

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

Часть 3. Разработка макета силового модуля источника питания¹

В.Ю. Васильев, А.В. Марков, А.А. Антонов, И.В. Пичугин

Целью работы является разработка источников вторичного электропитания мощностью 2000 Вт, реализующих технологию «мягкой коммутации» Zero Voltage Switch (ZVS). Работа состоит из нескольких 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 рассматриваются варианты схемотехнической реализации источников питания и возможные направления использования технологии «мягкой» коммутации. В третьей части работы рассматриваются результаты разработки отдельных модулей силовой части источника питания в «жесткой» коммутации силовых ключей, макета цифровой системы управления источника питания с CAN-интерфейсом и оценки показателей эффективности и электромагнитных помех на примере исследования характеристик разработанного макета силового модуля источника питания. Полученные результаты позволяют сопоставлять показатели с аналогичными, полученными в источниках питания с «мягкой» коммутацией ключей.

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

1. Введение

В первой части работы [1] проведен анализ информационных материалов с целью определения наиболее перспективных направлений развития источников вторичного электропитания (далее – ИП). Результаты анализа позволили выявить ряд закономерностей в заявленных характеристиках 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

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).

(ZVS), представляющуюся наиболее перспективной для реализации мощных высоконадёжных источников питания с низким уровнем электромагнитных помех.

Во второй части работы [2] проведён анализ информационных материалов и результатов экспериментальных измерений характеристик ИП для определения перспективных направлений схмотехнического конструирования основных элементов ИП. Были проведены сравнительные исследования образцов ИП высокой мощности, реализованных как по традиционной технологии «жёсткой» коммутации силовых ключей, так и технологии «мягкой» коммутации ключей. Показано, что в зависимости от конечного назначения ИП в них 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 «жёсткой» коммутации ключей. В том случае, если предъявляются требования по длительной бесперебойной работе (надёжности) ИП и/или низкому уровню электромагнитных помех ИП, возникает необходимость использования в составе вторичного преобразователя схем с «мягкой» коммутацией ключей. Перспективным направлением является реализация улучшенной резонансной схемы LLC с «мягкой» коммутацией ZVS и применение синхронного выпрямителя в выходном выпрямительном блоке ИП, так как эти меры обеспечат существенное увеличение КПД и уменьшение электромагнитных выбросов. 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. Проведённый во второй части работы анализ схмотехнических решений ИП позволил разбить практическую задачу конструирования модульного ИП на две самостоятельные параллельные задачи. Первая из них заключается в разработке и оптимизации параметров силовых модулей ИП, вторая – в разработке драйверов «мягкой» коммутации силовых ключей и последующем их сопряжении с силовыми модулями ИП.

В третьей части работы рассматриваются результаты разработки отдельных модулей силовой части источника питания в жёсткой коммутации силовых ключей, макета цифровой системы управления источника питания с CAN-интерфейсом и оценки показателей эффективности и электромагнитных помех на примере исследования характеристик разработанного макета силового модуля источника питания. В ходе работы предполагалась практическая отработка известной современной схмотехники «жёсткой» коммутации (см. анализ, проведённый в [2]), в особенности решение вопросов по элементной базе для комплектации силовых узлов макета, отработка конструктивно-технологических вопросов для корпуса источника питания формата 1U (см. пояснения в [1]), исследование энергетических параметров силового узла ИП. Также предполагалось проведение разработки макета цифровой системы управления с CAN-интерфейсом (ЦСУ) для контроля и управления макетами ИП.

Основные параметры разрабатываемого макета были следующими: мощность – 2000 Вт, выходное напряжение – 48 В. Итогом работы предполагалось получение отработанных схмотехнических решений и конструкции «силового» макета в конструктиве 1U, состыкованного с шиной CAN. При этом ЦСУ разрабатывался как достаточно универсальный и самостоятельный узел, который можно было бы интегрировать в другие варианты макетов ИП, в том числе – с «мягкой» коммутацией.

2. Разработка макетов силовых узлов ИП

Разработка предусматривала последовательное выполнение работ по моделированию, экспериментальному макетированию и обследованию характеристик общих силовых элементов ИП с последующим изготовлением отдельных узлов и макета в целом. В ходе разработки использована элементная база (прежде всего – силовые полупроводниковые приборы) в основном импортного производства.

В ходе разработки проведены:

- выбор схемного решения активного корректора коэффициента мощности (АККМ) ИП, предварительное моделирование, определение предельных режимов работы элементов, выбор различных вариантов алгоритмов управления АККМ, разработка принципиальной схемы, определение предельных режимов работы элементов, разработка принципиальной схемы и изготовление макета аналоговой системы управления АККМ, изготовление макета АККМ, проведение испытания АККМ при разных электромагнитных элементах и силовых ППП, проведение испытания АККМ при разных частотах преобразования и входных напряжениях;
- подбор магнитных сердечников для трансформаторов разных модификаций, конденсаторов, модулей низковольтного питания;
- выбор основных вариантов силовой схемы высокочастотного автономного инвертора, проведение предварительного моделирования с целью определения предельных режимов работы силовых полупроводниковых приборов, трансформатора, конденсаторов, разработка принципиальной схемы и моделирование инвертора, определение предельных режимов работы элементов инвертора;
- разработан и изготовлен макетный образец ИП в габаритных размерах 1U, изготовлены и настроены аналоговые системы управления АККМ и инвертора;
- разработана, изготовлена и отлажена плата ЦСУ с CAN-интерфейсом, сочленённая с силовой схемой ИП и аналоговыми системами управления АККМ и высокочастотного инвертора. Произведена отладка работы платы ЦСУ с CAN-интерфейсом с учётом существующих электромагнитных помех в макетном корпусе ИП в диапазоне реальных нагрузок на выходе ИП.

На рис. 1 (а,б) приведены принципиальные схемы АККМ, высокочастотного инвертора и выходного выпрямителя. В АККМ использован транзистор STE70NM60 (VT1) с пассивной демпферной цепью R1-VD3-C3; частота коммутации составляла ~ 97 кГц. В инверторе, построенном по полумостовой схеме, использованы транзисторы SGL160N60UFD (VT1, VT2); частота коммутации составляла 64.9 кГц.

На рис. 2 показан внешний вид разработанных и изготовленных печатных плат аналоговой системы управления АККМ и аналоговой системы управления высокочастотного инвертора. Внешний вид разработанных, изготовленных и исследованных вариантов конструкции реактора АККМ (на Ш-образных сердечниках и кольцах) приведены на рис. 3.

В ходе разработки было изготовлено несколько вариантов макетов, на которых исследовались характеристики отдельных узлов ИП. На рис. 4 показан внешний вид оптимизированного макета ИП на Ш-образных сердечниках в форм-факторе 1U, в состав которого входят все вышеописанные печатные платы, а также плата ЦСУ с CAN интерфейсом (см. ниже). Оптимизация макета включала в себя также добавление входного и выходного фильтров помех на RLC-цепочках (ранее на принципиальных схемах не показанных).

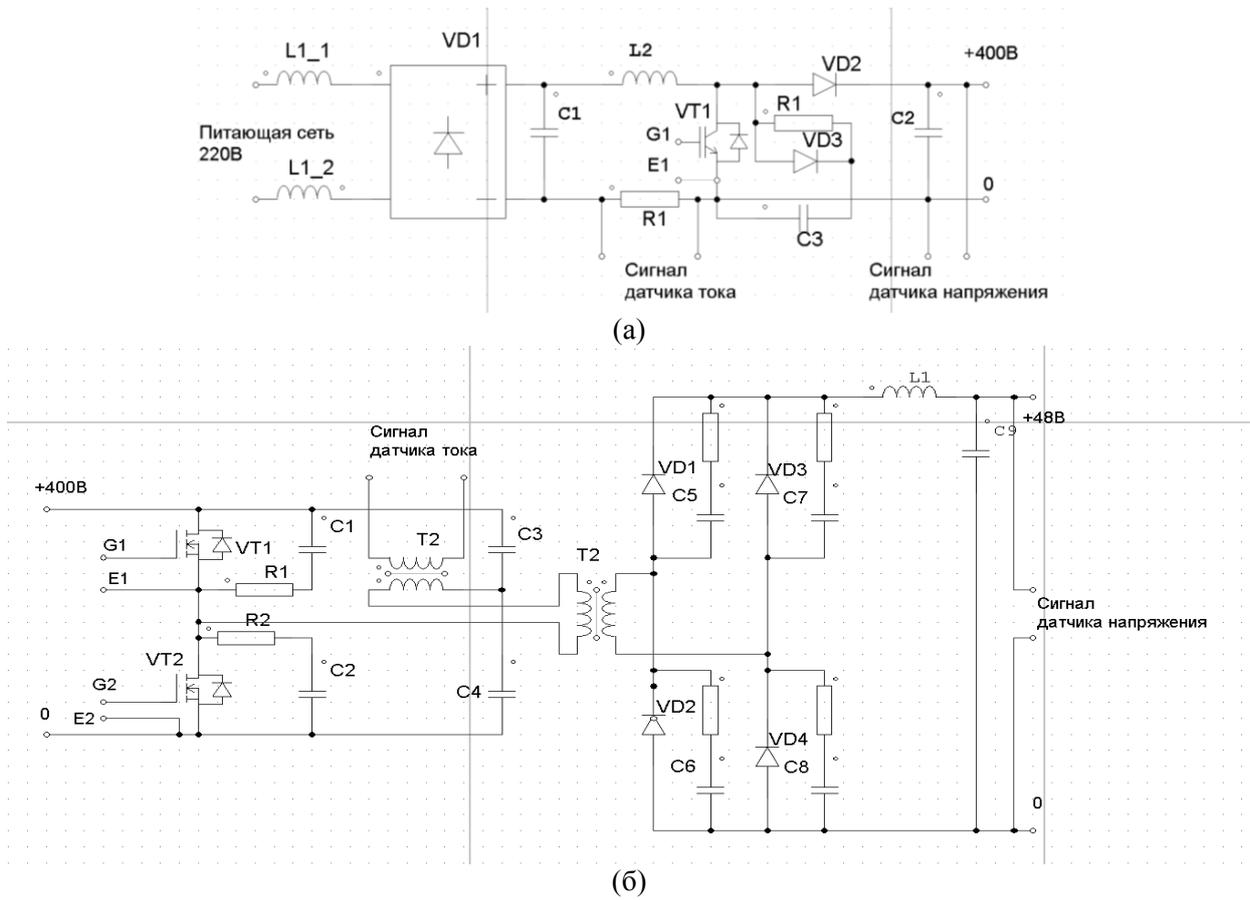
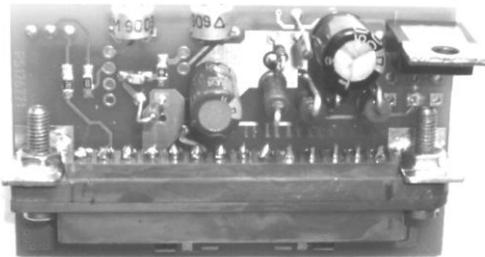
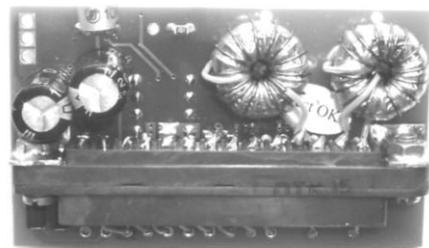


Рис. 1. Принципиальная схема АККМ (а) и высокочастотного инвертора и выходного выпрямителя (б)



(а)



(б)

Рис. 2. Печатные платы в сборе: аналоговой системы управления ККМ (а) и аналоговой системы управления высокочастотного инвертора (б)

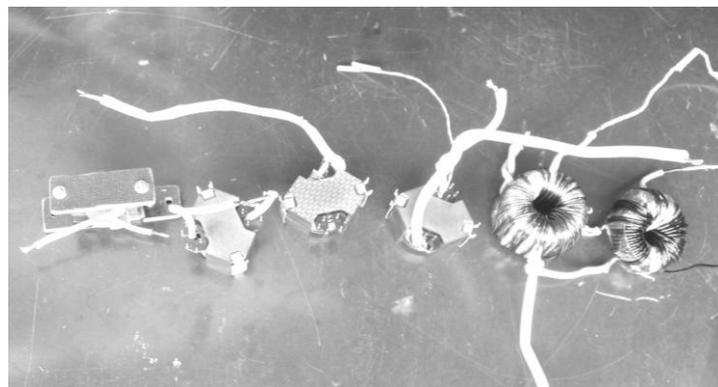


Рис. 3. Различные варианты конструкции реактора АККМ: слева направо 1 – 4 – на Ш-образных сердечниках, 5, 6 – на кольцах

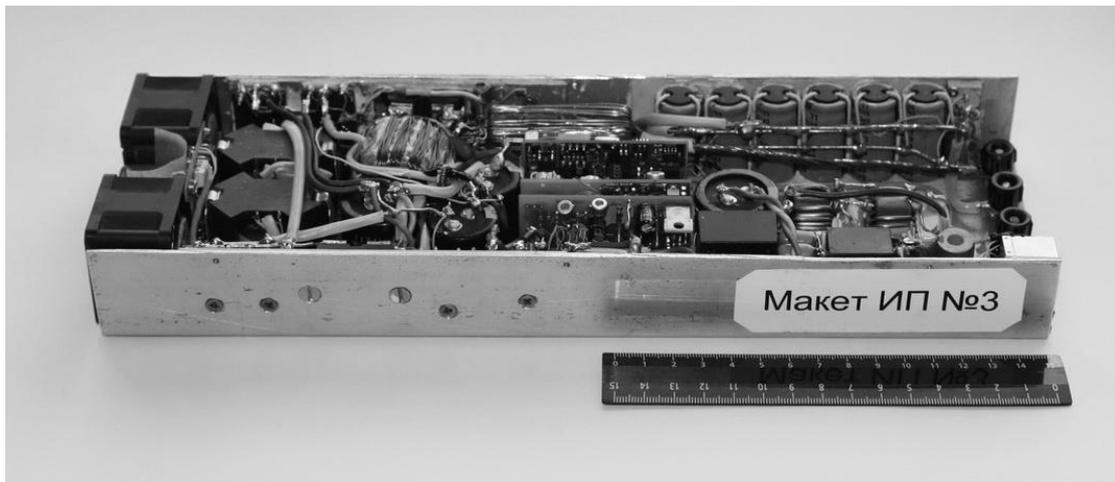


Рис. 4. Внешний вид оптимизированного макета силового модуля ИП. Слева направо в корпусе: вентиляторы, реакторы АККМ и инвертора, платы управления, входные и выходные фильтры помех. Силовые транзисторы расположены на стенках корпуса

3. Разработка макета цифровой системы управления с CAN-интерфейсом

Назначение ЦСУ. При разработке макета ИП для ЦСУ были сформулированы следующие технические требования:

- обеспечение функции измерения параметров ИП: напряжения питающей сети переменного тока, выходного напряжения ИП, выходного тока ИП, температуры радиатора ИП, скорости вращения охлаждающего вентилятора;
- обеспечение функции защиты ИП путём блокировки работы ИП при выходе за заданные диапазоны измеряемых параметров осуществляется заданием параметров удалённо через CAN-интерфейс с записью в энергонезависимую память. Например, блокировка работы ИП происходит при выходе напряжения питающей сети переменного тока за диапазон 110 – 265 В с автоматическим восстановлением при попадании питающего напряжения в диапазон 160 – 255 В, при отклонении выходного напряжения ИП от номинального, при превышении максимально допустимого выходного тока ИП, при превышении максимально допустимой температуры радиатора ИП, при неисправности системы охлаждения (определяется по скорости вращения вентиляторов);
- обеспечение функции управление ИП в штатном режиме путём контроля работы вентилятора на основании температуры радиатора ИП, обеспечения удалённого контроля и управления ИП посредством гальванически изолированного интерфейса CAN 2.0.

Исходя из требований к ЦСУ, в качестве управляющего был выбран микроконтроллер C8051F061 (DD5) фирмы SiliconLaboratories [3].

Интерфейс CAN 2.0. Удалённое управление и считывание данных с ИП обеспечиваются посредством CAN-интерфейса. Сигналы шины CAN гальванически развязаны с ЦСУ ИП. ЦСУ ИП принимает по линиям связи шины CAN команды включения и выключения ИП. ЦСУ ИП по запросу отправляет информацию об измеряемых величинах и о состоянии ИП. Протокол верхнего уровня обеспечивает работу до 16 источников на одной шине CAN. За основу протокола верхнего уровня CAN-интерфейса в ЦСУ взят протокол CANOpen [4]. ИП является ведомым устройством в сети CANOpen со своим уникальным адресом (идентификатором). ИП отвечает на запросы удалённого управляющего устройства (например, персональный компьютер).

Функциональная схема ЦСУ. На рис. 5 приведена функциональная схема ИП с ЦСУ. В самом ИП можно выделить АККМ и схему управления АККМ (СУ АККМ), гальванически изолированный DC/DC преобразователь и схему управления DC/DC (СУ DC/DC). ЦСУ питается от маломощного AC/DC блока питания СУ, от него же питается СУ DC/DC. На ЦСУ

от СУ АККМ поступает гальванически изолированный цифровой сигнал, частота которого пропорциональна напряжению сети. На ЦСУ от СУ DC/DC поступает аналоговый сигнал выходного напряжения в масштабе 1:1 и аналоговый сигнал, пропорциональный выходному току ИП. На ЦСУ от системы охлаждения поступает два гальванически-изолированных цифровых сигнала, частота которых равна скорости вращения одного и второго вентилятора. ЦСУ считывает с цифрового датчика Т температуру радиатора ИП и на основании полученных значений управляет (вкл. или выкл.) вентиляторы системы охлаждения. ЦСУ управляет СУ DC/DC (вкл. / выкл. удалённо через интерфейс либо выкл. по защите). ЦСУ также может управлять цифровым потенциометром на СУ DC/DC, подстраивая таким образом выходное напряжение (по команде через CAN-интерфейс).

Внешний вид разработанной и изготовленной многослойной печатной платы ЦСУ в сборе приведен на рис. 6 (а, б). Для питания непосредственно микросхем ЦСУ на плате ЦСУ установлен DC/DC преобразователь 24 В в 5 В и линейный регулятор 5 В в 3.3 В. В ЦСУ предусмотрена энергонезависимая память DATAFLASH, в которой хранятся пороговые значения различных установок (такие как максимально допустимый выходной ток, максимально допустимая температура) и т.д. На плате ЦСУ предусмотрен внешний сторожевой таймер (watchdogtimer — WDT). В ЦСУ имеется гальванически изолированный интерфейс CAN2.0, посредством которого осуществляется контроль и управление ИП.

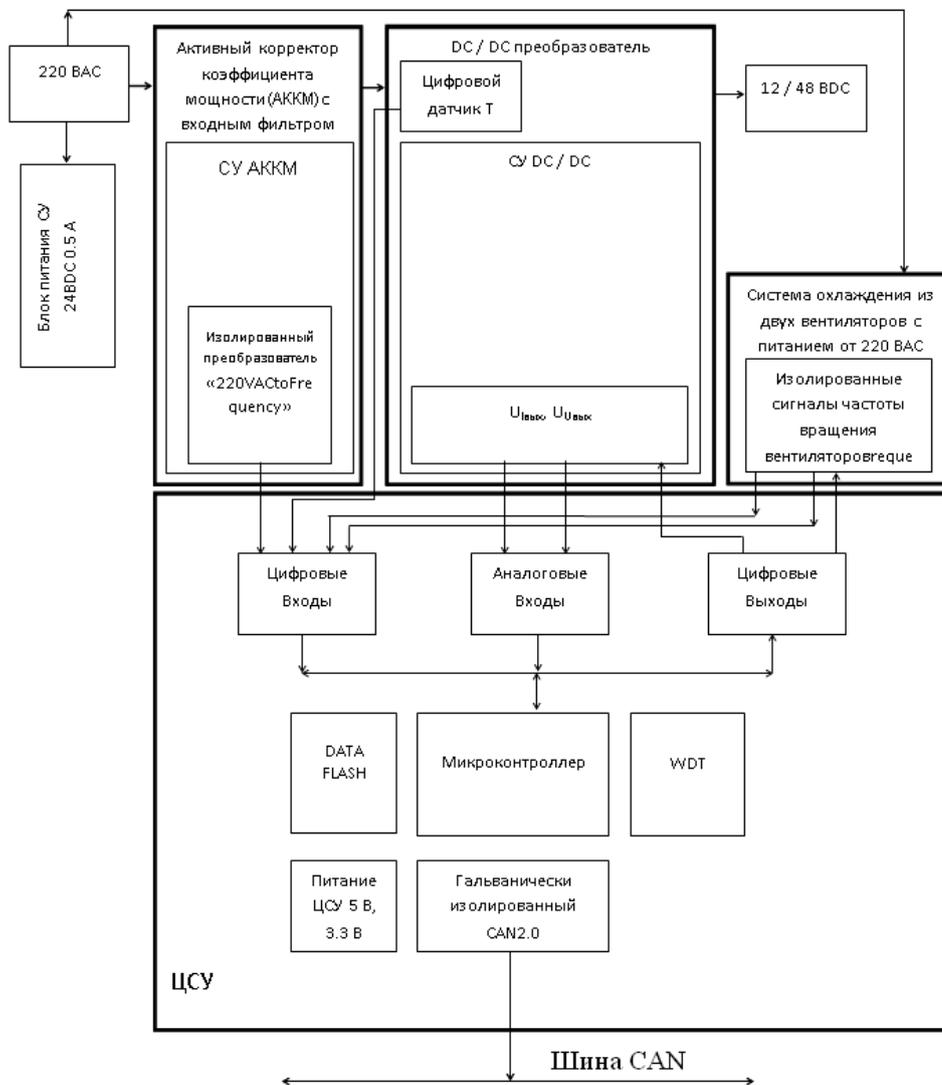


Рис. 5. Функциональная схема МП с ЦСУ

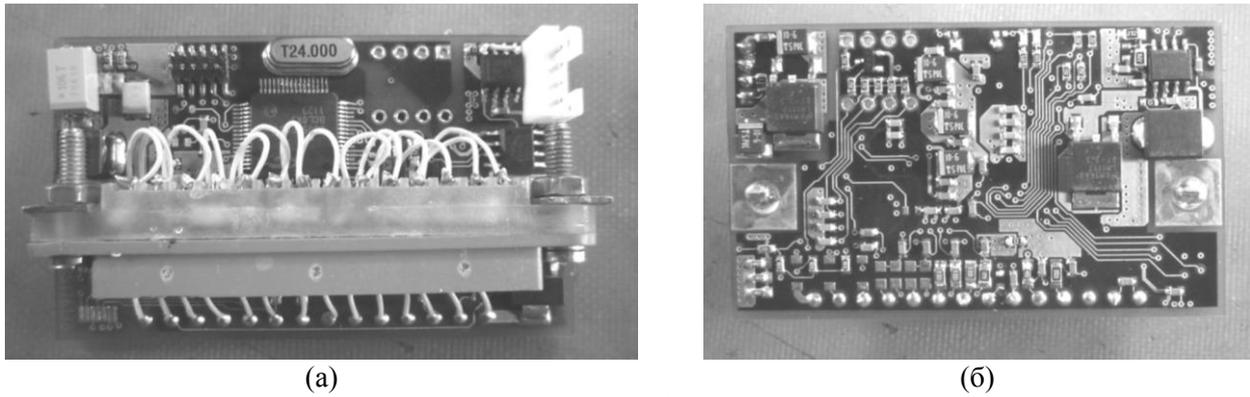


Рис. 6. Печатная плата ЦСУ с CAN-интерфейсом: вид сверху (а) и вид снизу (б)

На рис. 7 в виде снимка экрана показан пример отображения работы ИП с ЦСУ на персональном компьютере при помощи разработанной программы Power Supply Monitor.

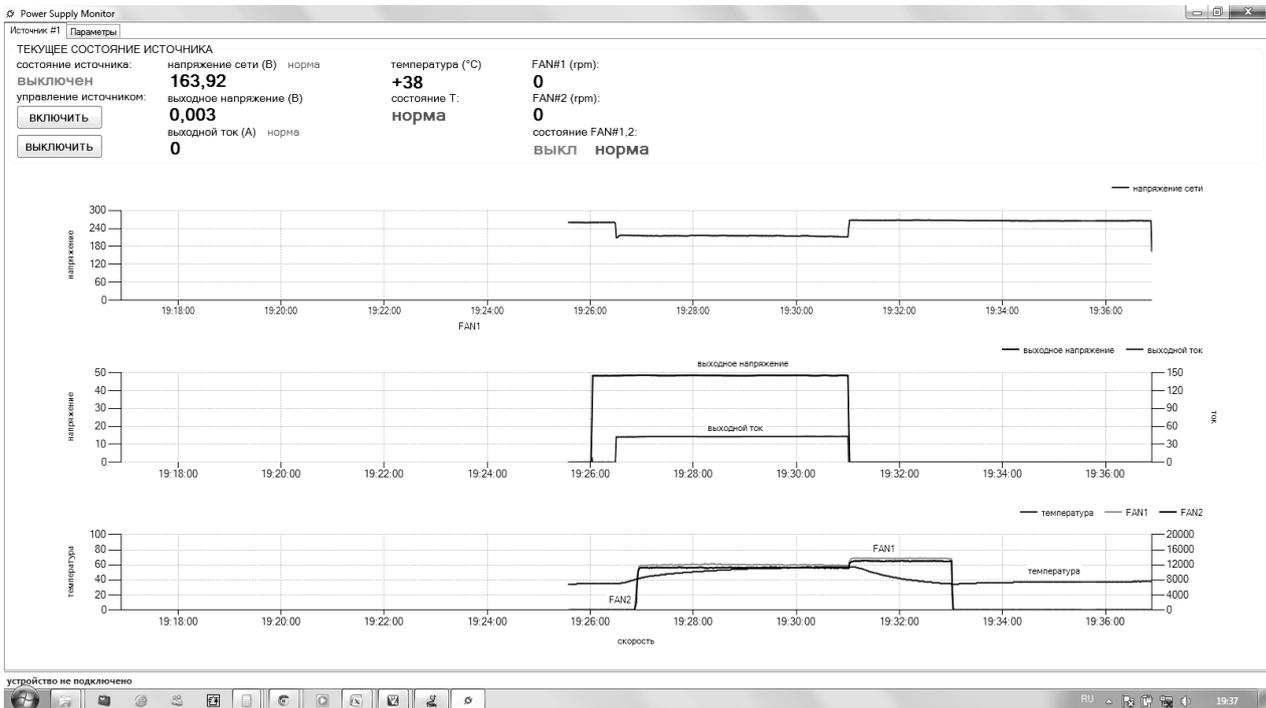


Рис.7. Снимок экрана программы Power Supply Monitor, демонстрирующий работу разработанного и изготовленного макета силового модуля ИП, показанного на рис. 4.

Верхний ряд – контроль напряжения в сети; средний ряд – контроль выходного напряжения и выходного тока; нижний ряд – контроль температуры радиатора и работы вентиляторов

Рисунок отображает ход работы ИП, и на нём можно выделить следующие моменты:

- включение ИП в сеть (при этом $U_{\text{вых}}$ и $I_{\text{вых}}$ равны нулю, температура радиатора 27 °С, вентиляторы выключены;
- включение ИП на «холостой ход» кнопкой «ВКЛЮЧИТЬ» ($U_{\text{вых}} = 48$ В и $I_{\text{вых}} = 0$);
- подключение к ИП номинальной нагрузки ($U_{\text{вых}} = 48$ В и $I_{\text{вых}} = 43$ А), температура радиатора начинает расти, наблюдается т.н. «просаживание» напряжения питающей сети;
- включение охлаждающих вентиляторов при достижении температуры радиатора 40°С;
- работа в номинальном режиме в течение 5 минут (стабилизация температуры на отметке в 60°С);
- выключение ИП кнопкой «ВЫКЛЮЧИТЬ», возврат в норму напряжения питающей сети, начало снижения температуры радиатора;
- выключение охлаждающих вентиляторов при достижении температуры ниже 35°С;
- отключение ИП от сети.

4. Экспериментальная оценка параметров макета силового узла ИП

Экспериментальная оценка параметров макета силового модуля ИП проводилась по мере изготовления отдельных узлов и после изготовления оптимизированного образца макета в целом; при этом прежде всего интересовали энергетические характеристики макета ИП. Результаты измерений макета ИП представлены на рис. 8, 9. Они показывают, что разработанный макет удовлетворяет основным сформулированным техническим требованиям разработки; в частности, по достигнутому уровню КПД макет соответствует требованиям программы «80+». Наибольшей проблемой являлось обеспечение температурных режимов работы макета ИП на максимальных нагрузках, что требовало оптимизации размещения силовых приборов.

На рис. 8 приведены зависимости КПД и коэффициента мощности от выходной мощности макета ИП. Практические измерения подтверждают эффективность макета ИП и необходимость использования АККМ в ИП (судя по значению коэффициента мощности более 0.99, не происходит искажение напряжения питающей сети).

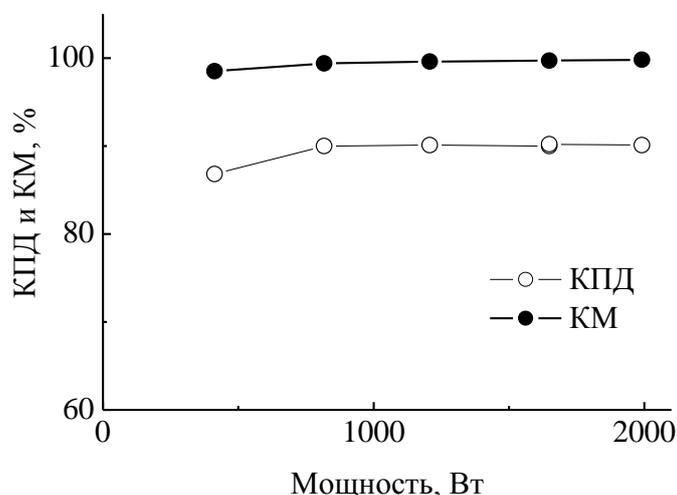


Рис. 8. Результаты измерений КПД и коэффициента мощности (КМ) разработанного макета силового модуля ИП

На рис. 9 приведены данные по оценке уровня электромагнитных помех разработанного макета ИП. Измерение электромагнитного излучения производилось без дополнительной экранировки ИП, корпус ИП был открыт, антенна находилась на расстоянии 1 м от ИП. Полученные данные близки к результатам измерений, проведённым на аналогичных по выходной мощности образцах зарубежных серийных ИП, построенных по схожей идеологии и схемотехнике (источники питания фирмы Mean Well серии RSP-2000, см. данные на рис. 7 в работе [1]).

На рис. 9 отчётливо видны выбросы на частотах работы силовых узлов модуля ИП (АККМ и инвертора) в диапазоне частот 0.05 – 0.1 МГц. В целом, такие уровни электромагнитных помех свойственны мощным импульсным ИП, построенным по классической идеологии «жесткого» переключения силовых транзисторов. Для улучшения функционирования этих узлов необходимо использовать режим «мягкой» коммутации силовых ключей.

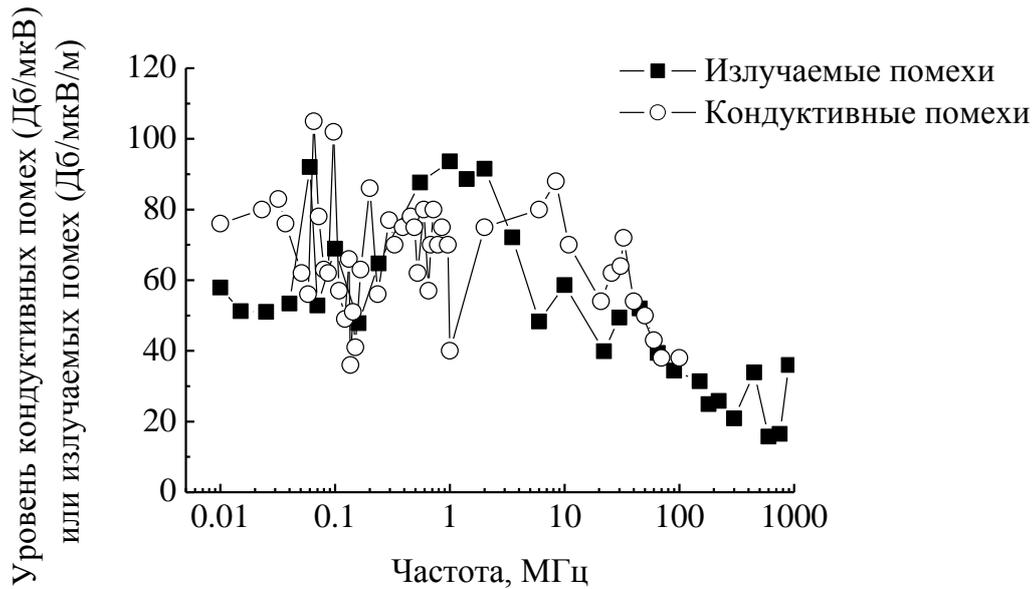


Рис. 9. Результаты измерений уровней электромагнитных помех, создаваемых разработанным силовым модулем макета ИП.

Пики при частотах 64.9 и 97 кГц обусловлены работой инвертора и АККМ

В ходе проведённой разработки авторы не ставили перед собой цель поиска возможностей снижения уровня электромагнитных помех макета силового модуля ИП по схемотехнике «жёсткой» коммутации силовых ключей. Как было показано в [2], даже серьёзная проработка данного вопроса в серийных ИП высокой мощности, построенных с использованием идеологии «жёсткой» коммутации силовых ключей, не приводит к уменьшению уровня электромагнитных помех настолько, насколько возможно их минимизировать при использовании идеологии «мягкой» коммутации силовых ключей. В связи с этим попытки улучшить характеристики ИП должны предприниматься по более эффективному и менее затратному направлению реализации ИП по идеологии «мягкой» коммутации силовых ключей.

5. Заключение

В третьей части работы изложены результаты решения практической задачи конструирования макета силового модуля ИП мощностью 2000 Вт и выходным напряжением 48 В в конструктиве 1U, имеющего собственную цифровую систему управления с шиной CAN. Форм-фактор 1U на сегодняшний день является наиболее жёстким в плане технических требований к характеристикам мощных высокоэффективных ИП, что накладывает ограничения на габаритные размеры элементной базы комплектующих изделий, прежде всего – электролитических конденсаторов, а также моточных изделий с ферритовыми сердечниками.

Результаты проведённой работы показали, что созданный и исследованный на предмет энергетических характеристик макет силового модуля ИП может служить в качестве базы для дальнейшей разработки ИП, содержащего в своей структуре драйверы «мягкой» коммутации силовых ключей. В следующей работе будут рассмотрены результаты исследований и разработки драйверов «мягкой» коммутации силовых ключей и их применения в силовых модулях. Достигнутые результаты дадут возможность сопоставить показатели с аналогичными, полученными в устройствах с «мягкой» коммутацией ключей и сопоставить технико-экономические затраты для приведения названных показателей к нормативным значениям.

Благодарность

Коллектив авторов выражает благодарность к.т.н. А.Н. Гультияеву за проведение работ по разработке макетов силовых узлов источников питания.

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. *SiliconeLaboratoriesC8051F060/1/2/3/4/5/6/7 Mixed Signal ISP Flash MCU Family Datasheet Rev. 1.2 7/04, 328 pages* // Сайт компании Silicon Labs [Электронный ресурс]. URL : <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F06x.pdf> (дата обращения 01.03.2013).
4. *CiA 301 V4.2.0 – CANopen application layer and communication profile. 136 pages* // Сайт организации CiA [Электронный ресурс]. URL : <http://www.can-cia.org/index.php?id=440>, (дата обращения 01.03.2013)

*Статья поступила в редакцию 05.03.2013;
переработанный вариант — 22.04.2013*

Васильев Владислав Юрьевич

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

Марков Артем Сергеевич

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

Антонов Андрей Андреевич

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

Пичугин Игорь Валентинович

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

**Development of secondary power supply implemented with «soft» key switching technology.
Part 3. Power module layout development of power supply****V.U. Vasilev, A.V. Markov, A.A. Antonov, I.V. Pichugin**

The aim of this paper is to develop secondary power supply of 2000W implementing the technology of «soft switching» Zero Voltage Switch (ZVS). The paper consists of several parts considering various aspects of the problem of power supply designing. In the first part of the paper the results of the analysis of information data and evaluation of the most important parameters of some foreign power supply are presented. In the second part of the paper options for power supply schematic implementation and possible uses of «soft» switching technology are considered. In the third part of the paper the results of the power supply individual modules of «hard» switching, the layout of the power supply digital control system with CAN interface and performance evaluation and electromagnetic interference illustrated by the characteristics investigation of the power supply developed layout are considered. The obtained results allow us to compare the figures with those obtained in power supply with «soft» switching keys.

Keywords: AC/DC modular power supply, «soft switching», Zero Voltage Switch, ZVS, electromagnetic interference.