

Разработка источников вторичного электропитания, реализованных с использованием технологии «мягкой» коммутации ключей.

Часть 2. Анализ схемотехнических решений источников питания¹

В.Ю. Васильев, А.А. Антонов, И.В. Пичугин, С.М. Гордиенко

Целью работы является разработка источников вторичного электропитания мощностью 2000 Вт с использованием технологии «мягкой коммутации» Zero Voltage Switch (ZVS). Работа состоит из нескольких частей, в которых рассматриваются различные аспекты конструирования источников питания. В первой части работы приведены результаты анализа информационных материалов и оценка важнейших параметров некоторых зарубежных источников питания. Во второй части работы рассматриваются варианты схемотехнической реализации источников питания и возможные направления использования технологии «мягкой» коммутации.

Ключевые слова: AC/DC источники электропитания, «мягкая» коммутация, Zero Voltage Switch, ZVS, электромагнитные помехи

1. Введение

В первой части работы [1] проведён анализ информационных материалов с целью определения наиболее перспективных направлений развития источников вторичного электропитания (далее – ИП). Результаты анализа позволили выявить ряд закономерностей в параметрах ИП, которые необходимо принимать во внимание при разработке мощных источников питания с высоким коэффициентом полезного действия (КПД), а также сформулировать перечень основных параметров источников питания с выходной мощностью 2000 Вт и выходными напряжениями 12 В и 48 В. В частности, анализ показал, что в настоящее время мало опубликованных данных об источниках питания, реализующих технологию «мягкой» коммутации ключей, известную как Zero Voltage Switch (ZVS), представляющую наиболее перспективной для реализации мощных высоконадёжных источников питания с низким уровнем электромагнитных помех.

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).

Следует заметить, что термин ZVS не определяет требований к временным характеристикам нулевого уровня напряжения на силовых зажимах коммутируемого ключа, поэтому эффективность технологии может существенно зависеть как от типов ключей (MOSFET или IGBT), так и технических приёмов «удержания» низкого уровня напряжения на интервале восстановления запираемых свойств ключей. Эта особенность сопряжена как с показателями коммутационной составляющей мощности потерь в ключах, так и с допустимыми значениями di/dt , du/dt и, следовательно, с уровнем генерируемых электромагнитных помех. Вместе с тем, сам факт обеспечения начальной стадии переключения силового ключа при низком уровне напряжения, особенно при использовании MOSFET-ключей, даёт хороший эффект при мощности источника порядка 1.8...2.5 кВт.

Вторая часть работы посвящена анализу схемотехнических решений ИП и возможным направлениям использования приёмов «мягкой» коммутации. Приводятся результаты экспериментального обследования зарубежных источников питания, изготовленных с заявленной технологией ZVS.

2. Анализ информационных материалов

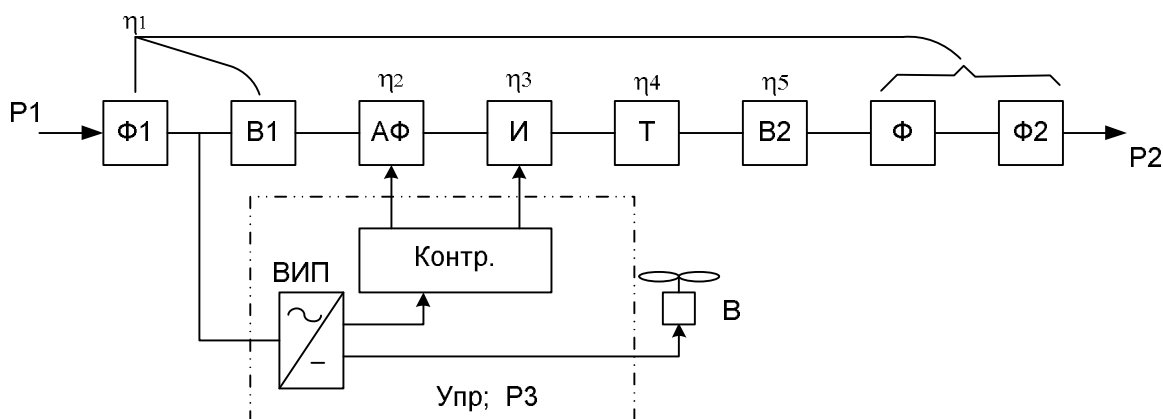
Современные системы радиоэлектроники предъявляют жесткие требования к удельным и энергетическим показателям источников. Обе проблемы решаются на базе импульсной высокочастотной технологии с учётом особенностей полупроводниковых диодов и транзисторных ключей.

Эффективность источников питания. Эффективность, или КПД, является одним из важнейших параметров источников питания. Мировой стандарт «80 PLUS», принятый в 2007 году [2], установил для ИП минимальную величину КПД, равную 80 % при нагрузке, составляющей 20 %, 50 %, и 100 % от номинальной нагрузки ИП. В 2010 году стандарт довели до статуса т.н. «золотого», повысив требования к КПД до значения не менее 87 % при нагрузках 20 % и 100 %, и не менее 90 % при 50 % нагрузке.

При этом принципиально важными являются массогабаритные параметры современных мощных ИП. В процессе работы происходит интенсивный нагрев силовых компонентов ИП, располагаемых на радиаторах, что приводит к снижению КПД. Оптимизация теплоотвода от радиаторов и использование активной системы охлаждения ИП (регулируемых вентиляторов) приводят к некоторому усложнению конструкции и повышению стоимости, но улучшают массогабаритные характеристики ИП. Так, в настоящее время максимальные величины КПД источников питания отдельных зарубежных производителей приближаются к 95 %, а удельные энергетические показатели (мощность кВт/дм³ или кВт/кг), превышают единицу, см. обзор в [1].

КПД источника питания характеризует эффективность работы всех его частей. На рис.1 приведена типовая схема ИП, включающая: входной и выходной фильтры помех (ФП1, ФП2, соответственно), диодное звено выпрямителя напряжения сети (В1), активный фильтр тока сети (АФ), корректирующий форму тока и величину коэффициента мощности источника, высокочастотный инвертор напряжения (ИН), выходной выпрямитель (В2), фильтрующее звено выпрямленного напряжения (ФВ), инфраструктуру управления (У) (контроллер, внутренний источник питания – ВИП), вентилятор (В). Индексами η_1 , η_2 ... η_5 обозначены КПД отдельных модулей или группы модулей силового тракта. КПД источника, определяемое отношением мощности выхода (Р2) к мощности входа (Р1), может быть выражено через КПД силового тракта

$$\eta_c = \prod_{n=1}^5 \eta_n.$$



С учётом мощности потребления модулем «Упр» (P3), составляющей долю $\Delta p_3 = P3 / P2$, результирующий КПД определится соотношением

$$\eta = \eta_c \frac{1}{1 + \eta_c \Delta p_3} \approx \prod_{n=1}^5 \eta_n - \Delta p_3.$$

Из полученного выражения следует, что при равенстве КПД всех звеньев силового тракта значению 0.96, результирующий КПД тракта $\eta_c = 0.815$, а с учётом $\Delta p_3 \approx 0.02$ ожидаемый КПД источника приближается к величине $\eta = 0.8$.

Таким образом, ИП, удовлетворяющий минимальным требованиям стандарта 80 % [2], должен иметь эффективность каждой его части не менее 96 %. Такие высокие показатели для сложных электрических схем ИП достигаются несколькими способами: изменением частоты работы преобразователя, усложнением схемы управления, применением усложнённых схемотехнических решений, а также использованием более совершенной элементной базы. Однако соответствие самым высоким стандартам «80 PLUS Gold» и выше требует эффективность ИП не менее 90 %, что серьёзно усложняет задачу проектирования ИП. Кроме того, увеличение выходной мощности ИП приводит к повышенному тепловыделению, и для сохранения высоких массогабаритных характеристик необходимо повышать величины КПД составных частей ИП.

Решение данных проблем состоит в использовании схемотехнических решений, позволяющих осуществлять «мягкую» коммутацию силовых ключей ИП. Режимы переключения при нулевом напряжении (ZVS) и/или нулевом токе (ZCS) позволяют существенно снизить энергию коммутационных потерь, что приводит к уменьшению как нагрева элементов, так и электромагнитного излучения.

Варианты схемотехнических решений источников питания. Определяющими факторами при выборе схемотехнического решения для построения мощного высокоэффективного ИП являются:

- диапазон входного напряжения;
- выходной ток и выходное напряжение;
- требуемые параметры КПД при определённых нагрузках;
- требуемые массогабаритные характеристики;
- требования по электромагнитной совместимости.

Ниже рассмотрены данные информационных материалов по схемотехническим решениям отдельных частей современных высокоэффективных источников питания.

Активный фильтр тока потребления (корректор коэффициента мощности) ИП. Классическая принципиальная схема активного корректора коэффициента мощности (АККМ) является повышающим преобразователем, что предполагает использование выпрямительного диода с предельно малым временем восстановления. Это требование возникает из необходимости работы корректора в непрерывном режиме тока индуктивного реактора, так как при этом минимизируются броски тока через индуктивность и порождаемые ими помехи в ра-

диочастотном диапазоне. Негативное влияние обратного тока диода при включении силового ключа может быть минимизировано при уменьшении скорости изменения тока (di/dt). Это может быть реализовано при дополнении схемы активными или пассивными демпфирующими (демпферными) цепями.

Приоритетным направлением при разработке высокоэффективных корректоров коэффициента мощности является использование технологии «мягкой» коммутации [3], для чего необходимо использование активных демпфирующих цепей [4]. Использование специализированных микросхем (типа UC3854 [5,6]) позволяет реализовать «мягкую» коммутацию силовых ключей в модуле АФ: как основного, так и вспомогательного ключа в активной демпферной цепи. Также возможно модифицирование АФ-устройств, подключённых к трёхфазной электросети, используя аналогичные принципы «мягкой» коммутации силовых ключей (например, используя управляющую микросхему L6599 [7]).

Отдельно стоит отметить безмостовой повышающий преобразователь, позволяющий существенно повысить КПД как АФ, так и всего источника в целом [3]. Исключение диодного звена выпрямителя напряжения сети и подключение силовых транзисторов непосредственно к сети питания определяют как достоинства, так и ряд недостатков такой схемы. Необходимость гальванической развязки управляющей цепи и повышение уровня электромагнитных помех ограничивают область применения данной схемы. Несмотря на это, использование передовой элементной базы (устройства на основе карбида кремния) и интеллектуальных систем (микроконтроллеров) позволяет создать высокоэффективные устройства (КПД АФ порядка 99 % при мощности ИП 3 кВт) при низком уровне электромагнитных помех [8].

Вторичный преобразователь ИП. Вторичный преобразователь включает комплекс функциональных модулей (И+Т+В2+Ф, рис.1), обеспечивая преобразование постоянного напряжения на выходе АФ в постоянное напряжение источника.

Схем вторичных преобразователей ИП, обеспечивающих электрическую изоляцию входной и выходной цепей относительно немного. При этом не существует универсальных решений: более простые схемы в ходе постоянного развития электроники могут стать более эффективными за счёт появления новых силовых компонентов. Существуют также схемотехнические решения, использующие сложные алгоритмы в управлении работой преобразователя.

Базовые схемы вторичных преобразователей с электрической изоляцией входной и выходной цепей, широко применяемые в настоящее время в ИП различной мощности, приведены в литературе [9, 10, 11, 12]:

1. Прямоходовая асимметричная:
 - 1.1. Одноключевая (классическая одноконтурная);
 - 1.2. Двухключевая (псевдодвухконтурная, asymmetrical half-bridge forward converter);
2. Обратногоходовая («flyback»);
 - 2.1. Одноключевая (классическая одноконтурная);
 - 2.2. Двухключевая (псевдодвухконтурная, asymmetrical half-bridge flyback converter);
3. Прямоходовая симметричная:
 - 3.1. Двухконтурный преобразователь (Push-Pull converter);
 - 3.2. Полумостовая схема с конденсаторами средней точки;
 - 3.3. Полная мостовая схема.

Доминирующее положение применительно к ИП мощностью более 250 Вт занимают прямоходовые схемы; для ИП меньшей мощности чаще всего используется обратногоходовая схема. В табл.1 представлена сводная информация, характеризующая ИП, выполненные по классической схемотехнике с «жёсткой» коммутацией силовых ключей. В табл.1 представлено: возможная выходная мощность, количество силовых ключей, рабочее напряжение силового ключа (voltage rating) при условии постоянства напряжения на входе источника ($U_{oi}=400$ В), сложность реализации. Наиболее распространёнными схемотехническими решениями вторичного преобразователя ИП, которые позволяют разрабатывать относительно простые ИП с широким диапазоном мощности, являются следующие:

1. Однотранзисторная прямоходовая схема;
2. Двухтранзисторная прямоходовая схема;
3. Полумостовая схема (двухтранзисторная).

Недостатком представленных схем является относительно низкий КПД, особенно при снижении уровня выходного напряжения.

Применительно к ИП повышенной мощности (порядка 2000 Вт) однотранзисторная и двухтранзисторная прямоходовые схемы не используются. Однако, не слишком усложняя схему вторичного преобразователя и не увеличивая значительно стоимость ИП, возможно поставить параллельно две двухтранзисторные прямоходовые схемы.

Табл. 1. Характеристики основных схем построения вторичного преобразователя ИП по классической схемотехнике с «жесткой» коммутацией силовых ключей.

Схема вторичного преобразователя	Выходная мощность ИП, Вт	Кол-во ключей	Напряжение $U_{\max}$ *	Сложность**
Обратноходовая одноключевая	1 – 75	1	900	1
Прямоходовая одноключевая	1 – 250	1	900	1
Обратноходовая двухключевая	250	2	600	2
Полумостовая	200 – 1000	2	600	3
Двухтактный преобразователь	200 – 500	2	900	4
Прямоходовая двухключевая	1000	2	600	2
Полная мостовая	500 – 2000	4	600	5

* $U_{\max}$ – допустимое рабочее напряжение силового ключа – voltage rating;

** сложность построения ИП на основе данной схемы: 1 – минимальная сложность, 5 – максимальная сложность.

«Мягкую» коммутацию силовых ключей возможно реализовать, используя схемотехнические решения резонансного преобразователя, отличающиеся по методу построения резонансного контура. Наиболее популярные и широко распространённые конструкции резонансных преобразователей следующие: последовательный, параллельный, комбинированный [13, 14, 15, 16].

Последовательный резонансный преобразователь имеет следующие недостатки: проблему с регулировкой напряжения при малых нагрузках, высокий уровень энергетической загрузки резонансного контура при любой нагрузке, высокую токовую нагрузку при переключении силовых транзисторов. Возможен выход за рамки «мягкого» режима коммутации силовых ключей при определённых нагрузках (такой режим реализуется при номинальной расчётной нагрузке ИП; при значительном отклонении от номинальной нагрузки режим «мягкой» коммутации нарушается).

Параллельный резонансный преобразователь лишён недостатка, связанного с регулировкой напряжения при малых нагрузках, однако проблема высокой загрузки резонансного контура остается. Также существуют проблемы, связанные с высокой токовой нагрузкой при переключении силовых транзисторов и с ограниченным действием режима «мягкой» коммутации.

Комбинированный преобразователь с трёхэлементным резонансным контуром может рассматриваться как параллельно-последовательный. Данная конструкция позволяет регулировать выходное напряжение при любой нагрузке, однако схема также чувствительна к изменению входного напряжения. Существуют проблемы, связанные с высокой токовой

нагрузкой силовых ключей и сохранением режима мягкой коммутации ключей при выключении. Таким образом, вышеперечисленные конструкции имеют ряд недостатков и ограничений в выборе рабочих условий.

Современная модернизация схемы с комбинированным резонансным преобразователем (т.н. трёхэлементный резонансный контур, состоящий из двух индуктивностей (L) и одного конденсатора (C), обозначаемый соответственно – LLC) позволяет осуществлять «мягкую» коммутацию силовых ключей при любой нагрузке, что приводит к соответствующему уменьшению коммутационных потерь [17]. Гибкий контроль осуществляется изменением частоты работы преобразователя. Существует ряд специализированных микросхем (например, UC3875 [18], или UCC25600 [19]), на основе которых возможно реализовать схему управления, осуществляющую «мягкую» коммутацию силовых ключей (а именно, ZVS) при работе вторичного преобразователя, построенного по резонансной схеме с LLC-контуром. В случае использования передовых методик построения резонансных схем (LLC) возможно дальнейшее увеличение эффективности, уменьшение электромагнитных помех, увеличение выходной мощности единичного устройства и увеличение удельных показателей. Использование передовых алгоритмов управления, разработанных для микропроцессорного управления посредством современных микроконтроллеров, например PIC33FJ16GS502 [20], позволяет адаптивно изменять режим работы преобразователя, сохраняя режим «мягкой» коммутации силовых ключей.

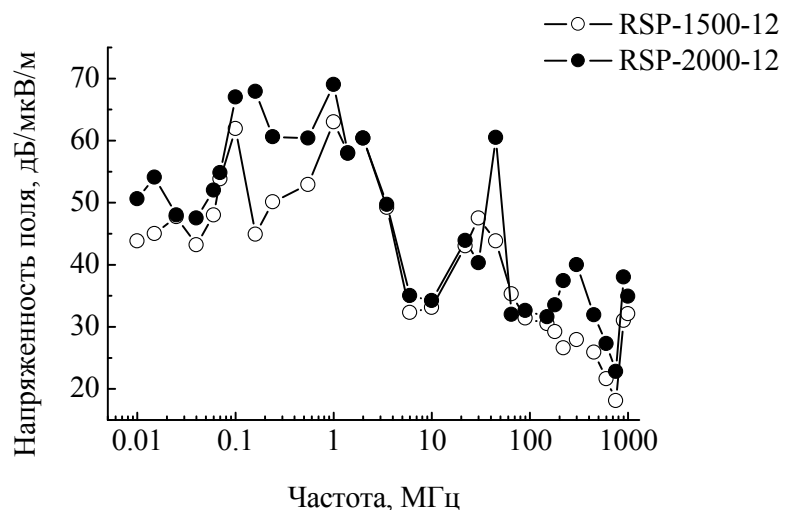
Звено выходного выпрямителя В2. Классическая схема выходного выпрямителя построена на основе выпрямительных диодов. Недостатком такой схемы является возникновение динамических и статических потерь энергии в диодах. Если первая составляющая может быть ослаблена выбором быстродействующих диодов, то вторая определена неизбежным падением напряжения на диоде на интервале проводимости тока. Синхронное выпрямление тока с использованием полевых транзисторов увеличивает КПД выходного выпрямителя, однако сложность построения выходного звена существенно увеличивается. При замене диодов в схеме выпрямителя на синхронные ключи требуется введение соответствующей схемы управления силовыми ключами (транзисторами). Возможно как непосредственное управление, так и использование специализированных микросхем-драйверов, причём второй метод предпочтительнее ввиду более широкой области применения. Реализация «мягкого» режима коммутации ключей в инверторном звене преобразователя накладывает дополнительные ограничения на режимы работы синхронного выпрямителя. Тем не менее, использование синхронного выпрямителя стало необходимостью, поэтому появились специализированные управляющие микросхемы типа UCC28950 [21].

3. Экспериментальная оценка образцов источников питания

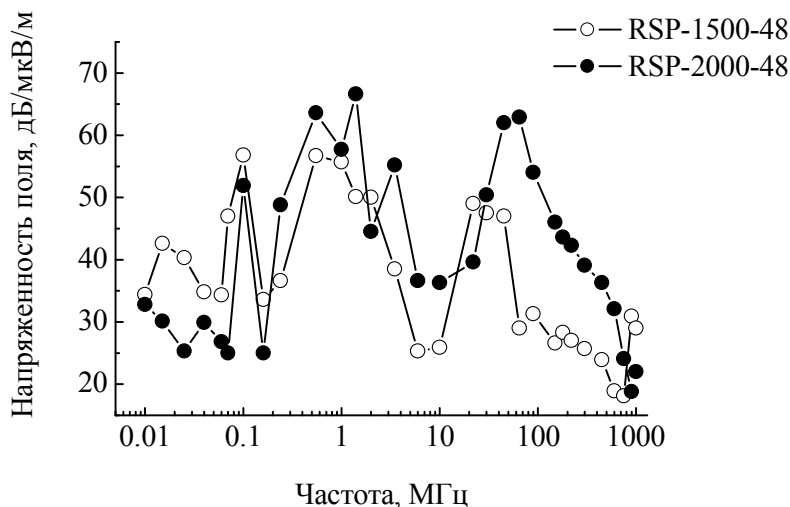
Ниже представлены результаты сравнительной экспериментальной оценки образцов источников питания фирмы «Mean Well», выпускающей широкую номенклатуру мощных ИП различных серий RSP, в том числе серию ИП с использованием технологии «мягкой» коммутации ZVS.

Серия RSP-2000 представляет собой ИП выходной мощностью 2000 Вт в форм-факторе 1U (высота 41 мм). Из спецификаций следует, что в ИП данной серии использована классическая схемотехника с «жёсткой» коммутацией силовых ключей. Вторичный преобразователь ИП серии RSP-2000 состоит из 2 блоков двухтранзисторных прямоходовых схем, включённых параллельно. Таким образом, вторичный преобразователь состоит из 2 силовых трансформаторов, 4 силовых транзисторов (по 2 на канал); также потребовалось реализовать 2 канала выходных выпрямителей. Каждый канал рассчитан на 1000 Вт энергии, что позволяет использовать небольшие трансформаторы и менее мощные транзисторы и выиграть в стоимости и габаритах конечного изделия. Используя современную элементную базу (высокочастотные ферриты, SiC-диоды, интеллектуальные системы управления), а также схему синхронного выпрямителя в выходной части ИП, для ИП данной серии достигнуты хорошие показатели по

КПД, см. рис.6 в работе [1]. Однако для источника с выходным напряжением 12 В существует ограничение по выходному току 100 А (+ 25 % в режиме перегрузки), что недостаточно для обеспечения выходной мощности в 2000 Вт. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что использованное схмотехническое решение ограничено по максимальной мощности. Также существуют проблемы, связанные с электромагнитным излучением, генерация которого происходит в моменты «жёсткого» переключения силовых ключей. Напряжённость электромагнитного поля, создаваемого такими ИП, может достигать 60-76 дБ/мкВ/м, см. результаты измерений на рис.7 в работе [1].



(а)



(б)

Рис.2. Электромагнитные помехи ИП с выходным напряжением 12 В (RSP-1500-12 и RSP-2000-12) (а) и с выходным напряжением 48 В (RSP-1500-48 и RSP-2000-48) (б)

Серия RSP-1500 представляет собой ИП, реализованные в форм-факторе 2U, с выходной мощностью 1500 Вт. В спецификации приведена информация, что ИП данной серии построены по схмотехнике с «мягкой» коммутацией силовых ключей ZVS. Серия ИП RSP-1500 разработана с использованием вторичного преобразователя, построенного по полной мостовой схеме последовательного резонанса. Выходной выпрямитель построен по классической диодной схеме, что говорит о том, что при разработке данного ИП решались задачи, не связанные с достижением максимального КПД. На рис.6 в работе [1] показана эффективность

образцов ИП данной серии. Источник с выходным напряжением 12 В обеспечивает полную выходную мощность (ток 125 А + перегрузка 35 %), что говорит о хорошем «запасе» данного ИП. КПД ИП этой серии аналогичен таковым для серии ИП RSP-2000, в которых не используется технология «мягкой» коммутации. Из анализа принципиальной схемы ИП серии RSP-1500 можно сделать вывод, что использованы не все резервы, позволяющие реализовать максимальный КПД. Использование синхронного выпрямителя в схемах с «мягкой» коммутацией ключей приведёт к увеличению КПД до значений выше 92 %, что максимально для ИП, построенных с использованием классической технологии «жёсткой» коммутации силовых ключей.

В работе [1] показаны экспериментально полученные уровни напряжённости поля радиопомех, примерно совпадающие с данными для ИП серии RSP-1500 с выходным напряжением 12 В, 27 В и 48 В. Там же представлено детальное сравнение экспериментальных данных по радиопомехам для ИП серий RSP-2000 и RSP-1500. Проведённое сравнение показывает очевидные преимущества использованной технологии «мягкой» коммутации силовых ключей в ИП серии RSP-1500, для которых измеренная напряжённость поля электромагнитных помех значительно ниже, что показано на рис.2.

4. Заключение

Во второй части работы проведён анализ информационных материалов и результатов экспериментальных измерений характеристик ИП для определения перспективных направлений схмотехнического конструирования основных элементов ИП.

В ходе исследования ИП фирмы «Mean Well» серий RSP-1500 и RSP-2000 было показано, что в ИП высокой мощности используются различные схмотехнические решения. В случае, когда требуется недорогой ИП и повышенные требования по электромагнитной совместимости не предъявляются, разрабатывается максимально простой ИП по классической схеме по технологии «жёсткой» коммутации силовых ключей. В том случае, если предъявляются требования по высокой эффективности ИП и низкому уровню электромагнитных помех, возникает необходимость использования в составе вторичного преобразователя схем по технологии «мягкой» коммутацией силовых ключей. Было показано, что эффективность ИП, построенного по принципу «жёсткой» коммутации силовых ключей, может быть доведена до уровня 90 %, однако это связано с использованием специальных технических решений (синхронного выходного выпрямителя, разбиением на каналы). Эффективность ИП, построенного по классической мостовой схеме последовательного резонанса, достигает того же уровня (порядка 91 %), причём анализ схмотехнических решений и литературных источников показывает, что это не предельное значение – существуют способы повышения КПД до значения 95 % и выше.

Исходя из современных тенденций и анализа присутствующих на рынке ИП, первостепенным представляется использование «мягкой» коммутации силовых ключей в схеме вторичного преобразователя ИП. Перспективным направлением является реализация улучшенной резонансной схемы LLC с «мягкой» коммутацией ZVS и применение синхронного выпрямителя в выходном выпрямительном блоке ИП. Эти меры обеспечат существенное увеличение КПД и уменьшение электромагнитных помех. Реализация корректора коэффициента мощности с использованием технологии ZVS является перспективным направлением, дополняющим вышеперечисленные шаги по увеличению эффективности и надёжности ИП, при уменьшении габаритов и электромагнитного излучения ИП. Выбор между полумостовой и полной мостовой схемами вторичных преобразователей осуществляется исходя из выходной мощности разрабатываемого ИП. Стоит отметить, что использование «мягкой» коммутации силовых ключей значительно увеличивает предельную мощность преобразователя в случае использования полумостовой схемы до значений 2 – 3 кВт, а при использовании мостовой схемы – до 6 кВт.

Проведённый в работе анализ схемотехнических решений ИП позволяет разбить практическую задачу конструирования ИП на две самостоятельные параллельные задачи. Первая задача заключается в разработке и оптимизации параметров силовых модулей ИП. Вторая задача – в отработке технологии ZVS на базе мощных IGBT-транзисторов, разработке драйверов ключей, адаптированных к условиям «мягкой» коммутации силовых ключей, и их внедрение в готовые силовые модули ИП. Решения этих задач будут предметом наших следующих публикаций.

Литература

1. Васильев В.Ю., Козляев Ю.Д., Пичугин И.В., Семенов 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. Сайт компании Ecosa Plug Load Solutions [Электронный ресурс].
URL: <http://www.plugloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx>
(дата обращения: 01.10.2012).
3. Jovanović M.M., Jang Y. State-of-the-art, single-phase, active power-factor-correction techniques for high-power applications – An overview // IEEE transactions on industrial electronics, June 2005, №3, vol.52, P.701-708.
4. Фролов А., Лузанов С., Рыбак А., Сметков Н. Однокаскадный корректор коэффициента мощности // Схемотехника, 2001, №10, с.12-14.
5. Braga H., Barbi I. A 3-kW unity-power-factor rectifier based on a two-cell boost converter using a new parallel-connection technique // IEEE transactions on industrial electronics, June 1999, №1, vol.14, P.209-217.
Jovanović M.M., Jang Y., Liao P., Huang J.S., Tsai V., Pen H., Chang C., Sharifipour B. High performance power-factor-correction topologies for server applications // Delta Electronics Inc. Sixth Annual Hewlett-Packard Power Systems Technology Symposium, Sept.15, 1999.
6. Jang Y., Jovanović M.M. and Juan M. Ruiz A new three-phase two-switch ZVS PFC DCM boost rectifier // IEEE APEC, 2012, P.807-814.
7. Biela J., Hassler D., Miniböck J. and Kolar J.W. Optimal design of a 5kW/dm³/ 98.3% efficient TCM resonant transition single phase PFC rectifier // IEEE IPEC, 2010, P.1709-1716.
8. Designing High-Efficiency ATX Solutions. Practical design considerations & results from a 255 W reference design // Сайт компании ON Semiconductor [Электронный ресурс].
URL: <http://www.onsemi.ru.com/pub/Collateral/TND356-D.PDF>
(дата обращения 15.09.2012).
9. Sri Jandhyala, Solley D. Meeting emerging power conversion efficiency needs // Electronic products, 2007, №12, vol.49, P.95-96.
10. DC-DC Converters: a primer // Сайт компании Jaycar Electronics [Электронный ресурс].
URL: http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/dcdcconv.pdf
(дата обращения 15.09.2012).
11. Wuidart L. Topologies for switched mode power supplies – Application note AN513/0393 // Сайт компании STMicroelectronics [Электронный ресурс].
URL: www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/APPLICATION_NOTE/CD00003910.pdf
(дата обращения 15.09.2012).
12. Liu K.H. Resonant switches topologies and characteristics // Proc. IEEE PESC'85, 1985, P.106-116.
13. Yang J.J. and Lee F.C. Computer aided design and analysis of series resonant converters // Proc. IEEE IAS'87, 1987.
14. Oruganti R., Yang J. and Lee F.C. State plane analysis of parallel resonant converters // Proc. IEEE PESC'85, 1985.

15. *Liu R., Batarseh I., Lee C.Q.* Comparison of capacitively and inductively coupled parallel resonant converters // IEEE transactions on power electronics, 1993, vol.8, P.445-454.
16. *Yang B., Lee F.C., Zhang A.J. and Huang G.* LLC resonant converter for front end DC-DC conversion // IEEE APEC, 2002, vol. 2, P.1108-1112.
17. *Zhong Ye* Dual half-bridge DC/DC converter with wide-range ZVS and zero circulating current // IEEE ECCE, 2009, P.1353-1361.
18. *Hong Huang* FHA-based voltage gain function with harmonic compensation for LLC resonant converter // IEEE APEC, 2010, P.1770-1777.
19. *Byeong Cheol Hyeon, Bo Hyung Cho* Multiple output of dual half bridge LLC resonant converter using PFM-PD control // IEEE ECCE, 2009, P1133-1140.
20. Green Phase-Shifted Full-Bridge Controller with Synchronous Rectification. UCC28950 Data Sheet, TI Literature № SLUSA16B // Сайт компании TI [Электронный ресурс].
URL: www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28950.pdf (дата обращения 15.09.2012).

Статья поступила в редакцию 16.01.2013

Васильев Владислав Юрьевич

д.х.н., зам. директора по науке ООО «РАМИТ» (630084, Новосибирск, ул. Авиастроителей 8-33), тел.(383)-2655821, профессор кафедры технической электроники СибГУТИ, e-mail: vladislavvasilyev@gmail.com

Антонов Андрей Андреевич

инженер-конструктор ООО «РАМИТ» (630084, Новосибирск, ул. Авиастроителей 8-33), тел.(383)-2655821

Пичугин Игорь Валентинович

Инженер-конструктор ООО «РАМИТ» (630084, Новосибирск, ул. Авиастроителей 8-33), тел.(383)-2655821

Гордиенко Сергей Михайлович

Инженер-конструктор ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639

Development of sources of secondary power supply implemented using zero voltage switch technologies. Part 2. Circuits power supply solutions analysis

V.U. Vasilev, A.A. Antonov, I.V. Pichugin, S.M. Gordienko

The aim of this research is to develop sources of secondary power supply 2000 volt using Zero Voltage Switch (ZVS). The paper consists of two parts describing various aspects of power supplies designing. The analysis of information materials and evaluation of critical parameters of some foreign power supplies are given in the first part of the paper. The second part describes technical realization of power supply options and possible uses of Zero Voltage Switch technology.

Keywords: AC/DC power supplies, Zero Voltage Switch, ZVS, electromagnetic interferences.