

УДК 629.78:621.38 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.77.90

Разработка интеллектуальной системы коммутации питания научной аппаратуры автоматических космических миссий

Д. Н. Глазкин, *glazkin@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

Н. С. Дятлов, *nsdiatlov@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

К. В. Ануфрейчик, *kos@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

И. В. Чулков, *chulkov@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

Д. Г. Тимонин, *timonin@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

К. И. Титов, *kitit@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

А. С. Буторкин, *butorkin@iki.rssi.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Системы коммутации питания полезной нагрузки с функцией защиты от перегрузки по току широко применяются в космических аппаратах. Отключение нагрузки в случае превышения током потребления определенного порога позволяет парировать нештатные ситуации и предотвращать распространение отказа на другие приборы и системы аппарата.

Сформулированы требования к характеристикам, которыми должна обладать интеллектуальная система коммутации питания научной аппаратуры космического аппарата. Предложена схемотехническая реализация системы на основе программируемой аналоговой интегральной схемы и других современных отечественных электрорадиоизделий специального назначения. Приведены особенности применения программируемой аналоговой интегральной схемы и описана электрическая схема, реализованная в прошивке. Представлены характеристики разработанного решения, полученные в результате отладки на макете.

Ключевые слова: научная аппаратура космического аппарата, система коммутации питания, защита от перегрузки по току, программируемая аналоговая интегральная схема, МОП-транзистор, радиационная стойкость

Intelligent Power Distribution System Design for Scientific Uncrewed Space Missions

D. N. Glazkin, *glazkin@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

N. S. Diatlov, *nsdiatlov@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

K. V. Anufreichik, *kos@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

I. V. Chulkov, *chulkov@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

D. G. Timonin, *timonin@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

K. I. Titov, *kitit@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

A. S. Butorkin, *butorkin@iki.rssi.ru*

Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. Payload power distribution systems with overcurrent protection function are widely used in spacecraft. Disconnection of load in case of overcurrent allows canceling failure mitigation in load and over the spacecraft.

Requirements for Intelligent Power Distribution System for spacecraft payload are formulated. The complete design of the system using Programmable Analog Integrated Circuit and other modern Russian electronic components is proposed. Details regarding Programmable Analog Integrated Circuit application and schematics implemented in its firmware are described. Characteristics of the developed design obtained at the tests with a mock-up are established.

Keywords: spacecraft payload, power distribution, overcurrent protection, Programmable Analog Integrated Circuit, MOSFET, radiation hardness

Коммутация питания научной аппаратуры

Полезная нагрузка научно-исследовательских космических аппаратов состоит, как правило, из нескольких независимых научных приборов, составляющих комплекс научной аппаратуры (КНА). Обязательным элементом космического аппарата является система коммутации питания КНА. Возможность коммутации питания на каждый прибор по отдельности позволяет:

- снизить потребляемую мощность КНА — за счет возможности полного отключения неактивных в данный момент времени приборов;
- повысить общую надежность КНА — за счет возможности отключения питания вышедшего из строя прибора и, как следствие, предотвращения распространения отказа;
- повысить надежность каждого прибора в отдельности — за счет возможности сокращения времени активной работы, а также за счет возможности применения холодного резервирования (когда прибор или его отдельная часть дублируется и резервная часть остается выключенной).

Защита от перегрузки по току в настоящее время является важнейшей функцией систем коммутации питания и широко используется как в отечественных («Луна-25», «Ионосфера»), так и в иностранных проектах [1–5]. Отключение нагрузки в случае превышения током потребления определенного порога позволяет парировать нештатные ситуации (вызванные, например, тиристорным эффектом) и предотвратить распространение отказа на другие приборы и системы аппарата.

На основе опыта разработки и летной эксплуатации научной аппаратуры, а также участия в наземной отработке комплексов научной аппаратуры для различных миссий («ЭкзоМарс-2016», «ЭкзоМарс-2022», «Луна-25», «Луна-26») был составлен список рекомендуемых к реализации во вновь разрабатываемых проектах характеристик, которыми должна обладать система коммутации питания:

- коммутируемое напряжение — 20–35 В, коммутируемая цепь — положительная;

- коммутируемая ток по фидерам — до 8 А (в зависимости от фидера);
- допустимое падение напряжения на элементах коммутации — не более 1 В;
- наличие гальванической развязки цепей управления от коммутируемых цепей;
- наличие защиты от перегрузки по току, со скоростью срабатывания не более 100 мкс;
- индивидуальная настройка порога срабатывания защиты от перегрузки по току для каждого фидера (задается единожды на этапе разработки КД);
- погрешность порога срабатывания защиты — $\pm 20\%$;
- контроль токов потребления по фидерам и передача значений на Землю в составе телеметрии;
- возможность работы в холодном резерве, т.е. возможность объединения выходов двух полуконфигуров (запитанного и незапитанного) в одной точке с исключением взаимовлияния друг на друга;
- стойкость к внешним воздействующим факторам космического пространства;
- реализация преимущественно на компонентах отечественного производства.

Схемотехнически система коммутации питания представляет собой набор ключей, каждый из которых в свою очередь состоит из силового коммутирующего элемента, схемы управления и схемы измерения (см. рис. 1) [1–3, 6, 7]. В качестве силовых коммутирующих элементов в настоящее время, как правило, применяются МОП-транзисторы.

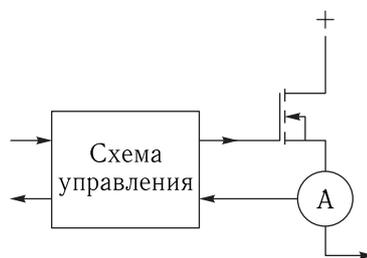


Рис. 1. Обобщенная схема ключа с функцией защиты от перегрузки по току

Обзор схемотехнических решений ключей с функцией ограничения тока

Ключи могут быть реализованы в монолитном (микросхемы), гибридном (микросборки), дискретном исполнениях или же как их комбинация. Рассмотрим достоинства и недостатки различных вариантов реализации ключей.

Интеллектуальные МОП-реле

Интеллектуальное МОП-реле — гибридное электронное устройство, предназначенное для коммутации силовоточной цепи питания нагрузки, обладающее функцией защиты от перегрузки по току [8, 9]. Решение на основе МОП-реле обладает следующими преимуществами:

- гибридное исполнение, а следовательно, малые габариты;
- наличие гальванической развязки не требует дополнительных компонентов для ее реализации;
- наличие функций защиты от перегрузки.

Решение на основе МОП-реле обладает следующими недостатками:

- невозможность задания (точной подстройки) порога срабатывания защиты;
- длительность времени срабатывания защиты достигает 100 мс, что может привести к повреждению в цепях нагрузки в случае нештатной ситуации;
- высокий постоянный ток потребления схемы управления; при большом количестве одновременно включенных фидеров нагрузки потребляемая мощность по цепям управления составляет заметную величину.

Надежность и работоспособность систем коммутации питания на основе МОП-реле подтверждается летной эксплуатацией в приборе ACS проекта «ЭкзоМарс-2016» [10], а также успешными конструкторско-доводческими и ресурсными испытаниями прибора БУНИ (проект «Луна-Глоб»).

Интеллектуальные силовые ключи

Разработанные отечественной фирмой «Ангстрем» микросхемы интеллектуальных силовых ключей [11] являются функциональными аналогами широко известных ключей серии BTS фирмы Infineon [12]. Ключи имеют встроенные функции защиты от перегрузки по току, перенапряжения, перегрева и переплюсовки.

Решение на основе интеллектуальных силовых ключей обладает следующими преимуществами:

- интегральное исполнение, а следовательно, малые габариты;
- наличие функций защиты от перегрузки и статуса;
- низкий постоянный ток потребления схемы управления.

Решение на основе интеллектуальных силовых ключей обладает следующими недостатками:

- отсутствие гальванической развязки, требуются дополнительные компоненты для ее реализации;
- невозможность задания (точной подстройки) порога срабатывания защиты;
- длительность времени срабатывания защиты достигает 2 мс, что может привести к повреждениям в цепях нагрузки в случае нештатной ситуации;
- высокий порог срабатывания защиты от перегрузки (45 А) фактически означает отсутствие какой-либо защиты для приборов с малой потребляемой мощностью.

Микросхемы ограничителей тока

Микросхемы ограничителей тока функционально схожи с интеллектуальными ключами, но при этом позволяют более гибко управлять параметрами схемы коммутации. Микросхемы могут как иметь встроенный коммутирующий МОП-транзистор [13], так и требовать подключения внешнего [14]. Данное решение обладает следующими преимуществами:

- интегральное исполнение, а следовательно, малые габариты;

- высокое коммутируемое постоянное напряжение — 50 В;
- возможность точной подстройки порога срабатывания защиты;
- мониторинг тока и статус.

Основным недостатком такого решения является отсутствие отечественных микросхем данного типа. Импортные микросхемы имеют высокую стоимость и сложны в поставке, что затрудняет их широкое применение в российских космических проектах.

Разработка новой интеллектуальной системы коммутации питания

Рассмотренные решения не позволяют достичь всех желаемых характеристик. Соответственно было принято решение о разработке собственной схемы — интеллектуальной системы коммутации питания (ИСКП) — на основе современной отечественной ЭКБ специального назначения. Такие электронные компоненты, как программируемые пользователем аналоговые микросхемы, МОП-транзисторы с низким сопротивлением сток-исток, базовые матричные кристаллы, оптроны, АЦП и другие,

позволяют создать надежное, радиационно-стойкое, недорогое (относительно готовых импортных решений), гибкое масштабируемое решение.

Принцип работы ИСКП

ИСКП представляет собой массив силовых коммутирующих элементов, объединенных общей схемой управления. Силовой коммутирующий элемент представляет собой МОП-транзистор Р- или N-канальный). Схема на основе Р-канального транзистора компактнее, но при этом не позволяет коммутировать большие токи из-за высокого сопротивления канала. В ИСКП схема на основе Р-канального транзистора применяется для коммутирования токов до 1 А. Электрическая схема ИСКП с N-канальным коммутирующим элементом представлена на рис. 2.

Транзистор VT1 коммутирует цепь бортового электропитания «+27 В» на нагрузку R_H . Транзистор VT2 выполняет функцию диода (т.н. схема «идеального диода»), блокируя протекание обратного тока — из нагрузки в цепь «+27 В» и в цепи управления ИСКП. Это исключает паразитную запитку ИСКП в выключенном состоянии, что позволяет реализовать холодное резервирование, то есть подключение к нагрузке двух (или более) схем ИСКП, одна из которых запитана, а остальные

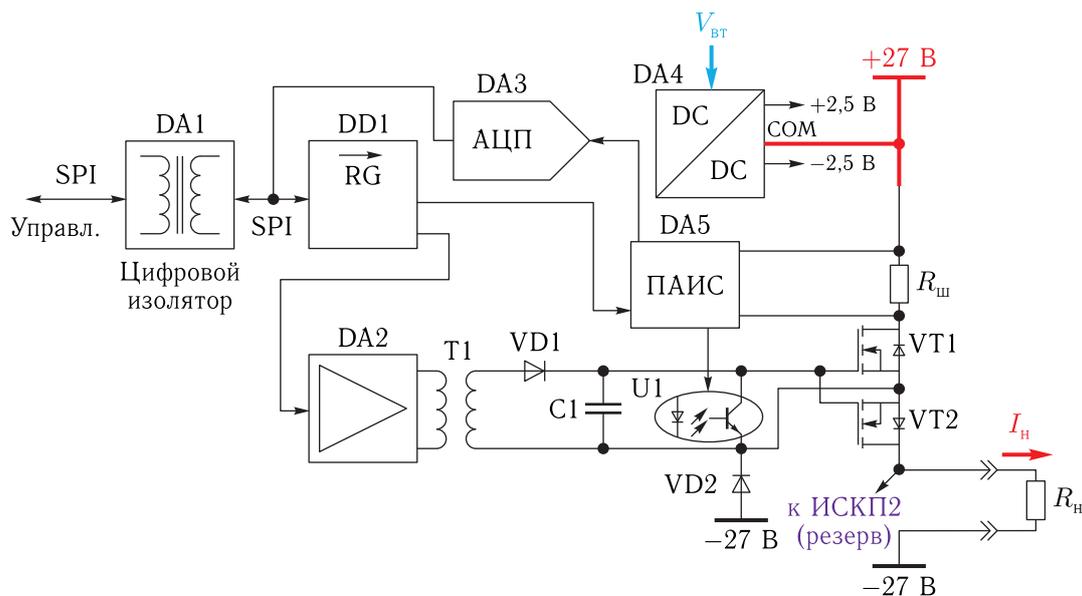


Рис. 2. Электрическая схема ИСКП с коммутующим элементом на основе N-канального МОП-транзистора

отключены. Шунтирующий диод VD2 защищает элементы ИСКП от отрицательных выбросов напряжения, возникающих при отключении индуктивной нагрузки.

Так как в схеме для коммутации положительной линии питания используется N-канальный транзистор, то для его открытия на затвор необходимо подать положительное напряжение относительно «плавающего» потенциала истока. В ИСКП для генерации такого напряжения для каждого ключа используется импульсный трансформатор Т1. При поступлении цифрового сигнала управления драйвер трансформатора 5503ХМ1-289 (DA2) начинает генерировать переменное напряжение на его первичной обмотке. Выпрямитель VD1–С1, подключенный к вторичной обмотке трансформатора, формирует на затворе транзисторов VT1 и VT2 требуемое напряжение относительно их истоков, что приводит к открытию транзисторов.

Программируемая аналоговая интегральная схема (ПАИС) DA5 измеряет ток фидера, считывая падение напряжения на токоизмерительном шунте $R_{ш}$. При превышении током уровня, заданного на ПАИС с помощью внешнего резистивного делителя, срабатывает защита — формируется сигнал аварийного отключения, поступающий на оптопару U1. При поступлении сигнала оптопара осуществляет быстрое отключение силового транзистора, замыкая затвор с истоком. При этом отключенное состояние сохраняется до тех пор, пока внешняя схема управления не выдаст команду на сброс. Дополнительно ПАИС формирует аналоговую телеметрическую информацию (ток потребления каждого фидера и состояние фидеров), поступающую на внешний АЦП DA3. В случае необходимости функцию защиты возможно отключить по команде управления. Это может понадобиться в случае каких-либо нештатных ситуаций, например когда потребление прибора превысит порог срабатывания защиты, но при этом прибор будет все еще выполнять часть своих научных задач.

Вышеперечисленные задачи ПАИС выполняет под управлением прошивки, которая является воплощением на кристалле пользовательской электрической схемы. Особенности применения ПАИС и описание внутренней электрической схемы приведены далее.

Управление ИСКП осуществляется по цифровому последовательному интерфейсу (SPI). Цифровой изолятор DA1 осуществляет гальваническую развязку схемы управления (вторичное питание) от цепей первичного питания КА («–27 V»). Регистр DD1 преобразует последовательный интерфейс в дискретные сигналы управления ключами и ПАИС.

Двухканальный изолированный DC/DC преобразователь DA4 формирует напряжение питания 5 В для ПАИС таким образом, чтобы синфазная составляющая напряжения токоизмерительного шунта (находится вблизи напряжения цепи «+27 V») попадала в середину питания ПАИС.

Электрическая схема ИСКП с P-канальным коммутирующим элементом во многом аналогична схеме с N-канальным ключом, за исключением нескольких отличий. Схема представлена на рис. 3.

Основное отличие от N-канального варианта заключается в способе управления затвором ключевого транзистора. В данной схеме линейный стабилизатор напряжения отрицательной полярности формирует общее для всех ключей отрицательное (относительно «+27 V») напряжение, необходимое для открытия P-канальных транзисторов.

Сформированное напряжение подается через резистор на затвор транзистора VT1. Непосредственно открытие/закрытие (в том числе при срабатывании защиты) транзистора VT1 осуществляется с помощью биполярного транзистора VT3.

Так как схема с P-канальным транзистором применяется для коммутации питания на фидеры с относительно низким потреблением, для упрощения схемы для блокировки обратного тока используется диод Шоттки VD3 вместо идеального диода.

Основная часть микросхем, используемых в ИСКП, — многоканальные, что позволяет значительно сократить массу и площадь, занимаемую схемой на печатной плате. Одна ПАИС используется для управления 4 фидерами, 1 трансформатор управляет 2 N-канальными транзисторами, 1 микросхема драйвера трансформатора управляет 4 трансформаторами, 1 АЦП опрашивает 8 ПАИС, 1 DC/DC преобразователя и 1 линейного преобразователя достаточно для всей схемы ИСКП. На рис. 4 схематично показано распределение микросхем по каналам.

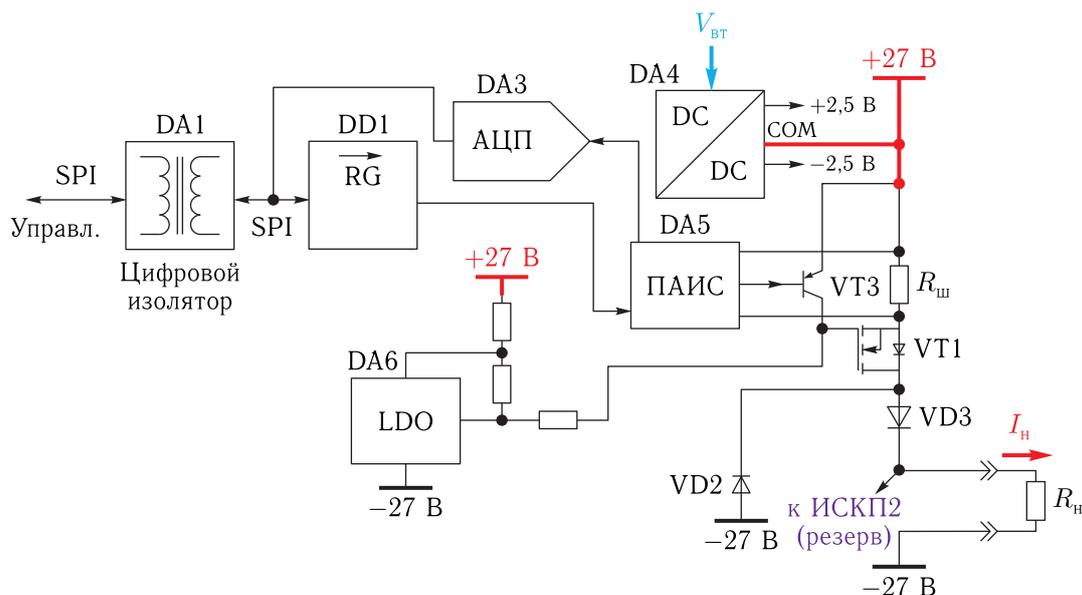


Рис. 3. Электрическая схема ИСКП с коммутирующим элементом на основе Р-канального МОП-транзистора

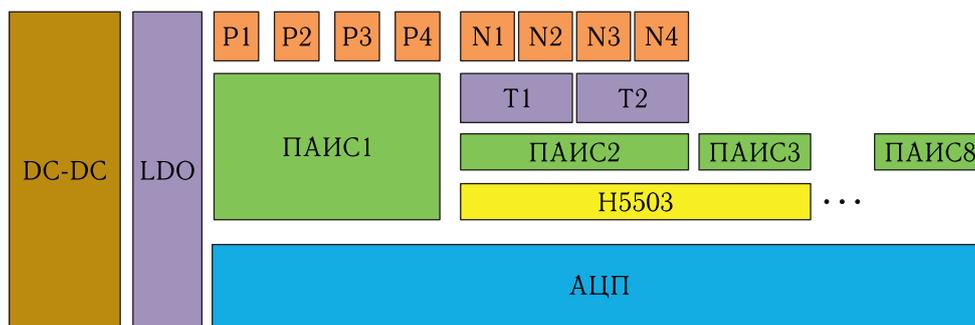


Рис. 4. Использование многоканальных микросхем в ИСКП

Применение ПАИС в ИСКП

Центральным элементом управления в ИСКП является ПАИС: с ее помощью производится измерение токов потребления фидеров, выдача сигнала аварийного отключения, а также формирование телеметрической информации о токах потребления и состояниях фидеров. Внутри ПАИС реализована электрическая схема, разработка и реализация которой являлась отдельной комплексной задачей, поэтому рассмотрим особенности применения данной микросхемы подробнее.

ПАИС представляет собой пользовательский «конструктор» аналоговых электрических схем, состоящий из множества модулей, которые соединяются между собой с помощью ключей

и коммутационных матриц, конфигурируемых с помощью прошивки. В микросхеме пользователю доступно 18 вводов/выводов произвольного назначения, а также вывод мультиплексора.

Возможности ПАИС

Структурная схема ПАИС из спецификации [15] представлена на рис. 5.

Согласно рис. 5 в ПАИС пользователю для проектирования электрической схемы доступны следующие типы блоков:

- система питания, включающая линейный подстраиваемый регулятор напряжения с выходным напряжением от 3,3 В до 5 В и подстраиваемый источник опорного напряжения 1 В;

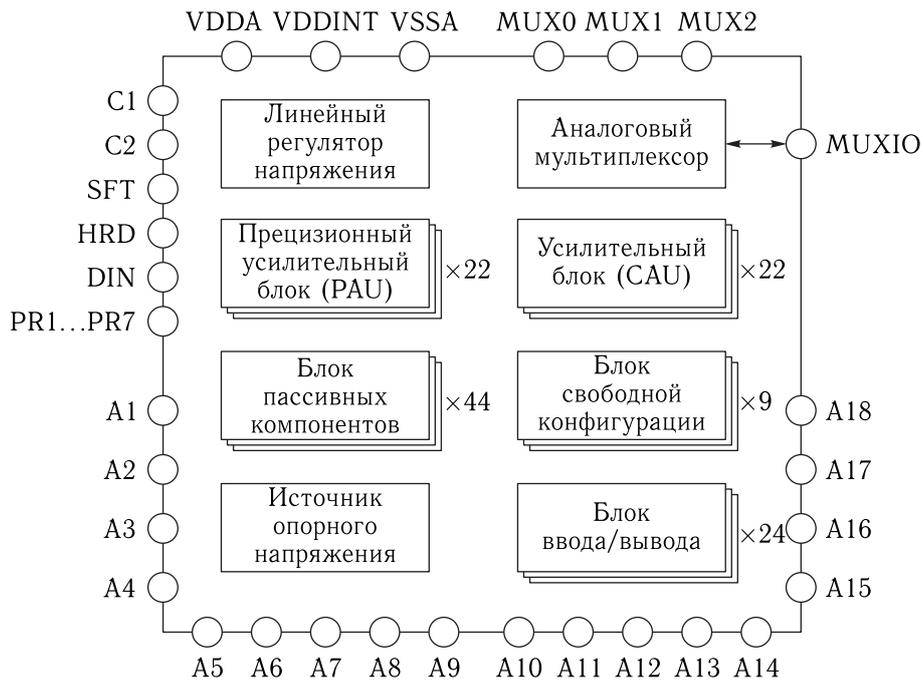


Рис. 5. Структурная схема микросхемы 5400TP035

- прецизионный усилительный блок (PAU), а также усилительный блок общего назначения (CAU). Каждый из них может работать в режиме операционного усилителя или компаратора;
- блок пассивных компонентов (PPC). Каждый содержит 2 настраиваемых резистора от 80 до 400 кОм с шагом 80 кОм и 2 емкости по 8 пФ;
- блок свободной конфигурации (SPM) — матрица из P- и N-канальных транзисторов малой мощности, а также резисторов (~10 кОм) и емкостей по 1 пФ. Данный блок может использоваться для реализации ключей и логических элементов;
- блок ввода/вывода. Для каждого пользовательского вывода доступна работа в режиме прямого подключения к схеме пользователя, а также в режиме аналогового и цифрового выхода через соответствующие буферные усилители;
- аналоговый мультиплексор. Имеет 6 пользовательских входов и управляется внешними выводами.

Разработка внутренней электрической схемы производится в САПР, предоставляемой производителем. После разработки и компиляции схемы пользователь получает файл прошивки, который с помощью программатора загружает в микросхему.

Электрическая схема внутри ПАИС

Реализованная внутри ПАИС схема, обеспечивающая работу ИСКП, представлена на рис. 6 (схема показана для одного фидера питания).

Напряжение с токоизмерительного шунта через защитные резисторы R_{in} подается на пользовательские входы микросхемы SNS1+ и SNS1-. С помощью входного измерительного каскада, построенного на PAU1, падение напряжения на шунте усиливается и подается на компаратор CAU1, где полученное напряжение PF1_I сравнивается с заданным на выводе CL1 уровнем. Далее полученный результат сравнения CL1_ACT поступает на логическую схему, построенную на SPM2.

Внутри блока SPM2 на транзисторах построены логические элементы и синхронные триггеры.

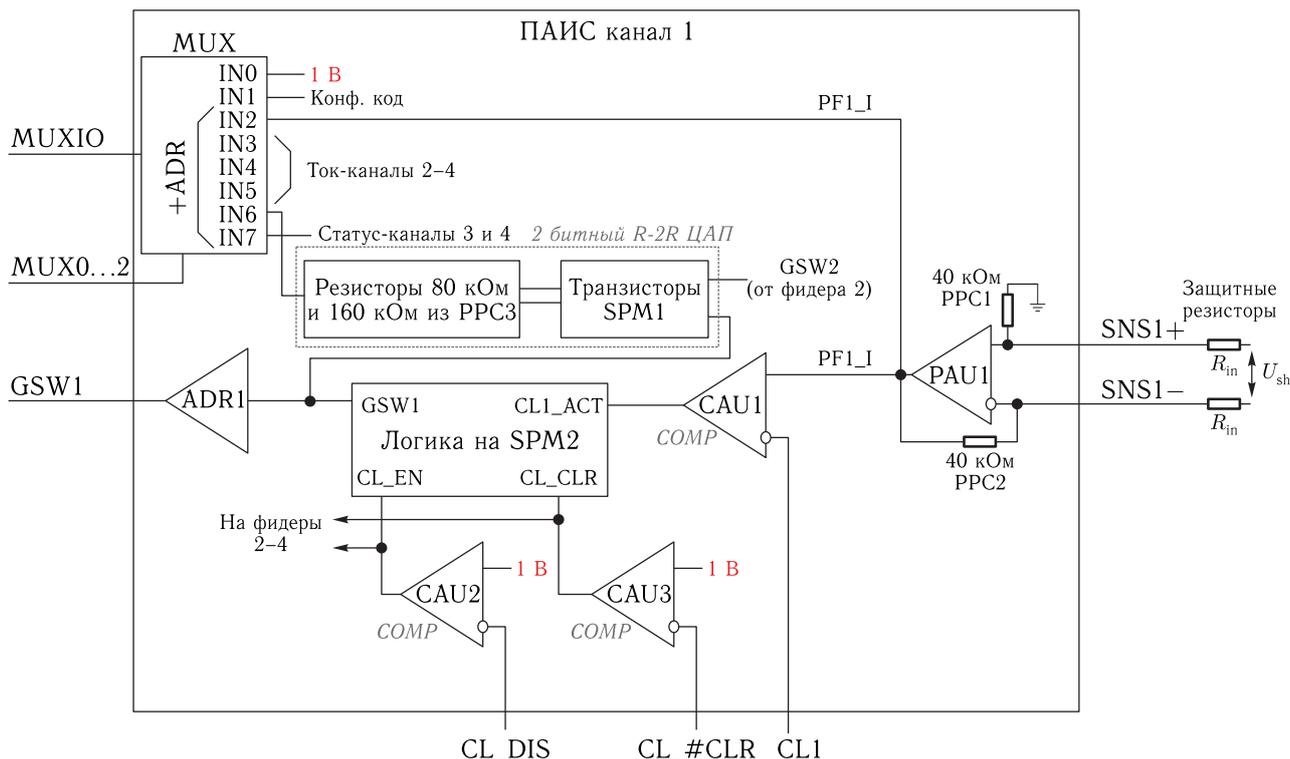


Рис. 6. Внутренняя электрическая схема управления одним фидером, реализованная с помощью пользовательской прошивки

На них, в свою очередь, реализована логика выдачи сигнала аварийного отключения, имеющая функции защелкивания и сброса защиты и управляемая сигналом превышения тока CL1_ACT, а также сигналами на входах ПАИС CL_#CLR (сброс защиты) и CL_DIS (отключения защиты).

Выходом логической схемы является управляющий сигнал включения и отключения защиты GSW1, который подается через аналоговый буфер на выход.

Телеметрический контроль состояния фидеров производится через 6 пользовательских выводов мультиплексора MUX. На 4 из них подаются напряжения PF1_I-PF4_I с измерительных каскадов, которые пропорциональны токам потребления соответствующих фидеров. Оставшиеся 2 канала используются для передачи текущего состояния 4 фидеров (по 2 фидера на каждый канал). Для того, чтобы вывести состояние 2 фидеров (4 возможных комбинации), через 1 вывод используется аналоговое кодирование информации 4 различными уровнями напряжения.

Входной измерительный каскад в ПАИС. Особенности проектирования

Основным элементом схемы, приведенной на рис. 6, является входной измерительный каскад, который представляет собой дифференциальный усилитель, усиливающий малую разницу напряжений на шунте. Данный усилитель построен на блоке PAU1, резисторах 40 кОм, полученных из блоков PPC1 и PPC2, и на внешних защитных резисторах R_{in} . Схема измерительного каскада представлена на рис. 7.

Реализация данного усилителя потребовала учесть некоторые нюансы. Первый состоит в том, что ключи, с помощью которых производится коммутация блоков между собой и пользовательских выводов, имеют достаточно существенное сопротивление (~700 Ом на каждый ключ). При этом ключей для проведения пути внутри ПАИС требуется достаточно много, а их сопротивление очень сильно меняется от температуры и напряжения

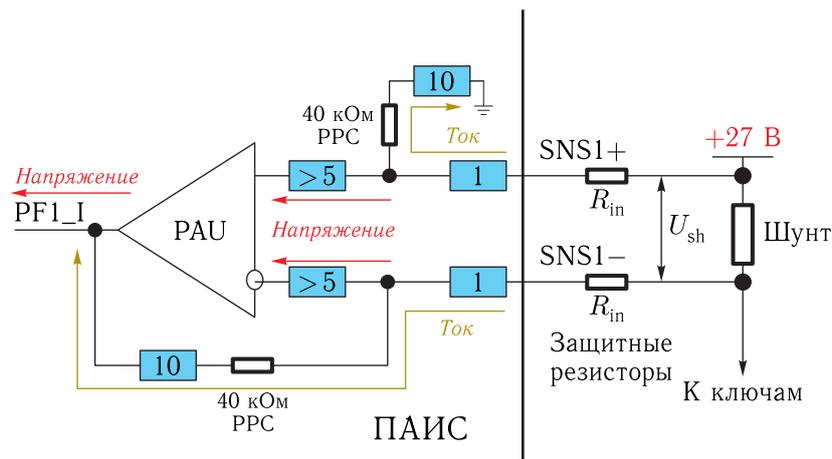


Рис. 7. Схема дифференциального усилителя, построенная с учетом коммутационных ключей

питания. Для того, чтобы исключить влияние коммутационных ключей на коэффициент усиления дифференциального усилителя, а также уменьшить нелинейные эффекты, трассировка схемы производилась с учетом рекомендаций производителя по разделению тока и напряжения [16]. То есть в токоведущих цепях было минимизировано количество коммутационных ключей, а подключение к высокоимпедансным входам усилителя осуществлялось отдельными линиями, в которых количество ключей могло быть произвольным.

Однако даже разделение тока и напряжения не позволяет полностью исключить наличие ключей в цепях протекания тока. Поэтому для дальнейшей оптимизации схемы путь протекания тока обратной связи (инвертирующий вход ОУ) и резистивного делителя (неинвертирующий вход) был спроектирован таким образом, чтобы выдержать одинаковое соотношение суммарных сопротивлений ключей в инвертирующей и неинвертирующей цепи ОУ. Так как сопротивления всех ключей в пределах одной микросхемы одинаковы [15], то задача сводится к выдерживанию равных соотношений по количеству ключей в цепях ОУ.

На рис. 7 ключи обозначены синими блоками, а внутри блоков указано их количество. Согласно схеме на рис. 7 ток по инвертирующей цепи протекает через 1 ключ до входа в ОУ и 10 ключей от входа ОУ до выхода усилителя. Аналогично по неинвертирующей цепи ток протекает через 1 ключ до входа ОУ и 10 ключей от входа ОУ

до общего потенциала. Таким образом при равенстве значений входных защитных резисторов R_{in} дифференциальный усилитель имеет линейную передаточную характеристику. При этом коэффициент усиления задается соотношением

$$K = \frac{40 \text{ кОм} + 10 \times R_k}{R_{in} + R_k},$$

где R_k — сопротивление одного коммутационного ключа. При $R_{in} = 4 \text{ кОм}$, то есть при $K = 10$ коэффициент усиления не зависит от сопротивления ключей. В результате полученная схема оптимизирована под коэффициент усиления равный 10. При задании других коэффициентов усиления схема также будет работать линейно, но с отклонением от ожидаемого коэффициента усиления.

Второй нюанс при реализации схемы заключается в том, что, как было сказано выше, середина питания ПАИС привязана к точке 27 V, имеющей высоковольтный потенциал. При протекании через шунт аварийного тока короткого замыкания на его выходе, а значит, и на аналоговом входе SNS1–ПАИС, возможно кратковременное появление отрицательного напряжения относительно общего вывода микросхемы.

На входах ПАИС защита от перенапряжения и от отрицательного напряжения обеспечена производителем с помощью защитных диодов, установленных на всех пользовательских выводах. Однако, как правило, такие диоды выдерживают токи не более десяти миллиампер, что существенно меньше

тока, который может обеспечить коммутируемый фидер питания. Данное обстоятельство и потребовало часть дифференциального усилителя реализовать в виде входных защитных резисторов, которые ограничивают величину протекающего тока через защитные диоды микросхемы (см. рис. 8).

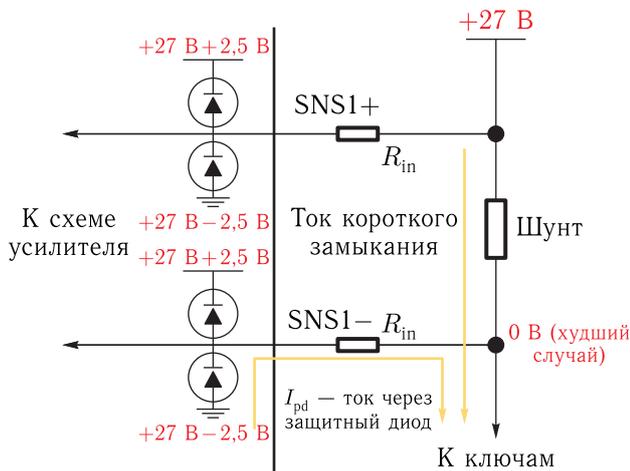


Рис. 8. Ограничение величины тока через защитный диод при возникновении короткого замыкания (худший случай)

Величина тока через защитный диод при возникновении короткого замыкания для худшего случая определяется соотношением

$$I_{pd} = \frac{U_{\max_27V} - 2,5 \text{ В}}{R_{in}}$$

где U_{\max_27V} — максимальное напряжение питания по коммутируемой цепи 27 В.

Таким образом, при задании $K = 10$ и при максимальном коммутируемом напряжении 36 В в случае нештатной ситуации данные резисторы ограничивают величину протекающего тока величиной $I_{\max} = (36 \text{ В} - 2,5 \text{ В})/4 \text{ кОм} = 8,4 \text{ мА}$, что находится в рамках предельного уровня в 10 мА, указанного производителем [15]. При макетировании схемы данные аварийные режимы работы были протестированы не только в импульсном режиме, а также и имитацией неисправности «обрыв шунта», при которой ток через защитный диод микросхемы максимален. В данных условиях ПАИС продолжала штатно работать и измерять ток по остальным 3 каналам.

Результаты отработки ИСКП

ИСКП была успешно протестирована на лабораторном макете. Макет содержит 4 резервированных N-канальных фидера и 4 резервированных P-канальных фидера. Фотографии узла макета ИСКП приведены на рис. 9.

В процессе отладки изделия была протестирована работа на максимальную нагрузку, плавное включение и выключение фидеров, проверена реакция фидера на короткое замыкание, а также проверена точность выдачи телеметрической информации и точность установки уровня защитного отключения.

Согласно поставленной задаче максимальный коммутируемый ток составляет 1 А для P-канального фидера и 8 А для N-канального фидера. При постоянной работе на такие токи был зафиксирован перегрев силовых элементов относительно температуры окружающей среды не выше чем на 20 °С. При работе на максимальную нагрузку падение напряжения между входом и выходом не превышало 1 В для каждого из коммутируемых каналов.

Осциллограммы включения и выключения N-канального и P-канального фидера представлены на рис. 10 и рис. 11.

Как видно из полученных осциллограмм, в ИСКП успешно реализовано плавное включение и выключение нагрузки с временами нарастания и спада порядка 1 мс.

Осциллограммы тестирования N- и P-канального фидера на защиту от короткого замыкания приведены на рис. 12.

Согласно полученным осциллограммам время защитного отключения при возникновении КЗ не превышает 7 мкс после превышения тока уровня срабатывания.

Далее была измерена погрешность выдачи телеметрической информации и погрешность установки уровня защитного отключения. Результаты измерений, а также временные параметры приведены в таблице.

Согласно таблице все полученные параметры соответствуют желаемым характеристикам.

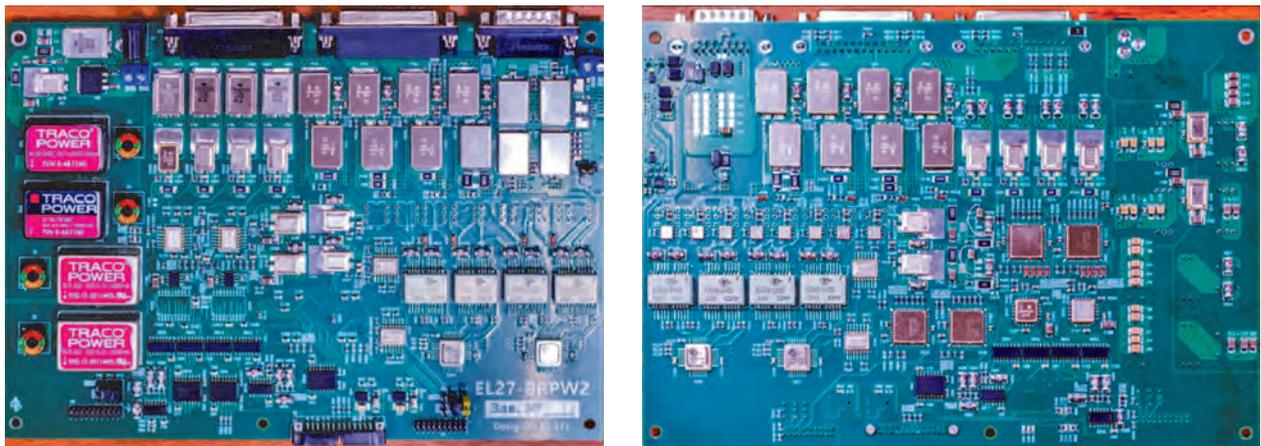


Рис. 9. Вид сверху (слева) и снизу (справа) узла лабораторного макета ИСКП

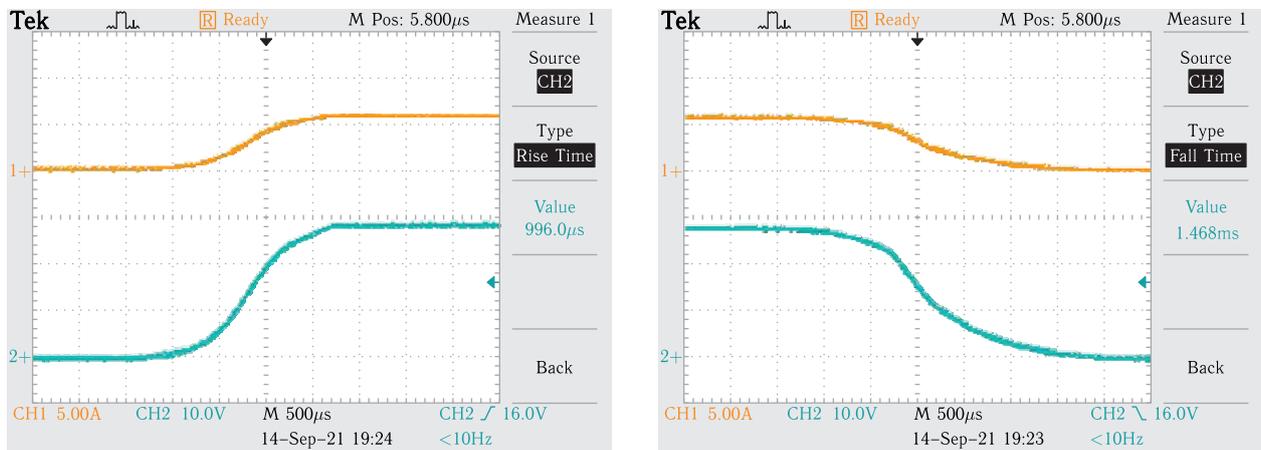


Рис. 10. Включение (слева) и выключение (справа) N-канального фидера. Канал 1 (желтый) — ток нагрузки, канал 2 (синий) — напряжение на нагрузке

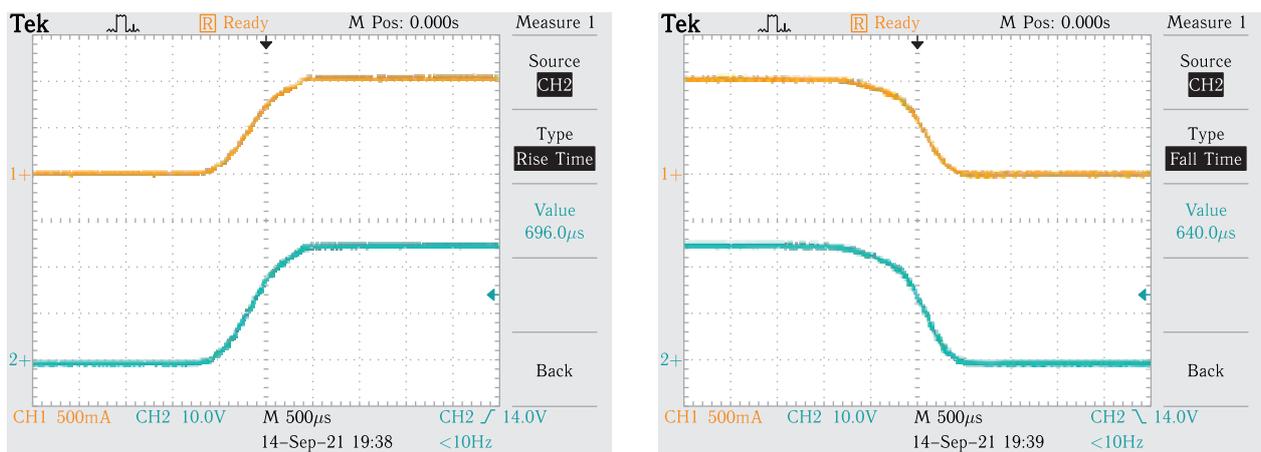


Рис. 11. Включение (слева) и выключение (справа) P-канального фидера. Канал 1 (желтый) — ток нагрузки, канал 2 (синий) — напряжение на нагрузке

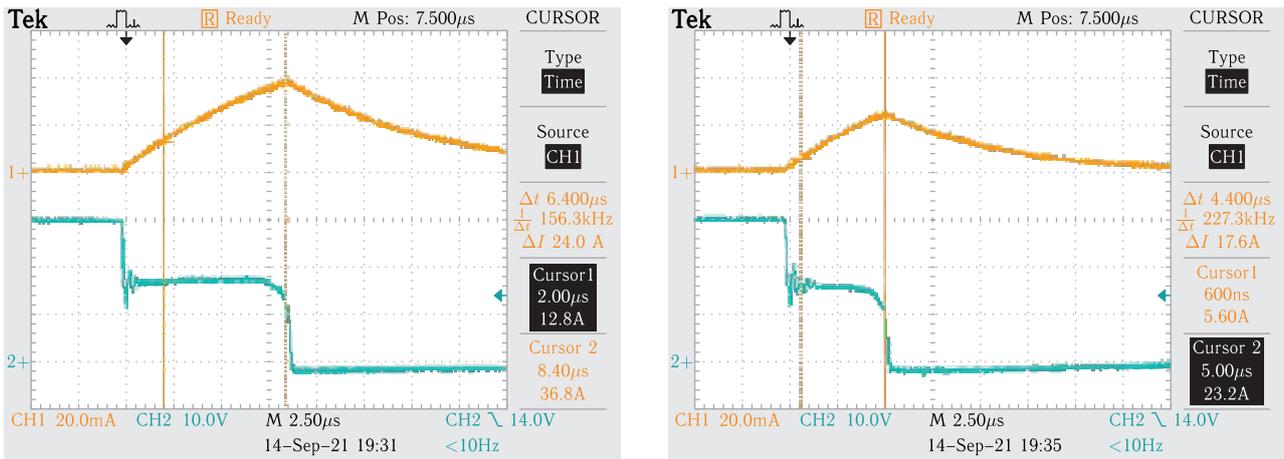


Рис. 12. Срабатывание защиты от КЗ на N-канальном (слева) и P-канальном (справа) фидере. Канал 1 (желтый) — ток нагрузки, канал 2 (синий) — напряжение на нагрузке

Таблица. Параметры работы фидеров ИСКП

Параметр	N-канальный фидер	P-канальный фидер
Время плавного (штатного) включения, мс	1,0	0,7
Время плавного (штатного) выключения, мс	1,5	0,6
Время срабатывания защитного отключения после превышения током защитного уровня, мкс	6,4	4,4
Погрешность измерения тока (телеметрия), %	менее 5	менее 5
Погрешность установки уровня защитного отключения, %	менее 5	менее 5
Перегрев транзисторов и шунтов относительно окружающей среды при протекании максимального тока, °C	менее 20	менее 20

Заключение

Разработанная и отлаженная интеллектуальная схема коммутации питания обладает следующими характеристиками:

- коммутируемое напряжение — (5–36) В, коммутируемая цепь — положительная;
- коммутируемый ток определяется транзистором (при отладке постоянная работа на ток до 8 А не вызвала существенного перегрева силовых элементов);
- падение напряжения на элементах коммутации — не более 1 В;
- подавление выброса напряжения при размыкании индуктивной нагрузки;
- защита от перегрузки с устанавливаемым уровнем срабатывания (погрешность 5%) и высокой скоростью срабатывания (10 мкс);
- контроль статусов и токов потребления (с погрешностью 5%) по фидерам;
- возможность работы в холодном резерве за счет блокировки обратного тока;
- реализована полностью на отечественных компонентах;
- высокая надежность и радиационная стойкость применяемых компонентов.

В дальнейшем планируется провести испытания лабораторного макета ИСКП на:

- электромагнитную совместимость,
- устойчивость к электростатическим разрядам,

- механические воздействия,
- работу при пониженном давлении при различных температурах (термовакuumные испытания).

В случае успешного прохождения испытаний ИСКП планируется использовать для построения систем коммутации питания в комплексах научной аппаратуры космических миссий.

Список литературы

1. European Cooperation for Space Standardisation, ECSS-E-HB-20-20A, Space engineering — Guidelines for electrical design and interface requirements for power supply, 15 April 2016.
2. *Bekhti M., Bensaada M., Beldjehem M.* Design and implementation of a power distribution system adopting overcurrent protection // *The Aeronautical Journal*, November 2020, vol. 124, issue 1281. P. 1789–1797.
3. *Dias A. V., Pomilio J. A., Finco S.* A current limiting switch for applications in space power systems // 2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2017. P. 1–6.
4. *Tsamsakizoglou M., Löfgren H., Gunnarsson M.* Microsatellite Power Control and Distribution Unit For The Innosat Platform. E3S Web Conf. 16. 2017.
5. *Lim T. M.* A modular electrical power system architecture for small spacecraft. Theses and Dissertations—Electrical and Computer Engineering. 2016.
6. *Volpi G. F.* Power Line Protection Devices in Space Applications // EUROCON 2007 — The International Conference on “Computer as a Tool”. 2007. P. 1636–1640.
7. *Shi H., Zhao C., Jin Y., Liu Y.* Current limiting protection in spacecraft power system // 2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment — Switching Technology (ICEPE-ST), 2015. P. 561–565.
8. Series HD Datasheet // TELEDYNE RELAYS: [сайт]. <https://www.teledynedefenseelectronics.com/relays/Datasheets%20MSSR/hd.pdf> (Дата обращения 29.09.2021).
9. Оптроны и твердотельные реле. Новинки 2020 // АО «Протон»: [сайт]. https://www.proton-orel.ru/files/products/optorele/optron_new_2020.pdf (Дата обращения 29.09.2021).
10. *Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A., Shakun A., Grigoriev A., Moshkin B., Ignatiev N., Forget F., Lefèvre F., Anufreychik K., Dzuban I., Ivanov Y., Kalinnikov Y., Kozlova T., Kungurov A., Makarov V., Martynovich F., Maslov I., Zorzano M.* (2017). The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // *Space Science Reviews*, February 2018, vol. 214, issue 1.
11. Силовой ключ 1358KT5T // АО «Ангстрем»: [сайт]. https://www.angstrem.ru/catalog/silovye_klyuchi/1358kt5t/ (Дата обращения 29.09.2021).
12. BTS640S2G Datasheet // Infineon: [сайт]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTS640S2G-DS-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4625a888733015aa3c7d8901018 (Дата обращения 29.09.2021).
13. LX7712 Datasheet // Microchip: [сайт]. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/1244106-ps-lx7712 (Дата обращения 29.09.2021).
14. RHRPMICL1A Datasheet // STMicroelectronics: [сайт]. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/rhrpmicl1a.pdf> (Дата обращения 29.09.2021).
15. Программируемая аналоговая интегральная схема. Спецификация // АО «Дизайн Центр «Союз»: [сайт]. https://dcsoyuz.ru/files/PAIS/5400TP035/specifikacija_5400tr035_ver2.1.pdf
16. Лабораторная работа №6. Построение прецизионных схем на ПАИС // АО «Дизайн Центр «Союз»: [сайт]. https://dcsoyuz.ru/files/PAIS/5400TP035/labs/6._postroenie_precizionnyh_shem.pdf (Дата обращения 29.09.2021).