработанному в [3] макету ИП.

Таким образом, ухудшения эффективности ИП с ростом частоты коммутации не наблюдается, что является наглядным подтверждением эффекта ZVS.

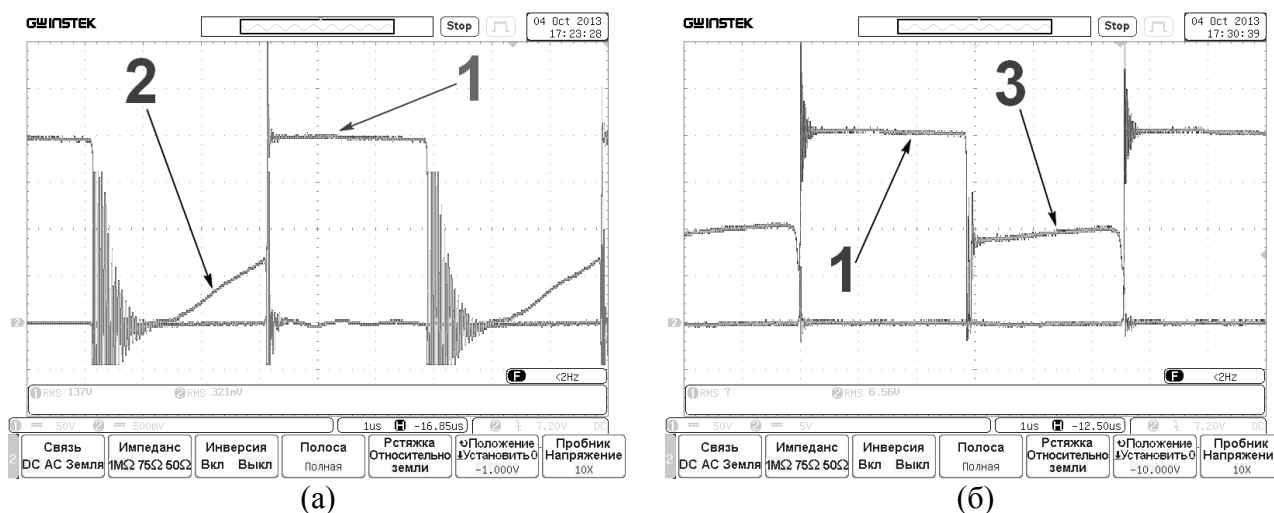


Рис. 6. Экспериментальные эпюры напряжений нижнего ключа полумостовой стойки: напряжение «сток – исток» (1) и ток ключа (2) (а), напряжения «сток – исток» (1) и «затвор – исток» (3) (б)

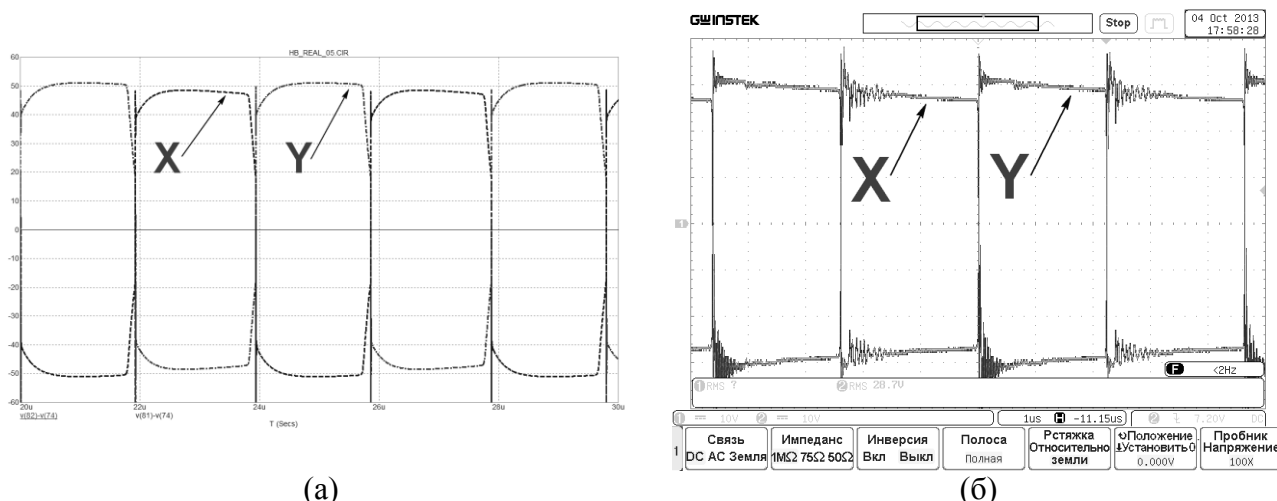


Рис. 7. Эпюры напряжений на вторичных обмотках трансформатора: расчётные (а) и экспериментальные (б)

4. Измерения уровня электромагнитных помех, создаваемых ИП, реализованным по технологии ZVS

В работе [5] были представлены результаты измерения уровня электромагнитных (ЭМ) помех, создаваемых разработанным ИП мощностью 1500 Вт, имеющего частоту коммутации силовых модулей 30 – 100 кГц. Как следовало из измерений, уровень помех оказался в среднем на 15 дБ/мкВ меньше по сравнению с аналогичными образцами зарубежных ИП, работающих без использования технологии ZVS. Аналогичные измерения, с использованием той же аппаратуры и методологии, были проведены для разработанного макета DC/DC-преобразователя с модулями D-ZVS.

На рис. 8 представлены спектрограммы кондуктивных помех, создаваемых макетом преобразователя, в диапазоне 9 кГц – 2 МГц (а) и 2 МГц – 100 МГц (б), полученные при измерении пиковым детектором цифрового анализатора спектра АКС-1301. На рис. 9а представлены графики уровней кондуктивных помех, создаваемых разработанным макетом ИП [3] и макетом DC/DC-преобразователя с интегрированными модулями D-ZVS в диапазоне 150 кГц – 100 МГц. Графики уровней излучаемых радиопомех, создаваемых макетом с жёсткой коммутацией ключей [3] и макетом с D-ZVS в диапазоне 100 кГц – 1000 МГц (измерение пиковым детектором, спектроанализатор АКС-1301), представлены на рис. 9б.

Результаты измерений наглядно демонстрируют, что разработанный макет с модулями D-ZVS генерирует меньший уровень ЭМ помех, в среднем на 20 дБ/мкВ, чем разработанный в [3]. Как было упомянуто в [3], уровень ЭМ помех для макета ИП сравним с уровнями для аналогичных зарубежных образцов, работающих в режимах «жёсткой» коммутации силовых ключей. Отметим, что ранее был разработан макет полного ИП, содержащий в своей структуре активный сетевой выпрямитель (активный корректор мощности), полумостовой преобразователь и выходной выпрямитель диодного типа [3]. Разработанный макет с интегрированными модулями D-ZVS представляет собой законченный DC/DC-конвертер без активного выпрямителя, что накладывает некоторые условия для прямого сравнения двух устройств. Учитывая этот факт, а также то обстоятельство, что активный корректор мощности также может быть построен с применением технологии «мягкой» коммутации [2], можно оценить уровень ЭМ помех полного ИП по показателям ЭМС, представленным на рис. 9. Предварительные данные показывают, что перспективный ИП с модулями D-ZVS будет иметь характеристики, сравнимые с передовыми зарубежными ИП.

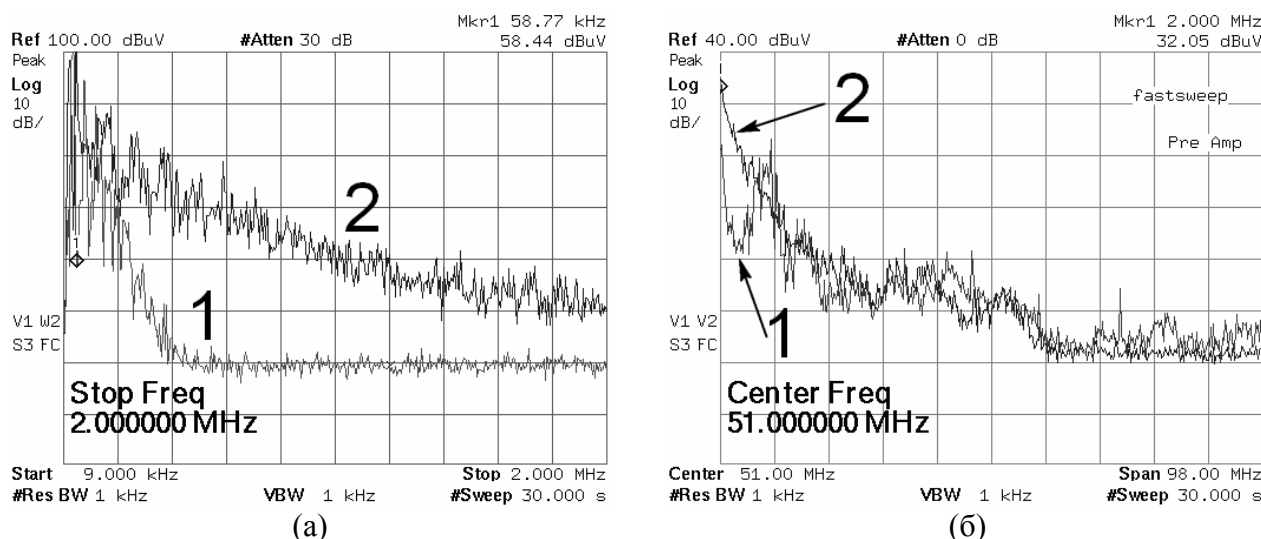


Рис.8. Спектрограммы кондуктивных помех для макета преобразователя с модулями D-ZVS: режим холостого хода (1) и режим номинальной нагрузки (2), диапазон 9 кГц – 2 МГц (а) и 2 МГц – 100 МГц (б)

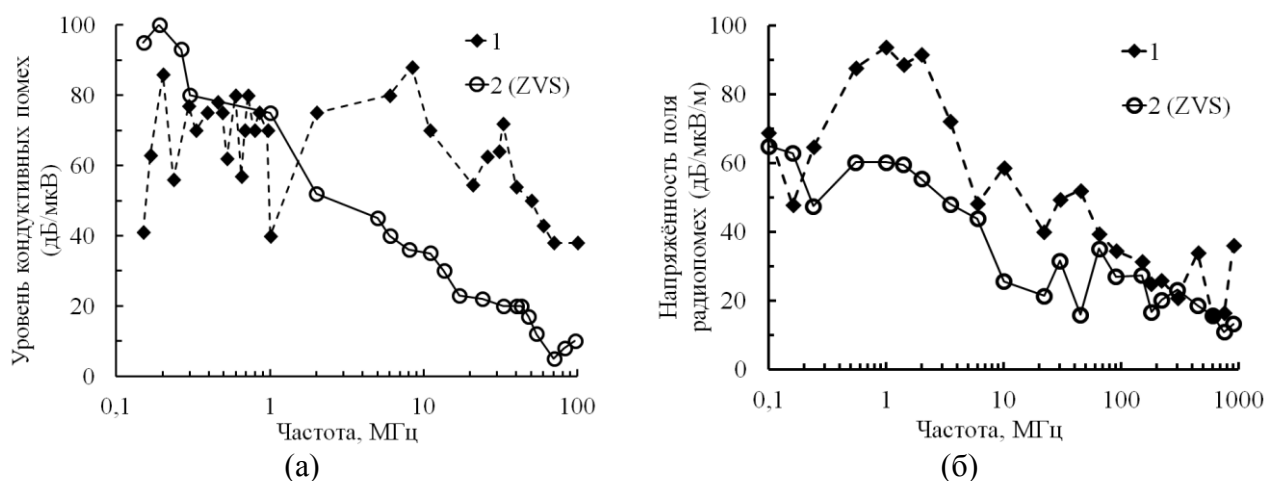


Рис.9. Результаты измерений уровней ЭМ помех, создаваемых разработанным макетом ИП [3] (1) и макетом с интегрированными модулями D-ZVS (2): кондуктивные (а) и излучаемые (б)

Заключение

В пятой, заключительной части публикуемой серии работ приведены результаты разработки и экспериментального исследования DC/DC-преобразователя полумостового типа с использованием интеллектуальных модулей драйверов D-ZVS оригинальной разработки. Приведены результаты Spice-моделирования и экспериментальных исследований, подтверждающих правильность модели и работу устройства в режиме коммутации при нуле напряжения (ZVS). Приведены результаты исследования генерируемых ЭМ помех макета, а также сравнение с прототипом ИП [3].

Результаты исследований показывают, что разработанные интеллектуальные модули драйверов «мягкой» коммутации D-ZVS позволяют реализовать режим выключения силовых ключей при нуле напряжения (ZVS) при определённом алгоритме разряда их затворной ёмкости и соответствующем схемотехническом «обрамлении» силовых ключей, а также реализовать режим включения при нулевом токе (ZCS). Энергетическая эффективность преобразователя большой мощности сохраняется при относительно высокой частоте коммутации силовых ключей (200 – 250 кГц), что невозможно реализовать при использовании режимов «жёсткой» коммутации силовых ключей. Следствием применения приёмов «мягкой»

коммутации является увеличение частоты преобразователя, увеличение удельных объёмных и массогабаритных показателей источников, снижение уровня генерируемых ЭМ помех на величину 20 дБ/мкВ.

Разработанный интеллектуальный драйвер силового ключа D-ZVS не ограничивается в области применения только полумостовой схемой преобразователя. Материалы по этой проблеме будут опубликованы позже. Особенностью рассмотренной идеологии преобразования электрической энергии является возможность управления уровнем передаваемой мощности без нарушения режима ZVS, что гарантирует сохранение показателей эффективности и ЭМС в широком диапазоне выходных мощностей.

В результате проведённой работы сделаны следующие выводы и заключения, а также намечены определяющие ориентиры для дальнейшей разработки мощных источников вторичного электропитания.

1. Показано, что при корректном решении технология ZVS существенно улучшает показатели ИП.

2. Метод ZVS не ограничивает дальнейших возможностей повышения энергетической эффективности ИП. Проблема обостряется при повышении единичной мощности ИП и требует использования принципов коммутации ZVS с другим приёмом «мягкой» коммутации, получившим название «коммутация при нуле тока ключа» (Zero Current Switching). Такой подход открывает возможность создания высокоэффективных единичных модулей ИП мощностью 5 – 9 кВт при постоянном напряжении на входе инверторного звена порядка 500 – 600 В.

3. Востребованность практикой рассмотренной идеологии неизбежно связана с доступом к интеллектуальным драйверам (D-ZVS) как типовым элементам силовой электроники. Однако существенная зависимость процессов выключения силовых ключей от номинала допустимого тока затрудняет создание «единого» драйвера, т.к. оптимальный процесс управления разрядом затворной ёмкости требует адаптации к этой зависимости. Таким образом, следует активизировать работу по созданию серии драйверов, ориентированных на определённые группы ключей.

Литература

1. Васильев В.Ю., Козляев Ю.Д., Пичугин И.В., Семёнов Ю.Е., Гордиенко С.М., Антонов А.А. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии «мягкой» коммутации ключей. Часть 1. Анализ информационных материалов и образцов источников питания // Вестник СибГУТИ, 2012, № 3, с.86-97.
2. Васильев В.Ю., Антонов А.А., Пичугин И.В., Гордиенко С.М. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии «мягкой» коммутации ключей. Часть 2. Анализ схмотехнических решений источников питания модульного типа // Вестник СибГУТИ, 2013, № 1, с.75-84.
3. Васильев В.Ю., Антонов А.А., Пичугин И.В., Гордиенко С.М. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии «мягкой» коммутации ключей. Часть 3. Разработка макета силового модуля источника питания // Вестник СибГУТИ, 2013, № 2, с.75-85.
4. Васильев В.Ю., Козляев Ю.Д., Семёнов Ю.Е., Антонов А.А., Пичугин И.В. Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии «мягкой» коммутации ключей. Часть 4. Преобразователь постоянного напряжения с формированием тока в звене инвертора // Вестник СибГУТИ, 2013, № 4, в печати.
5. Васильев В.Ю., Пичугин И.В., Козляев Ю.Д., Семёнов Ю.Е., Гордиенко С.М., Фомин В.В. Источник вторичного электропитания для радиоэлектронной аппаратуры, выполненный по технологии «мягкой коммутации» ключей // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 11, с.63-70.

*Статья поступила в редакцию 8.11.2013;
переработанный вариант — 20.01.2014*

Васильев Владислав Юрьевич

д.х.н., замдиректора по науке ООО «РАМИТ» (630049, а/я 378, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 220/2), тел.(383)-2016755, профессор кафедры технической электроники СибГУТИ, e-mail: vladislavvasilyev@gmail.com

Антонов Андрей Андреевич

инженер-конструктор ООО «РАМИТ» (630049, а/я 378, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 220/2), тел.(383)-2016755.

Пичугин Игорь Валентинович

инженер-конструктор ООО «РАМИТ» (630049, а/я 378, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 220/2), тел.(383)-2016755.

Козляев Юрий Дмитриевич

научный консультант ООО «РАМИТ», (630049, а/я 378, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 220/2), тел.(383)-2016755, к.т.н., профессор кафедры радиотехнических устройств (цикл электропитания устройств связи) СибГУТИ.

Семёнов Юрий Евгеньевич

ведущий инженер ООО «СибИС» (630049, а/я 68, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639.

Development of secondary power supply sources implemented by using «soft» switching keys technology. Part 5. The research of DC converter model

V.I.Vasiliev, A.A. Antonov, I.V. Pichugin, Y.D. Kozlyaeв, Y.E. Semenov

The aim of this paper is to develop secondary power supply sources of 2000 watts and more implementing the technology of Zero Voltage Switching. The paper consists of five parts dealing with various aspects of designing power sources. In the first part, the results of the analysis of information materials evaluation of the most important parameters of some foreign sources of supply are provided. In the second part, options of implementation of power supplies with the technology of schemes and possible use of «soft» switching technology are considered. In the third part, the results of the development of the power supply module are presented. In the fourth part, the features and examples of Zero Voltage Switching technology are considered. In this, the final part of the paper, the results of the pilot research of DC converter model using adaptive drivers for the «soft» switching keys implementation are considered.

Keywords: AC/DC modular power supplies, «soft» switching, ZVS – Zero Voltage Switching, electromagnetic interference.