

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ЗАКАЗОВ СЕРИИ «СОЮЗ»

В.А. Светлаков, И.Г. Пронькин, А.М. Бельков

АО «НПО Автоматики им. академика Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург, Россия

Рассматривается модернизация блоков питания, которые используются в бортовой аппаратуре заказов серии «Союз». Проводится анализ примененных схмотехнических решений, поиск путей модернизации. Разрабатывается и экспериментально проверяется схема нового перспективного преобразователя. Рассматривается схема цифровой телеметрии блока питания.

Ключевые слова: источник вторичного электропитания, ракетно-космическая техника, коэффициент полезного действия.

Введение

Импульсные стабилизаторы напряжения в настоящее время являются основными средствами преобразования электрической энергии, что обусловлено все возрастающими требованиями к эксплуатационным возможностям современной техники. Одной из основных характеристик источников вторичного электропитания является эффективность преобразования. Низкое значение коэффициента полезного действия приводит не только к повышению температуры изделия, что ограничивает срок его службы, но и к излишней потребляемой мощности от первичного источника питания. Последнее обстоятельство вынуждает использовать аккумуляторные батареи большей емкости, что оказывает сильное влияние на их характеристики.

Массогабаритные показатели для ракетно-космической отрасли являются весьма значимыми, так как их увеличение ведет к существенному сокращению полезной нагрузки, увеличению стоимости запуска. Поэтому естественно, что основная часть сети питания ракетно-космической техники обеспечивается импульсными преобразователями.

На данный момент семейство ракет-носителей «Союз-2» является актуальным и популярным средством для запусков космических аппаратов, кораблей и спутников различного назначения. Новые приборы предъявляют все более жесткие требования к качеству бортового электропитания, например, увеличение стабильности выходного напряжения при переходных процессах, увеличение эффективности, надежности, снижение пульсации выходного напряжения.

В связи с этим целью данной работы является модернизация используемого источника вторичного электропитания для его применения в современной бортовой аппаратуре.

1. Анализ используемого источника вторичного электропитания

1.1. Общая информация

В настоящее время для обеспечения работы бортовой аппаратуры, используемой в заказах серии «Союз», используются различные источники вторичного электропитания (ИВЭП), представленные в виде блоков. Такие блоки являются унифицированными конструктивными единицами, выполняемые в двух форматах, габаритные размеры которых показаны на рис. 1.

ИВЭП имеют двухстороннее расположение элементов с конструктивным разделением по сторонам схемы управления и силовой части. Данное решение позволяет дополнительно унифицировать блоки в производстве за счет использования единой печатной платы схемы управления. Различия силовых плат в основном заключаются в силовом трансформаторе и в каскаде выходного выпрямителя и обусловлены требованиями к выходным параметрам (выходные напряжения, максимальные токи, максимальные пульсации напряжения).

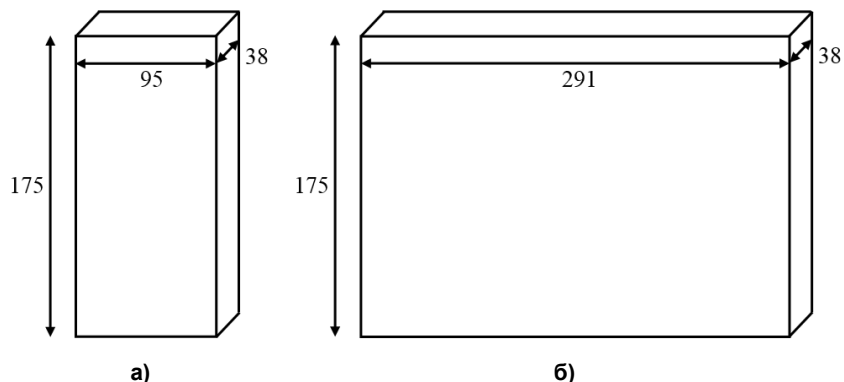


Рис. 1. Габаритные размеры блоков ИВЭП: а – 1/3 УК ЦВС; б – 1 УК ЦВС

Различные блоки обеспечивают до четырех выходных напряжений от 5 В до 30 В и мощность до 31 Вт.

1.2. Схемотехнические решения

Структурно источники питания имеют потенциальное разделение как между входом и выходом, так и между выходными цепями (за исключением каналов с одинаковым напряжением, но разной полярности). Потенциальное разделение вход-выход обеспечивается вспомогательным источником питания схемы управления и применением пропорционального токового управления силовым транзистором с помощью трансформатора тока. Упрощенная блок-схема ИВЭП показана на рис. 2.

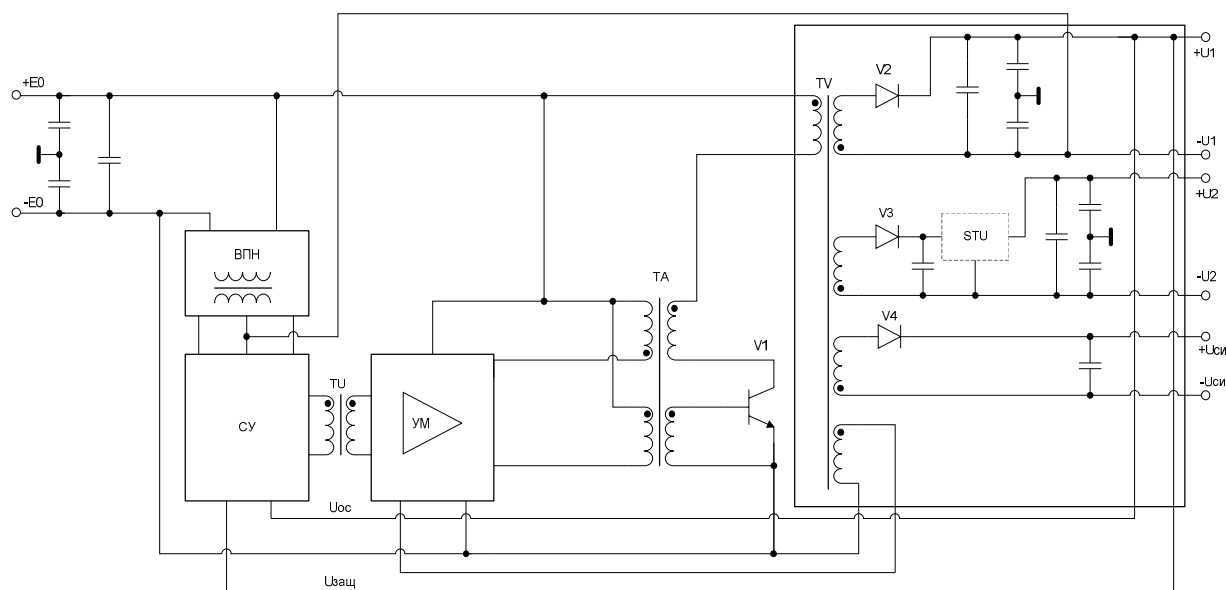


Рис. 2. Структурная схема ИВЭП: ВПН – вспомогательный преобразователь напряжения, СУ – система управления, ТУ – импульсный трансформатор, УМ – усилитель мощности, ТА – трансформатор тока, ТВ – силовой трансформатор, STU – линейный стабилизатор

По блок-схеме, изображенной на рис. 2, можно заметить, что применена топология обратного преобразователя. Входное напряжение поступает на вход вспомогательного преобразователя, который формирует двуполярное напряжение для питания элементов схемы управления. С выхода системы управления сигнал через импульсный трансформатор поступает на вход усилителя мощности, который посредством трансформатора тока управляет силовым транзистором. Уровень выходного напряжения стабилизированного выхода блока (U_1) определяется законом управления, нестабилизированных (U_2 и $U_{си}$) – соотношением витков обмоток силового трансформатора либо линейным стабилизатором.

Вспомогательный преобразователь напряжения имеет мостовую топологию с самовозбуждением. Такая схема не имеет активного регулирования, поэтому уровень ее выходного напряжения сильно зависит от напряжения питания и параметров трансформатора. К достоинствам следует отнести простоту и надежность схемы, малое количество элементов.

Для стабилизации выходного напряжения блока в системе управления используется частотно-импульсная модуляция (ЧИМ). При низком значении напряжения обратной связи происходит сближение импульсов управления, повышение частоты и, как следствие, повышение выходного напряжения на стабилизируемом выходе блока. К достоинствам преобразователей с ЧИМ следует отнести низкий ток потребления при малой нагрузке, а также быструю реакцию схемы на изменение напряжения питания или нагрузки за счет подстройки рабочей частоты.

Поскольку величина токового сигнала, формируемого на выходе схемы управления, недостаточна для управления силовым биполярным транзистором, используется схема с усилителем мощности и пропорциональным токовым управлением. Силовой транзистор при работе в таком режиме поддерживается на границе насыщения во всем диапазоне изменения тока коллектора, что повышает его быстродействие, поскольку в переходе база-коллектор накапливается меньше избыточных носителей заряда и, как следствие, уменьшается время их рассасывания при выключении.

Для защиты от превышения выходного напряжения имеется ограничительная схема, которая в случае обрыва цепи обратной связи или неисправности источника опорного напряжения будет удерживать выходное напряжение ИВЭП на заданном уровне. Также присутствует возможность дистанционного выключения блока сигналом, который гальванически развязан от сети первичного питания.

1.3. Возможности для модернизации

Вышеописанная схема была разработана в первой половине девяностых годов прошлого века и это необходимо учитывать, так как отечественная электроника заметно изменилась с того времени.

В ходе анализа были выявлены некоторые недостатки существующего блока питания, которые для удобства сведены в таблице. Там же приведены возможные пути модернизации.

Выявленные возможности для модернизации

Проблемные вопросы	Следствие	Решение
Большое число элементов в схеме (≈ 150 шт.)	Уменьшается надежность, увеличивается шанс отказа и сложность изготовления	Использовать современные интегральные микросхемы и автоматизированный монтаж элементов
Большое количество трансформаторов	Дополнительные электромагнитные помехи	Сократить количество трансформаторов
Защита от превышения выходного напряжения только для стабилизируемого канала	В аварийной ситуации выходное напряжение других каналов возрастет до максимума	Организовать защиту от превышения выходного напряжения в каждом канале
Защита от короткого замыкания в цепях питания потребителя отсутствует	В аварийной ситуации силовые элементы блока питания выйдут из строя	Организовать защиту от короткого замыкания в цепи питания потребителя для каждого канала
Рабочая частота 20–40 кГц	Увеличение габаритных размеров сердечника силового трансформатора, необходимой емкости для фильтрации входных и выходных цепей	Увеличить рабочую частоту свыше 150 кГц
Частотно-импульсная модуляция	Сложность компенсации сигнала обратной связи, фильтрации выходного напряжения	Использовать широтно-импульсную модуляцию
Биполярные силовые транзисторы и схема управления на дискретных элементах	КПД 50–66 % на максимальной нагрузке	Использовать современные методы повышения КПД ИВЭП и МДП-структуры

Отдельно стоит упомянуть систему телеметрии блока питания как обязательный атрибут для ракетно-космической техники. В существующем варианте организована аналоговая телеметрия в виде дополнительной обмотки силового трансформатора. Напряжение этой обмотки пропорционально напряжению обмоток выходных каналов, что делает возможным слежение только общего изменения выходного напряжения. Возможностью глубокой модернизации является применение цифровой телеметрии, способной отслеживать напряжение отдельно каждого номинала и передавать информацию по различным интерфейсам, а также аналоговым сигналом.

2. Разработка актуального источника вторичного электропитания

2.1. Проявляемые требования

Основными требованиями для нового блока питания являются:

- сохранение прежнего конструктива;
- решение указанных в таблице проблемных вопросов;
- обеспечение актуальных выходных параметров;
- применение отечественных элементов, входящих в ограничительный перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения в военной и специальной технике.

Для обеспечения прямого регулирования и защиты каждого номинала выходного напряжения блока было принято решение построить преобразователь по модульному принципу. Каждый номинал выходного напряжения становится полностью независимым от остальных и формируется собственной системой управления.

Достоинством подхода является унификация таких модулей, что позволяет легко собрать из них блок с различными выходными характеристиками. Однако новый преобразователь должен занимать максимум 25 % площади блока питания с учетом размещения модуля телеметрии.

2.2. Проектирование схемы

Были проанализированы две топологии однотактных преобразователей с гальванической развязкой: с прямым и обратным включением диода (прямоходовая и обратнoходовая, соответственно). Двухтактные топологии не рассматривались из-за малой требуемой выходной мощности. Наиболее выгодной с точки зрения габаритных размеров силового трансформатора, КПД и выходных параметров в данных условиях применения оказалась прямоходовая топология.

Для построения системы управления преобразователем была выбрана новая разработка АО «АНГСТРЕМ» ШИМ-контроллер 1363EY1Y (функциональный аналог LM5025MTC Texas Instruments). Данный контроллер имеет два выходных канала, которые могут настраиваться относительно друг друга, встроенный источник опорного напряжения, входы для организации различных защит и малогабаритный корпус 5119.16-A. На момент написания этой статьи данной микросхемы еще нет в ограничительном перечне, но уже проводятся работы, завершающие ОКР.

Наличие двух настраиваемых выходных каналов ИМС 1363EY1Y позволило применить схему активного демпфирования индуктивных выбросов на силовом ключе. Кроме того, что это повышает КПД преобразователя, происходит также перемагничивание сердечника силового трансформатора без дополнительной обмотки. Во всех режимах эксплуатации преобразователя трансформатор работает в режиме непрерывных токов.

Схема активного демпфирования работает следующим образом. Через некоторое время после закрытия силового ключа открывается транзистор демпфера и энергия, накопленная в индуктивности рассеивания, переводится через конденсатор в цепь первичного питания без значимых потерь. Затем транзистор демпфера должен закрыться до того, как откроется силовой ключ. Пауза между переключениями транзисторов очень важна во избежание возникновения сквозного тока через транзистор демпфера и настраивается уже на реальном образце с учетом паразитных параметров схемы.

Для повышения технологичности и сокращения габаритных размеров выбран планарный

Е1-трансформатор. Обмотки выполнены в виде печатной платы, что дополнительно повышает воспроизводимость параметров трансформатора, уменьшает индуктивность рассеивания.

Учитывая, что некоторые каналы выходного напряжения блока питания должны обеспечивать токи свыше 3 А, в качестве выпрямительного каскада была заложена схема синхронного выпрямления. Вместо стандартного выпрямительного диода используется полевой транзистор с малым сопротивлением открытого канала, а в случае прямоходовой топологии рационально будет заменить и разрядный диод. Подключать транзистор необходимо так, чтобы его паразитный $p-n$ -переход заменял исключаемый диод. Тогда при включении транзистора выпрямляемый ток создаст падение напряжения на открытом канале, которое гораздо меньше, чем на диодах Шоттки.

Стоит отметить, что в данной схеме важно правильно синхронизировать работу транзисторов выпрямления и силового ключа. Между их переключениями должна быть пауза, так как паразитные элементы транзисторов не позволяют им мгновенно выключаться и появляется опасность протекания сквозного тока в первичной и вторичной цепях. Но при смене полярности на обмотках силового трансформатора внутренний диод транзистора выпрямления начинает проводить вне зависимости от сигнала на затворе, поэтому слишком долгая пауза ведет к возрастанию рассеиваемой энергии.

Были проанализированы две схемы синхронизации: с управляемой задержкой от примененного ШИМ-контроллера и с переключением от вторичной обмотки силового трансформатора. В итоге использовалась последняя, которая позволяет минимизировать промежуток проводимости паразитного диода и обеспечивает наилучший КПД. Однако появляется необходимость согласования уровней напряжения с обмотки и допустимого напряжения на затворе транзистора.

Цепь обратной связи была построена стандартным образом посредством усилителя сигнала рассогласования (регулируемый стабилизатор с параллельным включением) и оптопары для гальванической развязки входных и выходных цепей.

В преобразователе предусмотрена цепь защиты от превышения выходного напряжения в случае, например, обрыва или неисправности обратной связи. При возникновении такой ситуации цепь выступает в роли резервного контура обратной связи, который построен аналогичным образом, но настроен на более высокое напряжение. Сигнал с данного контура поступает на специальный вход защиты микросхемы и может ограничивать длительность ШИМ-импульса вне зависимости от основного сигнала ШИМ-компаратора.

Защита от короткого замыкания во вторичной части преобразователя или в цепи питания потребителя организована по току первичной обмотки с помощью токового шунта. Полученный сигнал после обработки поступает на другой вход защиты микросхемы. При срабатывании данной защиты происходит выключение ШИМ-контроллера и пауза перед запуском, длительность которой можно настроить. Если после паузы короткое замыкание не устраняется, микросхема запускается и вновь выключается, не позволяя силовым элементам работать в недопустимых режимах. При устранении неисправности преобразователь выходит на рабочий режим без дополнительных действий.

2.3. Макетирование преобразователя

Макетный образец преобразователя выполнен в габаритах 145x40 мм для размещения до четырех таких преобразователей на двух сторонах существующего конструктива.

Полученный преобразователь имеет следующие характеристики:

- выходное напряжение 5 В;
- максимальный ток нагрузки 3,5 А;
- напряжение срабатывания защиты 5,5 В;
- ток короткого замыкания не более 6 А;
- напряжение питания 21–36 В;
- двойной размах пульсаций выходного напряжения 23–33 мВ;
- максимальное статическое отклонение выходного напряжения во всем диапазоне напряжений питания и нагрузок 7 мВ;
- максимальное динамическое отклонение 156 мВ со временем восстановления 170 мкс.

Управление в технических системах

На рис. 3–7 приведены осциллограммы выходных параметров ИВЭП.

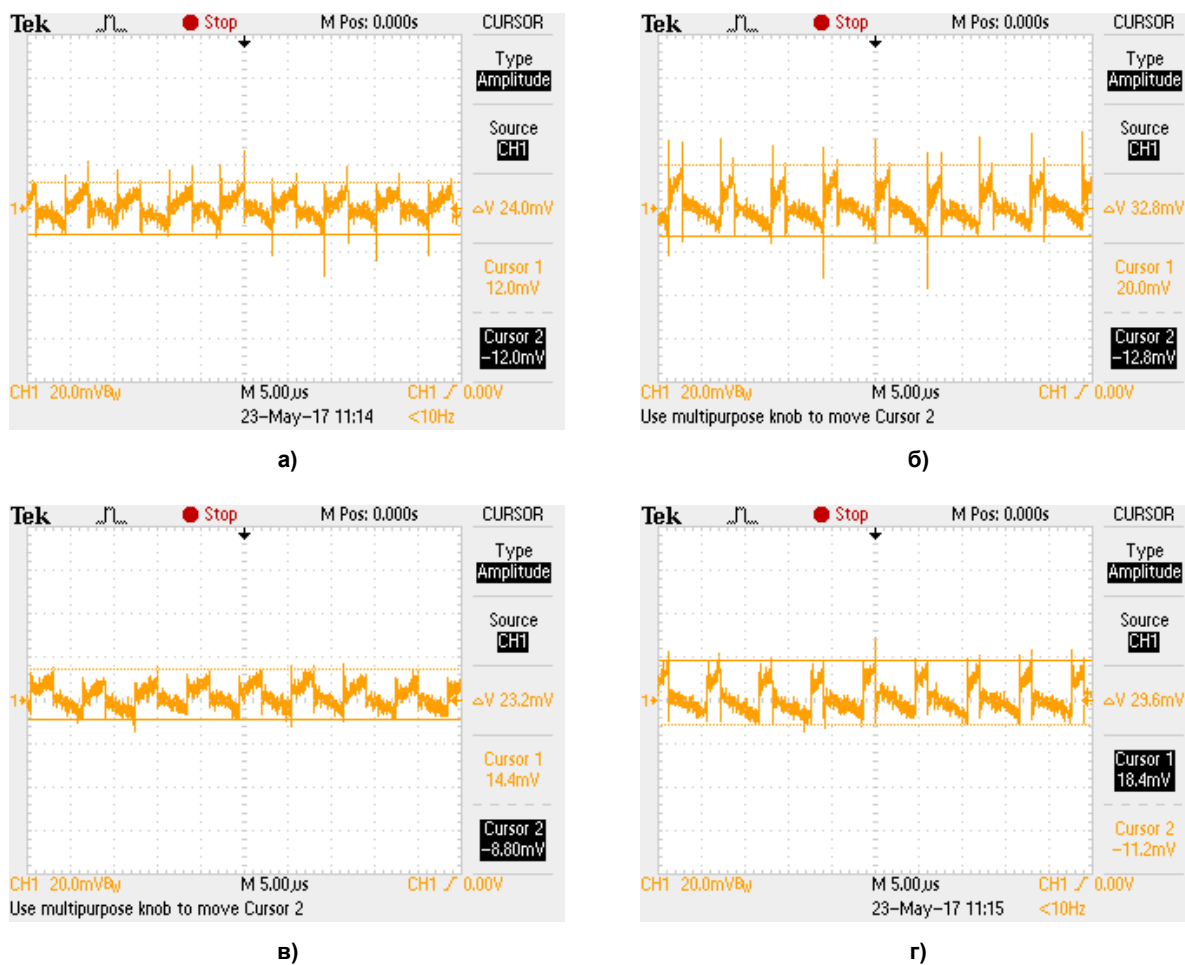


Рис. 3. Двойной размах пульсаций выходного напряжения: а – $I_H = 4 \text{ A}$, $U_{\text{штт}} = 21 \text{ В}$, $U_{\text{пульс}} = 24 \text{ мВ}$; б – $I_H = 4 \text{ A}$, $U_{\text{штт}} = 36 \text{ В}$, $U_{\text{пульс}} = 33 \text{ мВ}$; в – $I_H = 0$, $U_{\text{штт}} = 21 \text{ В}$, $U_{\text{пульс}} = 30 \text{ мВ}$; г – $I_H = 0$, $U_{\text{штт}} = 36 \text{ В}$, $U_{\text{пульс}} = 23 \text{ мВ}$

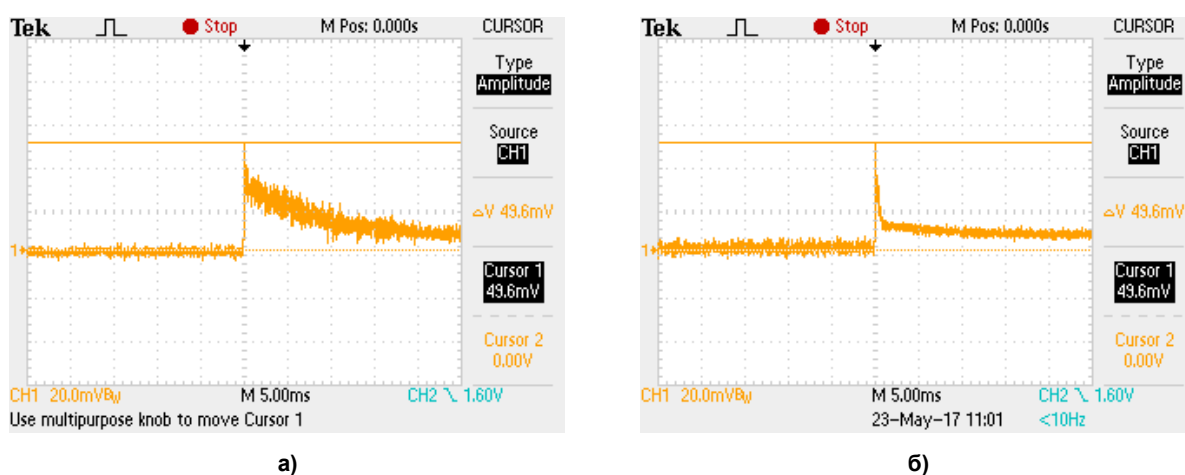


Рис. 4. Выброс выходного напряжения при резком изменении I_H от 4 А до 0:
а – $U_{\text{штт}} = 21 \text{ В}$, $\Delta U = 50 \text{ мВ}$; б – $U_{\text{штт}} = 36 \text{ В}$, $\Delta U = 50 \text{ мВ}$

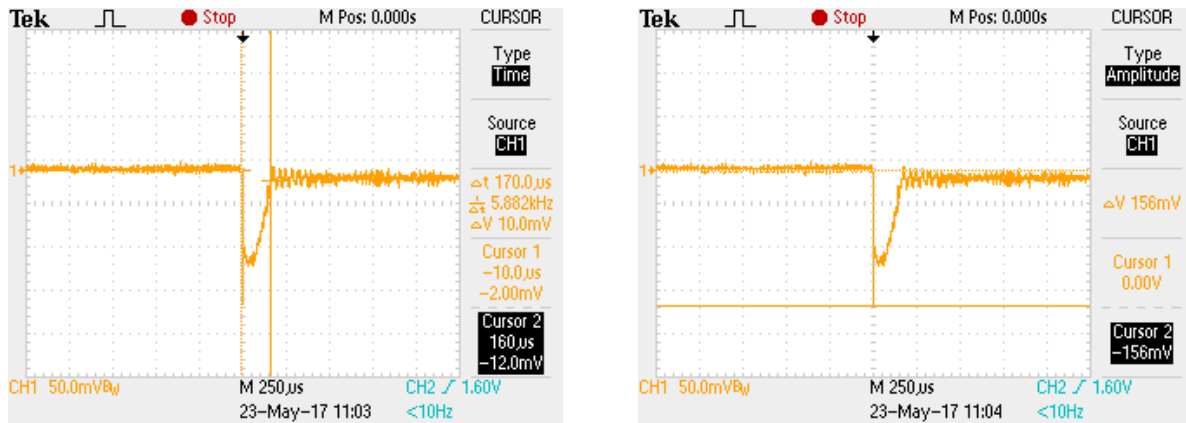
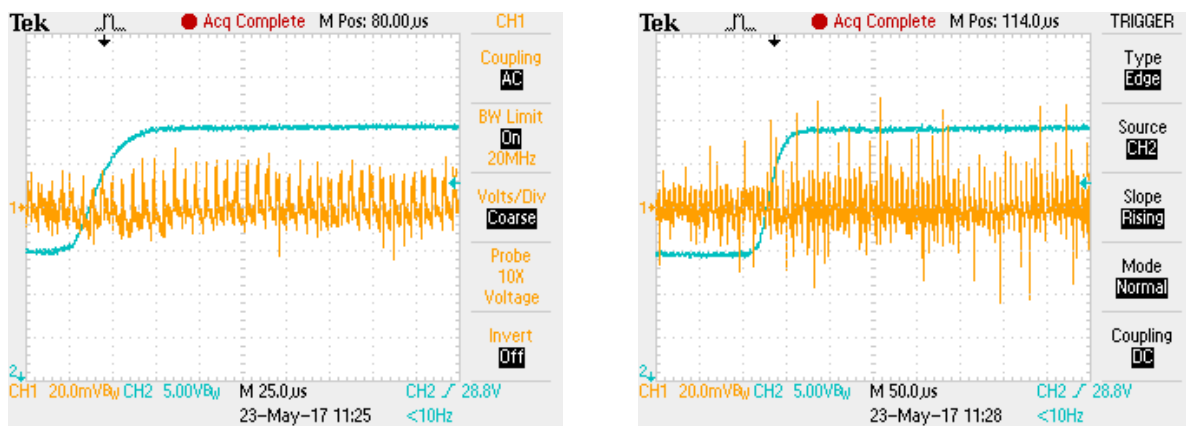


Рис. 5. Провал выходного напряжения при резком изменении I_n от 0 до 4 А: $\Delta U = 156$ мВ, $t_{\text{восст}} = 170$ мкс



а)

б)

Рис. 6. Выходное напряжение при изменении $U_{\text{пит}}$ от 21 В до 36 В: а – $I_n = 0$; б – $I_n = 4$ А.
Канал CH1 – выходное напряжение, канал CH2 – напряжение питания

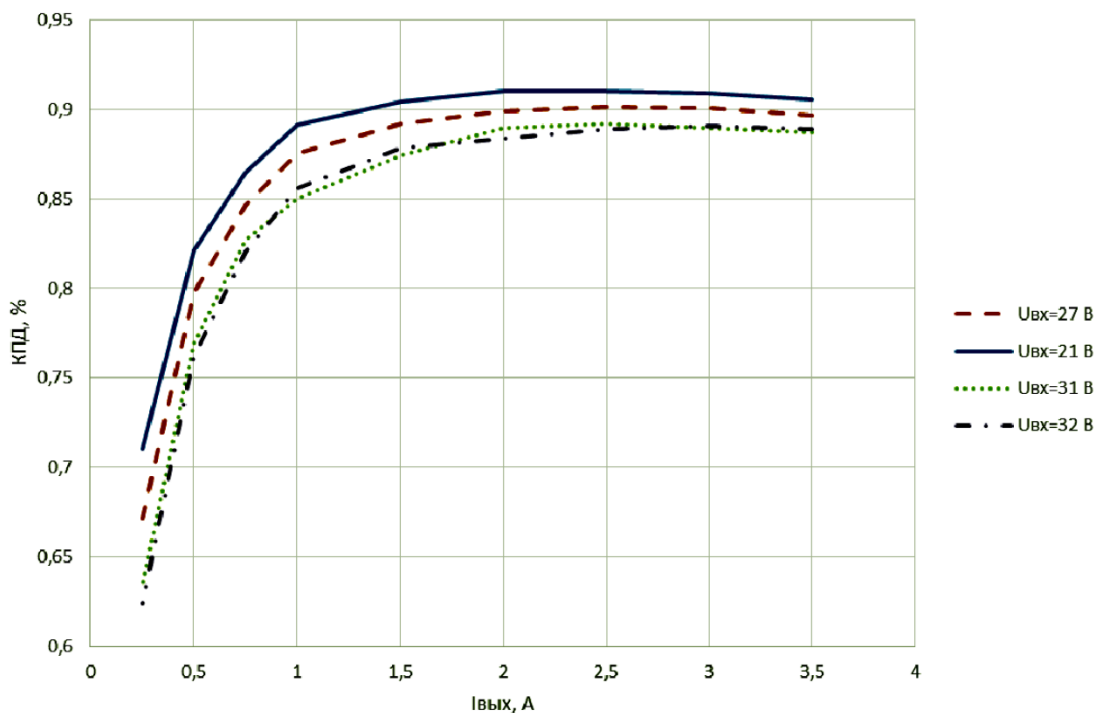


Рис. 7. Зависимости КПД преобразователя от тока нагрузки и напряжения питания

2.4. Цифровая телеметрия блока питания

Так как выходные номиналы блока питания становятся полностью независимыми друг от друга, старая схема телеметрии не может быть применена. Как уже отмечалось выше, блок питания должен обеспечивать от одного до четырех выходных напряжений. Поэтому в наихудшем случае необходимо отслеживать четыре независимых номинала.

Разработанная схема цифровой телеметрии построена на контроллере 1986BE1T. Контроллер отвечает за последовательный опрос максимум четырех номиналов и способен передавать информацию по различным интерфейсам: ГОСТ Р 52070, UART, SpaceWire, а также аналоговым сигналом (как в существующем варианте).

Выходное напряжение каждого ИВЭП нормируется на 3 В. Полученный сигнал, а также цепь «земли» поступают на оптоэлектронный ключ. Контроллер по очереди замыкает ключи, коммутируя сигнал одного из преобразователей на измерительную цепь (АЦП). Таким образом обеспечивается гальваническая изоляция преобразователей друг от друга.

Для функционирования всех передатчиков, усилителей и микроконтроллера имеется собственный ИВЭП на несколько выходных номиналов с гальванической развязкой от первичной сети.

Устройство спроектировано в виде самостоятельного модуля для повышения унификации и может использоваться также в других разработках.

Для размещения схемы цифровой телеметрии габаритные размеры ИВЭП входящих в блок были уменьшены до 93×45 мм за счет повышения плотности монтажа.

Планируемая организация блока питания показана на рис. 8.

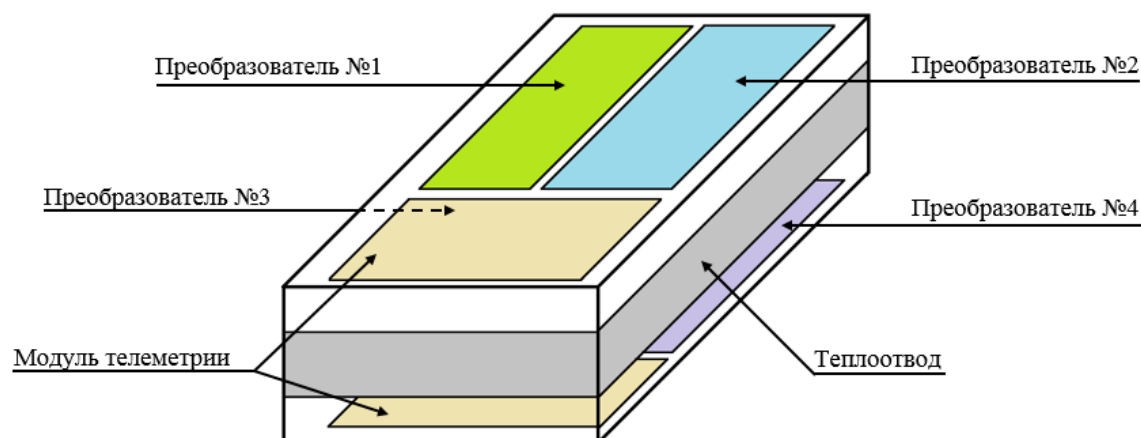


Рис. 8. Принцип построения модернизированного блока питания

Заключение

Выполнен анализ схмотехнических решений блоков питания, используемых в настоящее время в бортовой аппаратуре заказов серии «Союз».

Проанализированы пути модернизации данного источника питания для дальнейшего использования в современной аппаратуре ракетно-космической техники.

Конструктив «нового» преобразователя обеспечивает полную взаимозаменяемость с используемым источником питания. Каждый номинал выходного напряжения формируется и контролируется с помощью индивидуальной унифицированной схемы. Габаритные размеры такой схемы позволяют организовать до четырех независимых линий питания и возможность их телеметрии без изменения размеров блока. Преобразователь удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подобным устройствам для ракетно-космической отрасли.

Проведена экспериментальная отработка схмотехнических решений. За счет использования современной отечественной электронной компонентной базы, методик активного демпфирования и синхронного выпрямления полученный преобразователь является конкурентоспособным и обеспечивает актуальные выходные характеристики. ИВЭП реализован в виде унифицированного модуля с габаритными размерами 145×40 мм, также разработана более компактная схема с габаритными размерами 93×45 мм.

К достоинствам стоит также отнести малое количество используемых элементов и возможность сокращения массы радиатора за счет меньшего тепловыделения.

Разработана схема цифровой телеметрии блока питания, способная отслеживать до четырех независимых номиналов выходного напряжения. Оцифрованный сигнал далее может передаваться по различным интерфейсам: ГОСТ Р 52070, RS-485, SpaceWire, а также преобразовываться в нормированный аналоговый сигнал. Данная схема может быть также выполнена в виде самостоятельного модуля для повышения унификации и применяемости.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании импульсных источников вторичного электропитания для перспективных разработок.

Светлаков Владимир Александрович, начальник сектора 305.1, АО «НПО Автоматики им. академика Н.А. Семихатова»; svet_oz@mail.ru.

Пронькин Иван Геннадиевич, начальник группы, АО «НПО Автоматики им. академика Н.А. Семихатова»; untitled666@yandex.ru.

Бельков Алексей Михайлович, инженер-конструктор III категории, АО «НПО Автоматики им. академика Н.А. Семихатова»; alex199393@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 июня 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr180105

MODERNIZATION OF POWER CONVERTER FOR ONBOARD EQUIPMENTS OF “SOYUZ” CARRIER ROCKET

V.A. Svetlakov, svet_oz@mail.ru,
I.G. Pron'kin, untitled666@yandex.ru,
A.M. Bel'kov, alex199393@mail.ru

JSC “Scientific and Production Association of automatics named after academician
N.A. Semikhatov”, Ekaterinburg, Russian Federation

This paper describes the modernization of power supplies, which are used in onboard equipment of “Soyuz” carrier-rocket. The analysis of the used schematic solutions and the investigation of modernization possibilities are performed. The scheme of the new perspective power converter is developed and confirmed. The scheme of the digital telemetry of power supply is considered.

Keywords: electric power supply, space engineering, efficiency factor.

Received 27 June 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Светлаков, В.А. Модернизация источника вторичного электропитания для бортовой аппаратуры заказов серии «Союз» / В.А. Светлаков, И.Г. Пронькин, А.М. Бельков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 47–55. DOI: 10.14529/ctcr180105

FOR CITATION

Svetlakov V.A., Pron'kin I.G., Bel'kov A.M. Modernization of Power Converter for Onboard Equipments of “Soyuz” Carrier Rocket. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 47–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180105