

**РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ**

Научная статья

УДК 621.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185105>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PXLOUW>

**РАЗРАБОТКА МНОГОЦЕЛЕВОГО МОДУЛЬНОГО БЛОКА
ПИТАНИЯ ДЛЯ БОРТОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

Андрей Алексеевич Артюшин^{1✉}, Анастасия Сергеевна Кирюшкина²,

Данил Павлович Григорьев³, Кирилл Игоревич Сухачев⁴

^{1,2,3,4} Самарский университет, Самара, Россия

¹artyushin.aa@ssau.ru ✉

²kiryushkina.as@ssau.ru

³grigorev.dp@ssau.ru

⁴sukhachev.ki@ssau.ru

Аннотация. В данной статье предложена концепция многоцелевого модульного блока питания для бортовой космической аппаратуры на отечественной радиоэлектронно-стойкой компонентной базе. Предложенные методы построения улучшают характеристики блоков питания, по сравнению с использованием дискретных импульсных преобразователей. Предложенная система имеет возможности питания силовых нагрузок с обратной связью по току или напряжению, а также возможность питания от независимого аккумулятора. Использование в разработке готовых

функциональных модулей позволяют гибко изменять функционал системы, выбирая необходимые модули, под конкретные требования заказчика.

Ключевые слова: блок питания, КПД, бортовая аппаратура, источник питания, многофазный регулятор

Для цитирования: Артюшин А.А., Кирюшкина А.С., Григорьев Д.П., Сухачев К.И.

Разработка многоцелевого модульного блока питания для бортовой космической аппаратуры // Труды МАИ. 2025. №. 142. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=185105>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

DEVELOPMENT OF A MULTI-PURPOSE MODULAR POWER SUPPLY FOR ON-BOARD SPACE EQUIPMENT

Andrey A. Artyushin^{1✉}, Anastasia S. Kiryushkina², Danil P. Grigoriev³,

Kirill I. Sukhachev⁴

^{1,2,3,4}Samara University, Samara, Russia

¹artyushin.aa@ssau.ru ✉

²kiryushkina.as@ssau.ru

³grigorev.dp@ssau.ru

⁴sukhachev.ki@ssau.ru

Abstract. Space technology has always represented the pinnacle of scientific and technological progress and required developers to ensure not only advanced tactical and

technical characteristics of such equipment, but also the highest levels of reliability, resistance to external factors and safety.

In on-board space equipment (SPACECRAFT), both maintenance and scientific, there are specific requirements for power systems, such as:

- Galvanic isolation of all secondary power lines from the primary on-board power line;
- A large number of disconnected galvanically isolated secondary power lines;
- Differing, often significantly, voltage levels on disconnected power lines;
- Low level of interference generated in the primary power supply network and adjacent circuits;
- Low noise emission level;
- High EFFICIENCY;
- The presence of both power and low-current disconnected power lines;
- The ability to switch to autonomous power supply (from the battery), and without "drawdown" of voltage across all power lines;
- Using a radiation-resistant component base;
- Strict requirements on weight and size parameters;

Strict requirements for the thermal regime (due to the lack of natural heat, and sometimes the coolant of the gas phase of the external environment).

This article proposes the concept of a multi-purpose modular power supply for on-board space equipment that meets all the above-mentioned requirements for equipment of this class (on-board, space, scientific, special purpose, etc.).

Based on the proposed power system concept, a multi-purpose modular power supply unit for on-board space equipment was developed and tested. The block is "built" around one of the possible power bases (depending on the power), which is controlled by the universal "soft core" of the control system, the rest of the power system is formed from the modules described below based on the task:

- linear low-noise low-power stabilizers;
- Powerful pulse stabilizers;
- Especially powerful multiphase regulators;
- Self - contained power modules;
- Filtering module;
- Feedback modules (current or voltage);
- Low-speed operating system module with multiplexing.

Thus, it is proposed to use either a "designer" of packaged modules, which makes it possible to assemble any necessary power supply system on an OP battery with good characteristics, or the described universal system, implemented without the use of separate packaged modules, but with the same circuitry and having one common housing. In the first case, only the power transformer will be unique, but it can be mass-produced based on the requirements for output voltages and capacities, as well as the nomenclature of standard modules. In the second case, the system is custom-made and contains a unique set of printed circuit boards and a single housing, but it has better weight and size characteristics.

Keywords: power supply, efficiency, on-board equipment, power supply, multiphase regulator

For citation: Artyushin A.A., Kiryushkin A.S., Grigoriev D.P., Sukhachev K.I.
Development of a multi-purpose modular power supply for on-board space equipment.
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.). URL:
<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185105>

ВВЕДЕНИЕ

Космическая техника всегда олицетворяла собой вершину научно-технического прогресса и требовала от разработчиков обеспечения не только передовых тактико-технических характеристик такого оборудования, но и высочайших показателей надежности, стойкости к внешним факторам, безопасности и т.д. В наше время космическая техника является отражением научно-технического прогресса государства. Прогресс строится на успехах в областях разработки компонентной базы (ЭКБ), схемотехнического и конструкторского проектирования, реализованных на отечественной элементной базе.

В бортовой космической аппаратуре (КА), как обслуживающей, так и научной, существуют специфические требования к системам питания, такие как [1-3]:

- Гальваническая развязка всех вторичных линий питания от первичной бортовой линии питания;
- Большое количество разобъённых гальванически развязанных линий вторичного питания;
- Отличающиеся, зачастую существенно, уровни напряжения на разобъённых линиях питания;

- Низкий уровень помех, генерируемых в первичную сеть питания и смежные цепи;
- Низкий уровень помехоэмиссии;
- Высокий КПД;
- Наличие как силовых, так и слаботочных разобобщенных линий питания;
- Возможность перехода на автономное питание (от аккумулятора), причем без «просадки» напряжения по всем линиям питания;
- Использование отечественной компонентой базы категорий ОСМ и ВП;
- Использование радиационно-стойкой компонентной базы;
- Жесткие требования по массогабаритным параметрам;
- Жесткие требования по тепловому режиму (за счет отсутствия естественной конвенции, а иногда и теплоносителя газовой фазы внешней среды).

В данной статье предложена концепция многоцелевого модульного блока питания для бортовой космической аппаратуры, удовлетворяющей всем вышеназванным требованиям, предъявляемым к аппаратуре такого класса (бортовой, космической, научной, специального назначения и т.д.). Классическим исполнением системы питания КА [1-4] является использование множества дискретных источников вторичного электропитания (ИВЭП), однако такой подход имеет ряд существенных недостатков, таких как:

- Низкий КПД из-за необходимости отдельной стабилизации посредством ШИМ каждой линии питания. Зачастую такой подход не удобен в случае, если

требуется только гальваническая развязка без высокой стабильности выходного напряжения (линии питания обмоток реле, вентиляторы, индикаторы и т.д.).

— Неактуальные схемотехнические подходы, продиктованные использованием устаревшей ЭКБ ОП и/или специальной стойкой к СВВФ ЭКБ, без использования таких избыточных, на первый взгляд, инструментов, как МК или ПЛИС в качестве основы интеллектуальной системы управления.

— Существенный уровень генерации помех, как по линиям питания, так и в окружающее пространство по той причине, что каждый ИВЭП работает на своей частоте, со своим уровнем заполнения и имеет свои особенности как в конструкции, так и в схемотехнике, что порождает появление дополнительных ВЧ гармоник в генерируемых помехах.

— Низкие показатели массогабаритных характеристик, так как каждый отдельный ИВЭП содержит цепи и элементы, которые могли бы быть общими для всех каналов, в случае если отойти от дискретного подхода к формированию множества разобщенных линий вторичного электропитания.

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемая в данной статье система построена в современной концепции источников вторичного электропитания, применяемой в БП формата АТХ стандарта gold – titanium, а именно – по принципу двухступенчатого преобразования [5-10]. Первая ступень – многоканальный двухтактный инвертор с трансформаторной развязкой, работающий на максимально возможной частоте и с заполнением ШИМ (для целевой ЭКБ). Он выполняет следующие функции:

— Гальваническая развязка от первичных цепей питания без групповой стабилизации, т.е. все промежуточные разобщенные линии имеют напряжение более высокое, чем необходимое для корректной стабилизации во вторичных цепях;

— Инверторы вторичных (промежуточных) цепей выполняют функцию синхронного выпрямителя со средней точкой, что существенно повышает КПД по сравнению с классическими выпрямителями на диодах, в том числе диодах Шоттки;

— Инверторы вторичных цепей обеспечивают возможность двунаправленного протекания энергии, как из первичных цепей в нагрузку, так и наоборот, что дает возможность перехода на автономное аккумуляторное питание, без паузы на переключение и «просадки» напряжения на линиях потребителей, если к одному из таких инверторов в качестве нагрузки подключить АКБ через схему разделения токов заряда и разряда АКБ;

— Обеспечение функций защиты от превышения тока как через инвертор первичных цепей, так и инвертор со стороны аккумулятора;

— Обеспечение функции плавного запуска как при первом включении, так и при повторных стартах после аварийного превышения тока;

— Возможность незначительной подстройки промежуточных напряжений (мощности, передаваемой в промежуточные цепи).

Принципиальная схема первой ступени описываемой бортовой системы питания показана на рисунке 1. Здесь показаны только инвертор первичного питания и синхронный выпрямитель-инвертор вторичного питания, который может быть использован, например, для подключения к АКБ. Силовой трансформатор Т1 –

показан условно, так как может иметь множество разобщенных каналов вторичного электропитания.

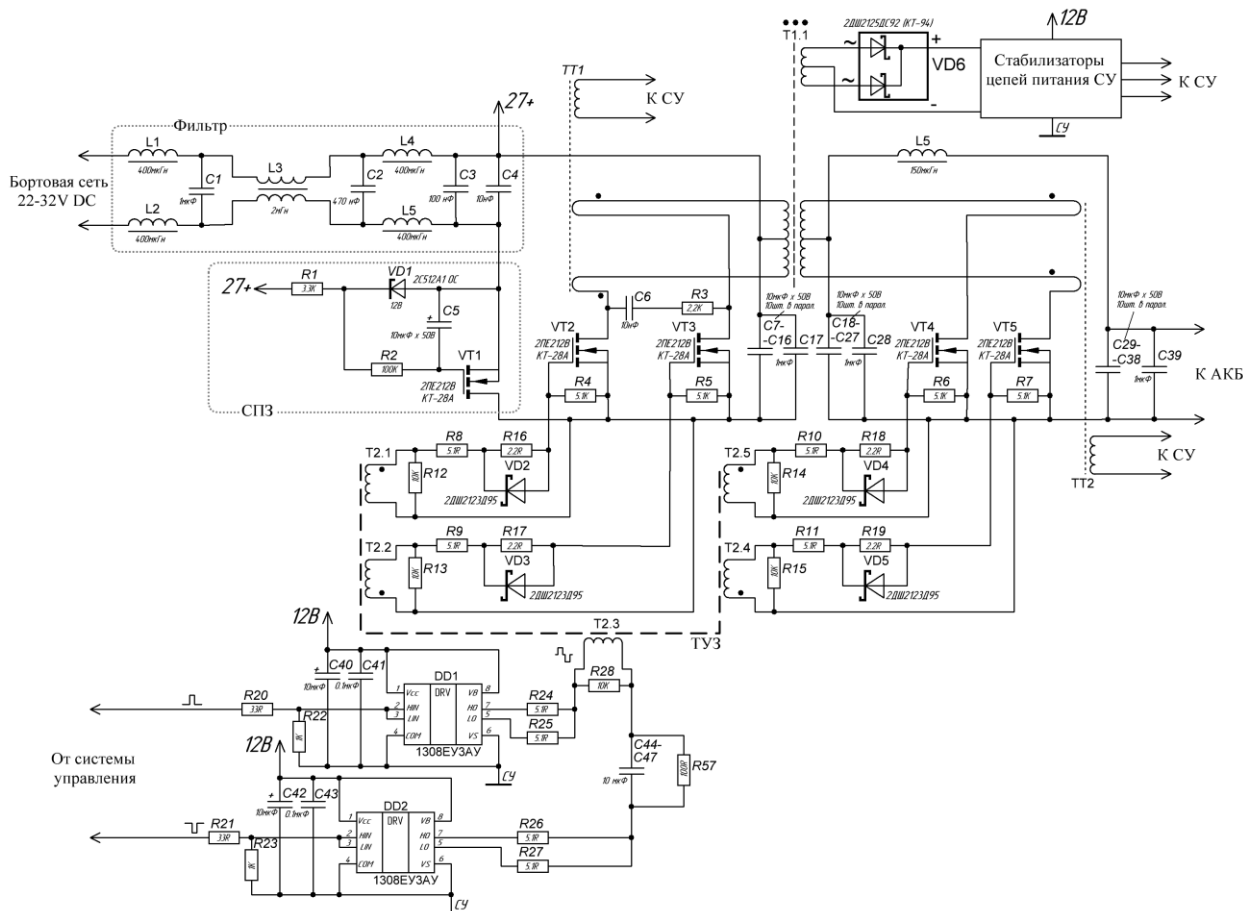


Рисунок 1 – Принципиальная схема инвертора и инвертора-выпрямителя первой ступени бортовой системы питания

Схема на рис. 1 имеет входной фильтр, систему плавного запуска (СПЗ) на компонентах VT1, C5, R2, необходимую для уменьшения бросков тока в цепях первичного питания КА, и двунаправленный двухтактный инвертор-выпрямитель на транзисторах VT2 – VT5 с обвязкой и схемой управления на драйверах DD1, DD2 и трансформаторе управления затворами T2 (TY3). Силовой трансформатор T1 может содержать множество изолированных обмоток как со средней точкой, так и без, исходя из потребностей целевой аппаратуры. Для питания нагрузок большой мощности в

описываемой бортовой системе применяются синхронные выпрямители по схеме, показанной на рисунке 2.

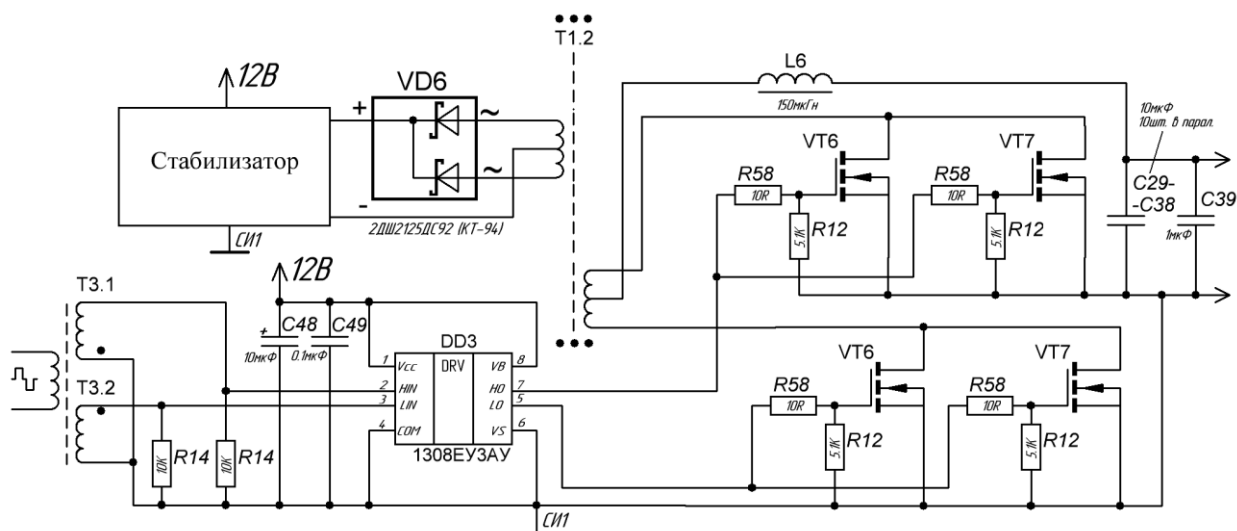


Рисунок 2 – Принципиальная схема двухтактного синхронного выпрямителя бортовой системы питания

Конечная стабилизация напряжения индивидуальна для каждого разобщенного канала питания и достигается разными методами в зависимости от типа потребителя. Для питания слаботочных цепей, требующих минимального уровня шума (помех) по цепям питания (аналоговые цепи, ОУ, АЦП, компараторы и т.д.), используются линейные стабилизаторы, например, на базе микросхем серии 1303ЕН на необходимое напряжение; если требуется напряжение отличное от существующей линейки, используется параметрический стабилизатор в цепи опорного контакта микросхем (рис. 3). Двухполярное питание, которое необходимо для большинства аналоговых схем, легко получить с помощью гальванически развязанных каналов промежуточных цепей, как показано на схеме рисунка 3.

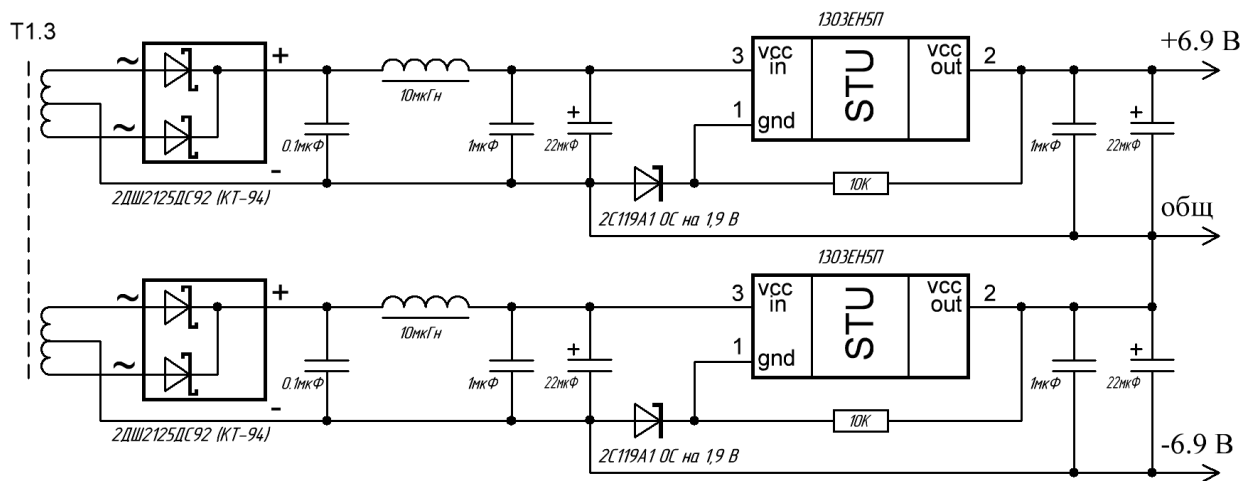


Рисунок 3 – Принципиальная схема двухполярного источника питания аналоговых цепей бортовой электроники

Для питания нагрузки, которая является относительно мощной или стойкой к дополнительным шумам по цепям питания (цифровые высокочастотные схемы: МК, ПЛИС, дискретная логика, драйверы, передатчики и т.д.) используются импульсные высокочастотные стабилизаторы, например, микросхемы серии 1326ПН2Т или их аналоги. Данные стабилизаторы обладают высоким КПД и используются там, где нет требований к гальванической развязке, например, в описываемой системе, так как её обеспечивает первичный инвертор.

Для питания мощных и высокотоковых нагрузок были использованы многофазные регуляторы, которые по своей схемотехнике по большей части повторяют предыдущий интегральный вариант, но выполнены с использованием дискретных полумостовых фаз с внешним многофазным управлением. Динамическое активное количество фаз, гибкая частота преобразования и подстраиваемые под нагрузку алгоритмы управления в сочетании с высокоскоростной оцифровкой для цепей обратной связи делают данный вариант оптимальным для «требовательных»

потребителей (мощных лазерных модулей, мощных высокопроизводительных процессоров, DSP, ПЛИС, модули Пельтье и т.д.) [11-13], схема такого многофазного регулятора показана на рисунке 4.

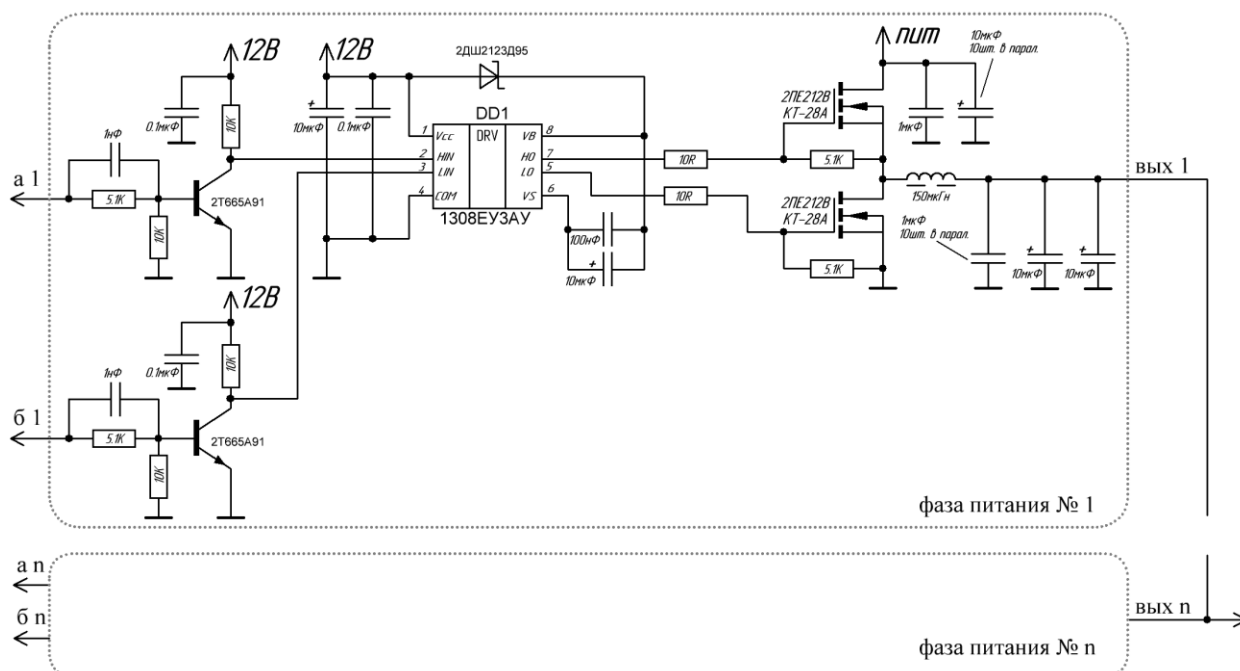


Рисунок 4 – Принципиальная схема многофазного регулятора для системы питания бортовой аппаратуры

Для управления описываемой системы не существует готовых стандартных ИМС, поэтому необходимо использование универсальных МК или ПЛИС (последние предпочтительнее из-за специфики работы в «реальном времени», что позволяет реализовывать менее инертные регуляторы, и системы защиты с «мгновенной реакцией» на внешние сигналы, на пример на критическое превышение тока). Особенностью системы является то, что для управления ей потребуется относительно немного ресурсов таких ИМС (памяти, аппаратного времени, вводов-выводов и логических вентилей), поэтому функции управления системой питания можно возложить на уже существующий в аппаратуре микроконтроллер (МК) или ПЛИС.

Однако если система питания сложная – содержит и линии автономного питания, и синхронные выпрямители, и множество многофазных регуляторов, а также требует высокоточного, высокоскоростного управления и быстрой ОС, то целесообразно рассмотреть вариант с выделенной ИМС под задачи управления системой питания. Требование по использованию радиационно-стойкой ЭКБ ОП категории качества не ниже ВП существенно снижает номенклатуру доступных ИМС. Предлагаются следующие варианты: 5576XC6T, 5576XC7T, 5578TC034. Последние две ИМС являются «избыточными» с точки зрения характеристик, и их стоит рассматривать только в случае, когда управление системой питания является не основной (не самой сложной и ресурсоемкой) задачей из тех что выполняют данные ИМС.

Упрощенная структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке

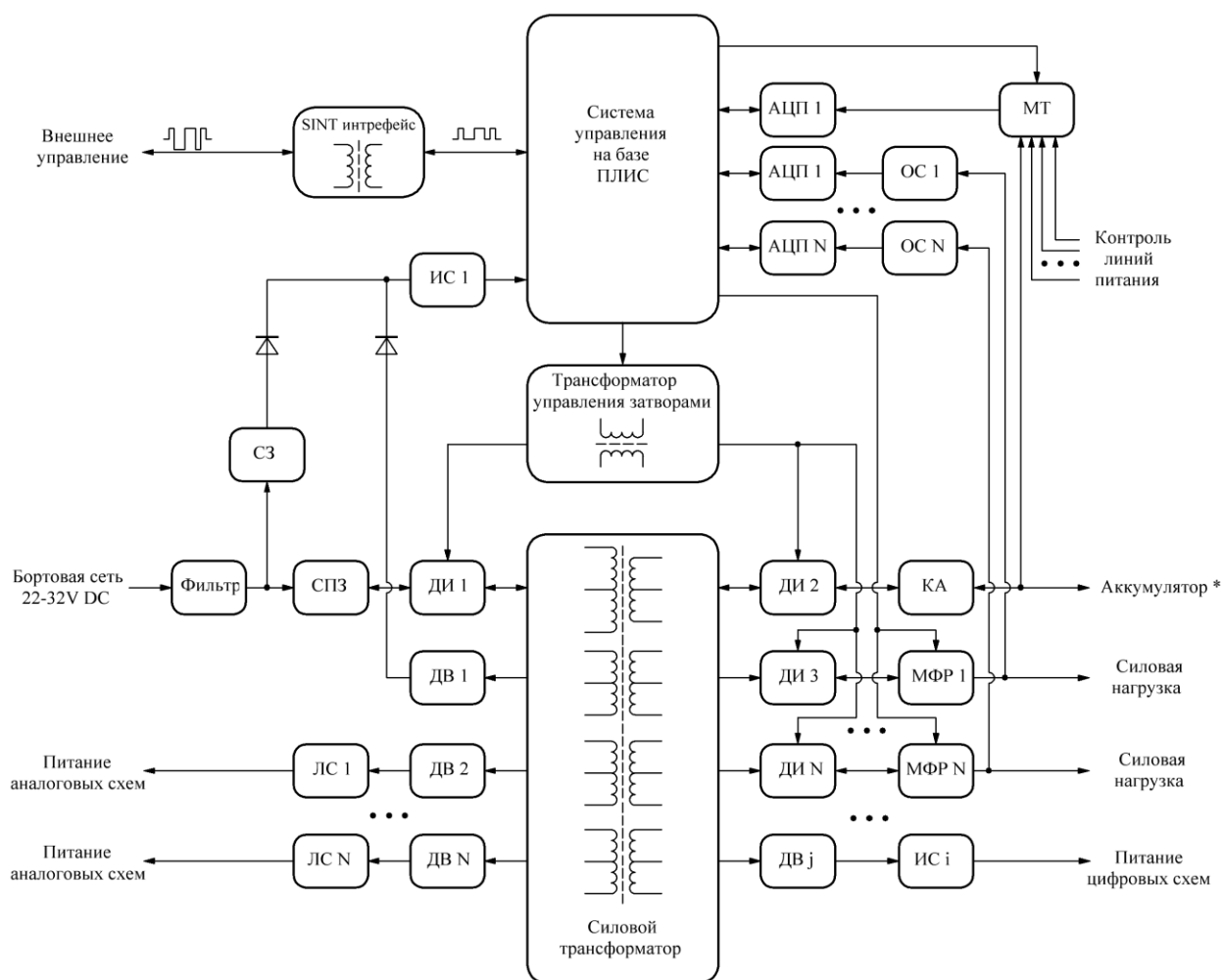


Рисунок 5 – Структурная схема бортовой системы питания

На рисунке 5 введены следующие обозначения:

- СЗ – система запуска, автогенераторный источник дает необходимые напряжения для системы управления. СЗ работает непродолжительное время, потом отключается. Схема СЗ показана на рисунке 6;
- СПЗ – система плавного запуска. СПЗ позволяет без «скачков» тока зарядить фильтрующие конденсаторы по первичному питанию;
- ДИ – двухтактный инвертор, позволяющий также выполнять функции синхронного выпрямителя при соответствующих условиях;

- КА – контроллер аккумулятора, нужен для отслеживания корректной работы режимов заряда и разряда АКБ;
- МФР – многофазный понижающий регулятор;
- ДВ – диодный выпрямитель;
- ЛС – линейный стабилизатор;
- ИС – импульсный стабилизатор.

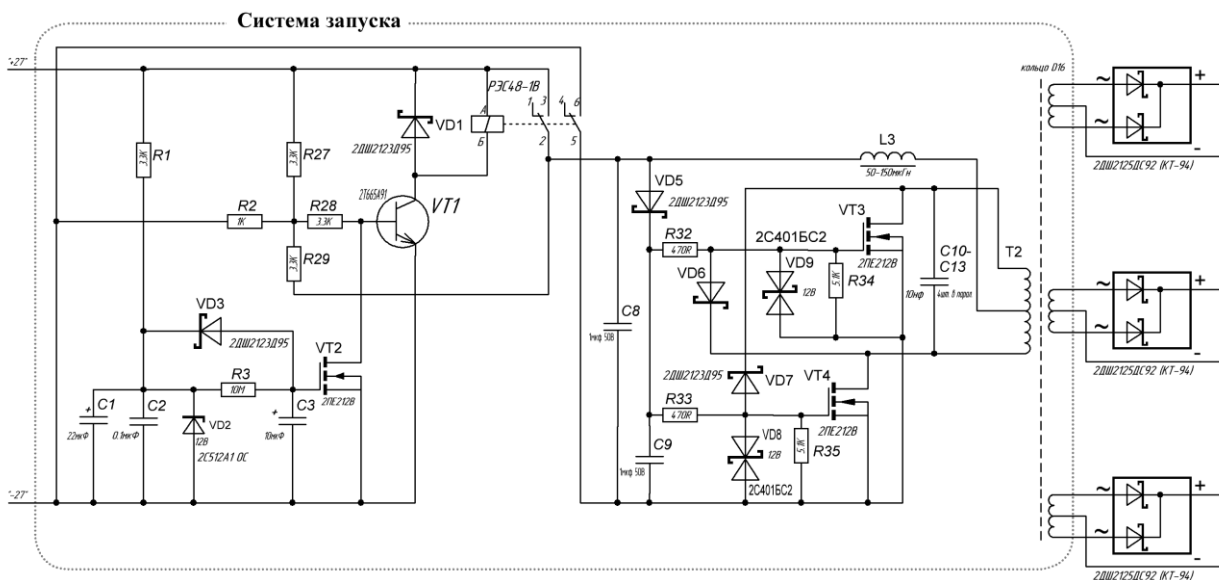


Рисунок 6 – Принципиальная схема системы запуска

Опытный образец (некоторые детали замещены полными импортными аналогами) системы питания со структурой, показанной на рисунке 5, представлен на рисунках 7 и 8. Он был разработан, собран и испытан для целевой космической научной аппаратуры (НА). Данный вариант обладает суммарной мощностью по всем каналам более 500 Вт, количество внешних гальванически разобобщенных каналов питания - 22, три из которых рассчитаны на мощность свыше 100 Вт каждый, остальные на меньшую [15-17]. Система управления питанием реализована на базе

ПЛИС (рисунок 8), которая помимо блока питания контролирует и другие функции НА, поэтому была вынесена на отдельную плату.

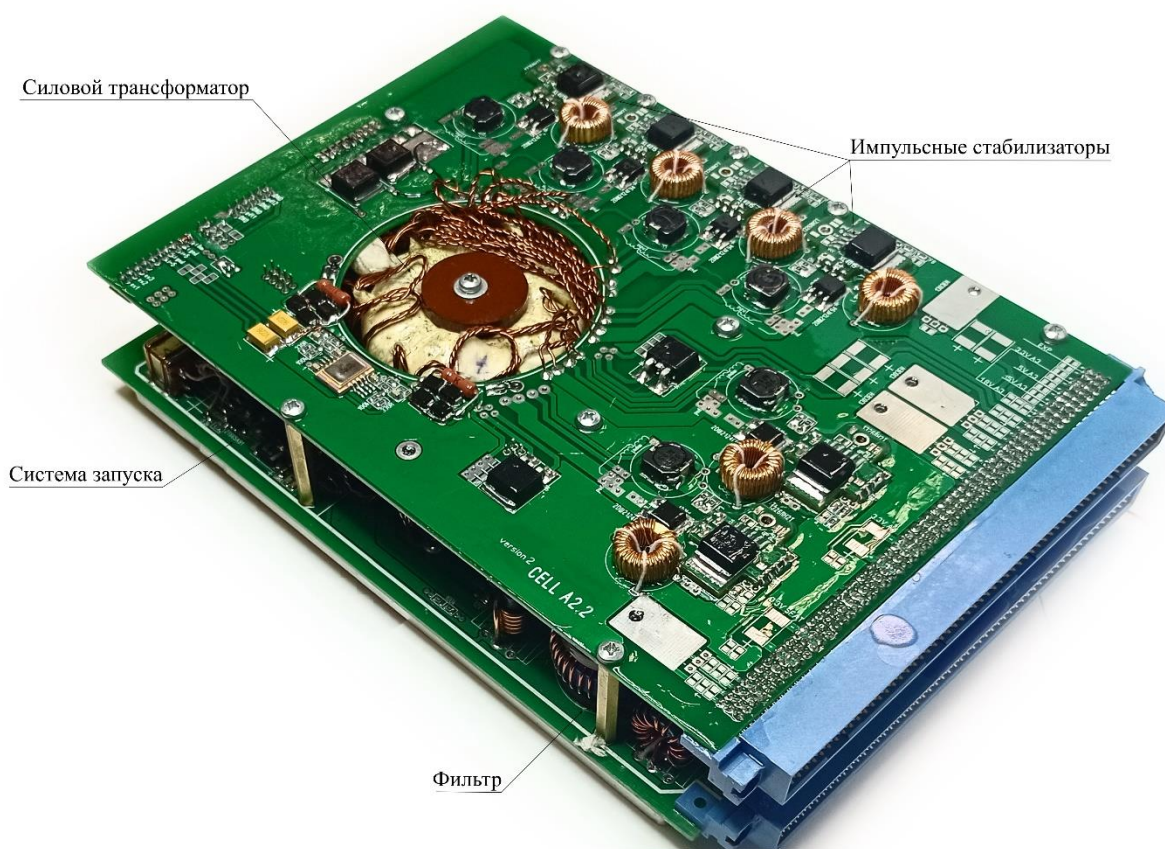


Рисунок 7 – Опытный образец модуля первичного преобразователя, синхронных выпрямителей и разобщенных слаботочных линий питания

Система питания рассчитана на работу как от внешних цепей питания, так и от аккумулятора.

На плате системы управления (СУ) (рис.8) также расположены два трехфазных регулятора на токи до 20 А каждый и скоростной обратной связью по току нагрузки. В качестве ИМС использованы АЦП 5023НВ015, ОУ 1467УД1Т и триггеры 5514БЦ2Т1-14.

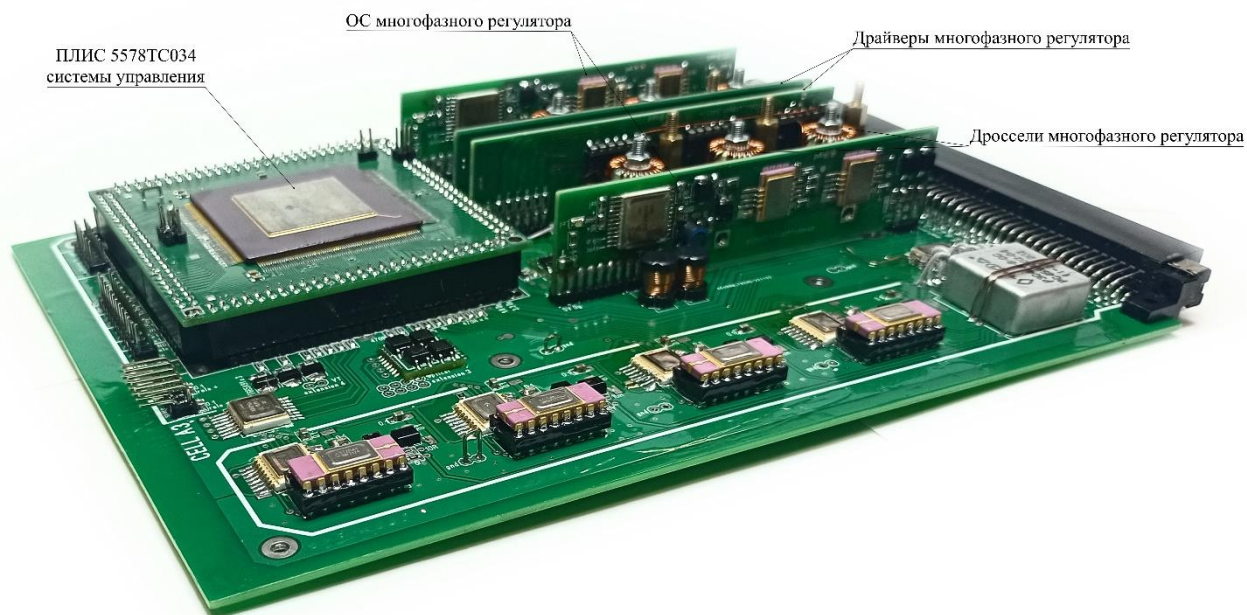


Рисунок 8 – Многоцелевая плата, одна из функций которой - управление системой питания, содержащая два трехфазных понижающих регулятора

Система управления построена на базе однократно программируемой ПЛИС серии 5578ТС034. Для это были разработаны специальные HDL-модули, такие как:

- Контроллер ШИМ управления, необходимый для генерации управляющих импульсов на инверторы и синхронные выпрямители первой ступени преобразования. Контроллер реализует функции управления, защиты от превышения по току и плавный запуск инверторов;
- Контроллер многофазного регулятора для управления фазами МФР по сигналам ОС и целевому значению (в данном случае тока) с функцией нелинейной стабилизации [18,19];
- Модуль, обеспечивающий взаимодействие с АЦП 5023НВ015, производящий фильтрацию и усреднение данных в реальном времени.

- В качестве системы связи взята концепция IL-net [7-8], а также приемников и передатчиков SINT интерфейса [9].
- Различные служебные модули, например, мультиплексированного опроса в рамках супервизора линий вторичного питания.

Для реализации других функций, не связанных с системой управления питанием, для данной ИМС было использовано «софт-ядро» [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе предложенной концепции системы питания был разработан и испытан многоцелевой модульный блок питания для бортовой космической аппаратуры. Блок «строится» вокруг одной из возможных силовых основ (в зависимости от мощности), которую контролирует универсальное «софт-ядро» системы управления, остальная часть системы питания формируется из нижеописанных модулей исходя из задания [20]:

- линейные малощумящие маломощные стабилизаторы;
- импульсные мощные стабилизаторы;
- особо мощные многофазные регуляторы;
- модули автономного питания;
- модуль фильтрации;
- модули обратной связи (по току или напряжению);
- модуль низкоскоростной ОС с мультиплексированием.

Таким образом, предлагается использование либо «конструктора» из корпусированных модулей, позволяющего собрать любую необходимую систему питания на ЭКБ ОП, обладающего хорошими характеристиками, либо описанной универсальной системы, реализуемой без применения отдельных корпусированных модулей, но с такой же схмотехникой и имеющей один общий корпус [21]. В первом случае уникальным будет только силовой трансформатор, однако его можно производить серийно, исходя из требований по выходным напряжениям и мощностям, а также номенклатуры стандартных модулей. Во втором случае система является заказной и содержит уникальный набор печатных плат и единый корпус, однако обладает лучшими массогабаритными характеристиками.

Список источников

1. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2 кн. - М.: Техносфера, 2015. Кн. 1 - 696 с.
2. Афанасьев А.А. Проблемы при проектировании радиационно-стойких ИВЭП для систем электропитания космической аппаратуры // Решетневские чтения. 2018. Т. 1, С. 306-308.
3. Краснов М., Лукьянов Е., Авсюкевич Д., Надоров И. Специализированные источники вторичного электропитания для космической промышленности // Силовая электроника. 2023. № 3 (101). С. 41-43.
4. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х кн. - М.: Техносфера, 2015. Кн. 2. – 488 с.

5. Рентюк В. Импульсные блоки питания универсального применения серий LM/LMF и LI/LIF компании MORNSUN // Компоненты и технологии. 2021. № 10 (243). С. 41-49.
6. Ланцов В., Эраносян С. Эволюция импульсных источников питания: от прошлого к будущему // Силовая электроника. 2008. № 18. С. 26-31.
7. Воронов К.Е., Сухачев К.И., Шестаков Д.А., Артюшин А.А. Реализация отказоустойчивой межкристальной связи в системах космической научной аппаратуры, на базе нескольких программируемых логических интегральных схем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9, № 3. С. 57-64. DOI: [10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.57.64](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.57.64)
8. Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А. и др. Разработка кольцевой полудуплексной сети для обмена данными между устройствами в научной космической аппаратуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 34-45. DOI: [12.21667/1995-4565-2023-84-34-45](https://doi.org/12.21667/1995-4565-2023-84-34-45)
9. Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Артюшин А.А., Шестаков Д.А. Синтезируемый в базисе ПЛИС комплект модулей, реализующих сетевой протокол связи IL NET. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619915 РФ, 17.05.2023
10. Сухачев К.И., Воронов К.Е., Дорофеев А.С. и др. Разработка высокопроизводительной вычислительной системы на базе IP-ядра для космической научной аппаратуры // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 4. С. 88-106. DOI: [10.18358/np-32-4-i88106](https://doi.org/10.18358/np-32-4-i88106)

11. Куксенко С.П. Моделирование помехозащищенной сети электропитания космического аппарата // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104271>
12. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н. и др. Модель процесса оценки электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165541>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-27](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-27)
13. Лазеев А.С., Литовка Ю.В. Алгоритм преобразования полигональных моделей для упрощения расчета гальванических процессов // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170353>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-24)
14. Брехов О.М., Ратников М.О. Сравнительный анализ тестовых систем ПЛИС и их окружения // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168194>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-22)
15. Гуревич О.С., Кессельман М.Г., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81143>
16. Амирханов А.А., Гайнутдинов Р.Р. Прогнозирование перекрестных помех в кабельных линиях связи летательных аппаратов на основе искусственной нейронной сети // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183471>
17. Синь М., Е Ч., Цинь Х., Дэн Ч., Пэй М., Чжоу А., Сюй Ф. Разработка системы мониторинга силовых агрегатов беспилотных летательных аппаратов в режиме реального времени/ // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181893>

18. Тарасов Д.Ю., Сухомлинов Г.Л., Михайлов В.В. Численное моделирование регулируемых посредством цифровой обратной связи понижающих импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179695>
19. Тарасов Д.Ю., Сухомлинов Г.Л., Михайлов В.В. Численное моделирование переходных и установившихся режимов в работе импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178478>
20. Артюшин А.А., Кирюшкина А.С., Григорьев Д.П. Разработка многоцелевого модульного блока питания для бортовой космической аппаратуры // XVI Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 18-22 ноября 2024): сборник аннотаций. - М.: Изд-во Перо, 2024. С. 72-73.
21. Быков А.П., Пиганов М.Н. Прогнозирование показателей качества бортовых радиоэлектронных устройств // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=121012>

References

1. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika* (Space electronics). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2015. Kn. 1. 696 p.
2. Afanas'ev A.A. Problems in the design of radiation-resistant power supply systems for space equipment. *Reshetnevskie chteniya*. 2018. V. 1, P. 306-308. (In Russ.)

3. Krasnov M., Luk'yanov E., Avsyukevich D., Nadorov I. Specialized secondary power supply sources for the space industry. *Silovaya elektronika*. 2023. No. 3 (101). P. 41-43. (In Russ.)
4. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika* (Space electronics). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2015. Kn. 2. 488 p.
5. Rentyuk V. Switching power supplies for universal use of the LM/LF and LI/LIF series from MORNSUN. *Komponenty i tekhnologii*. 2021. No. 10 (243). P. 41-49. (In Russ.)
6. Lantsov V., Eranosyan S. Evolution of switching power supplies: from the past to the future. *Silovaya elektronika*. 2008. No. 18. P. 26-31. (In Russ.)
7. Voronov K.E., Sukhachev K.I., Shestakov D.A., Artyushin A.A. Implementation of fault-tolerant intercrystalline communication in space scientific equipment systems based on several programmable logic integrated circuits. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 2022. V. 9, No. 3. P. 57-64. (In Russ.). DOI: [10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.57.64](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.57.64)
8. Sukhachev K.I., Grigor'ev D.P., Shestakov D.A. et al. Development of a half-duplex ring network for data exchange between devices in scientific space equipment. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023. No. 84. P. 34-45. (In Russ.). DOI: [12.21667/1995-4565-2023-84-34-45](https://doi.org/12.21667/1995-4565-2023-84-34-45)
9. Sukhachev K.I., Grigor'ev D.P., Artyushin A.A., Shestakov D.A. A set of modules synthesized in the FPGA base implementing the IL NET. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023619915 RF*, 17.05.2023 (In Russ.)

10. Sukhachev K.I., Voronov K.E., Dorofeev A.S. et al. Development of a high-performance computing system based on an IP core for space scientific equipment. *Nauchnoe priborostroenie*. 2022. V. 32, No. 4. P. 88-106. (In Russ.). DOI: [10.18358/np-32-4-i88106](https://doi.org/10.18358/np-32-4-i88106)
11. Kuksenko S.P. Simulation of a spacecraft noise immune power network. *Trudy MAI*. 2019. No. 105. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104271>
12. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N. et al. Model of the process of assessing the electromagnetic compatibility of the onboard equipment of the aircraft. *Trudy MAI*. 2022. No. 123. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165541>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-27](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-27)
13. Lazeev A.S., Litovka Yu.V. The algorithm of transformation of polygonal models to simplify the calculation of galvanic processes. *Trudy MAI*. 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170353>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-24](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-24)
14. Brekhov O.M., Ratnikov M.O. Comparative analysis of test systems for FPGAS and their environment. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168194>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-22)
15. Gurevich O.S., Kessel'man M.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. State-of-the-art wireless technologies: problems of application onboard an aircraft. *Trudy MAI*. 2017. No. 94. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81143>
16. Amirkhanov A.A., Gainutdinov R.R. Prediction of crosstalk in aircraft cable communication lines using artificial intelligence technologies. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183471>

17. Sin' M., E Ch., Tsin' Kh., Den Ch., Pei M., Chzhou A., Syui F. Design of Real-time inspection System for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Power Assemblies. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181893>
18. Tarasov D.Yu., Sukhomlinov G.L., Mikhailov V.V. Numerical modeling of step-down pulse dc-dc voltage converters regulated by digital feedback. *Trudy MAI*. 2024. No. 135. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179695>
19. Tarasov D.Yu., Sukhomlinov G.L., Mikhailov V.V. Numerical modeling of transient and steady-state modes in the operation of pulsed DC-DC voltage converters. *Trudy MAI*. 2024. No. 134. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178478>
20. Artyushin A.A., Kiryushkina A.S., Grigor'ev D.P. Development of a multipurpose modular power supply unit for onboard space equipment. *XVI Vserossiiskii mezhotraslevoi molodezhnyi konkurs nauchno-tekhnicheskikh rabot i proektov «Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavтики»*: sbornik annotatsii. Moscow: Izd-vo Pero, 2024. P. 72-73.
21. Bykov A.P., Piganov M.N. Quality indices prediction of onboard radio-electronic devices. *Trudy MAI*. 2021. No. 116. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121012>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-05)

Статья поступила в редакцию 15.03.2025

Одобрена после рецензирования 20.03.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 15.03.2025; approved after reviewing on 20.03.2025; accepted for publication on 25.06.2025