



ЯКУТСКИЕ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ

YKSA-460001

Версия В1 – 26.06.2023

Последняя версия этого документа:

docs.yktaero.space/docs/YKSA-460001



Спецификация требований к программно-аппаратному комплексу (техническое задание)

Модуль полезной нагрузки
YKTS-PL-EDU16-SPTX

System Requirements Specification

YKTS-PL-EDU16-SPTX
CubeSat Payload Module

Подготовлено:
Петров А.Н.
Главный конструктор МКА

Согласовано:
Павлов В.К.
*Ректор Малой академии наук
Республики Саха (Якутия)*

Утверждено:
Чмаров К.В.
*Руководитель проекта МКА
Директор по НИИ
АО «Корпорация ВНИИЭМ»*

Содержание

1	Введение	5
1.1	Назначение	5
1.2	Соглашения о терминах	5
1.3	Предполагаемая аудитория и рекомендации к прочтению	5
1.4	Объем проекта и функции продукта	5
1.5	Ссылки на источники	5
2	Общее описание	6
2.1	Общий взгляд на комплекс	6
2.2	Классы пользователей	6
2.3	Операционная среда	8
2.3.1	R/OS-1 Операционная система	8
2.3.2	R/OS-2 Среда запуска микропрограмм модуля полезной нагрузки	8
2.3.3	R/OS-3 Система управления версиями	8
2.3.4	R/OS-4 Интерфейсы обмена данными	8
2.3.5	R/OS-5 Электрические и механические интерфейсы	8
2.3.6	R/OS-6 Условия окружающей среды	8
2.4	Ограничения реализации	8
2.5	Конструкторская и эксплуатационная документация	9
2.5.1	Структура и вид документации	9
2.6	Зависимости и предположения	9
2.6.1	R/AD-1 Зависимость от каналов обмена информацией	9
2.6.2	R/AD-2 Зависимость от оборудования	9
2.6.3	R/AD-3 Зависимость от платформы МКА	9
3	Функциональные требования к комплексу	10
3.1	Бортовой модуль полезной нагрузки	10
3.1.1	Несущая плата-адаптер	10
3.1.2	Кластер микроконтроллеров	12
3.1.3	Плата устройств расширения	13
3.1.4	Микропрограммы платы-адаптера и кластера микроконтроллеров	13
3.2	Аппаратный симулятор полезной нагрузки	14
3.2.1	Аппаратный симулятор полезной нагрузки	14
4	Требования к внешним интерфейсам	16
4.1	Механические интерфейсы	16
4.1.1	R/HI-1 Крепежные отверстия платформы МКА	16
4.1.2	R/HI-2 Крепления дополнительного оборудования	16
4.2	Электрические интерфейсы	16
4.2.1	R/EI-1 Разъем РС/104 платформы	16
4.2.2	R/EI-2 Интерфейс электропитания платформы	16
4.2.3	R/EI-3 Разъем платы устройств расширения	16
4.2.4	R/EI-4 Интерфейс наземного электропитания	16
4.3	Интерфейсы передачи данных	16
4.3.1	R/DI-1 Интерфейс CAN	16
4.3.2	R/DI-2 Интерфейс I2C	16
4.3.3	R/DI-3 Интерфейс ISP	17
4.3.4	R/DI-4 Интерфейс JTAG	17
4.3.5	R/DI-5 Интерфейс UART	17

4.3.6	R/DI-6 Интерфейс USB АСПН	17
4.4	Программные интерфейсы	17
4.4.1	R/SI-1 Интерфейс UNICAN	17
4.4.2	R/SI-2 Интерфейс телекоманд ПО Houston	17
4.4.3	R/SI-3 Интерфейс самопрограммирования через бортовую шину данных	17
4.4.4	R/SI-4 Интерфейс обновления ПО устройств ПН	18
4.4.5	R/SI-5 Интерфейс телеметрии	18
5	Прочие требования	19
5.1	Требования к производительности и отказоустойчивости	19
5.1.1	R/PF-1 Количество пользователей	19
5.1.2	R/PF-2 Отказоустойчивость комплекса	19
5.1.3	R/PF-3 Хранение информации	19
5.1.4	R/PF-4 Контроль целостности информации	19
5.2	Требования к безопасности	19
5.2.1	R/SE-1 Требования к разграничению доступа к информации	19
5.2.2	R/SE-2 Требования к аутентификации и авторизации	19
5.3	Требования к техническому контролю	19
5.3.1	R/QA-1 Соответствие спецификации	19
5.3.2	R/QA-2 Соответствие интерфейсному контрольному документу	20
5.3.3	R/QA-3 Производственный контроль	20
5.3.4	R/QA-4 Вибрационные испытания	20
5.3.5	R/QA-5 Климатические (термовакuumные) испытания	20
5.3.6	R/QA-6 Испытания на совместимость с платформой МКА	20
	История изменений	21
	Список недоработок	22
	Приложение А. Глоссарий	23
	Приложение Б. Схема распределения питания платы-адаптера	24
	Приложение В. Перечень обязательных экспериментов на МКА	25
	Приложение Г. Оборудование платформы МКА	28

1 Введение

1.1 Назначение

В этом документе описаны *функциональные* и *нефункциональные* требования к полезной нагрузке с микроконтроллерным кластером для МКА «Якутия».

1.2 Соглашения о терминах

Документ следует рекомендациям стандарта *IEEE 1233*.

При описании требований используются ключевые слова, эквивалентные указанным в *RFC 2119*. Требования этого документа обязательны к исполнению, если явно не указано иное.

В [разделе «Глоссарий»](#) определены термины, применяемые в этом документе.

1.3 Предполагаемая аудитория и рекомендации к прочтению

Документ рекомендуется к прочтению руководителям проектных групп, инженерам-конструкторам.

Документ предполагает, что у читателя имеются представления о разработке электронных приборов с применением микроконтроллеров, о построении отказоустойчивых систем.

Для электронной версии: Документ содержит интерактивные возможности. Ссылки на разделы и внешние источники отмечены синим цветом. Ссылки в содержании интерактивны. Для быстрого перехода к содержанию, нажмите на название документа или название раздела в верхнем колонтитуле.

1.4 Объем проекта и функции продукта

Программно-аппаратный комплекс предназначается для проведения экспериментов на борту МКА путем загрузки на борт КА программного обеспечения, написанного пользователями, и его выполнения на кластере из нескольких независимых микроконтроллеров.

Аппаратная часть комплекса состоит из бортового модуля полезной нагрузки (БМПН) и аппаратного симулятора полезной нагрузки (АСПН). БМПН представляет собой печатную плату, на которой установлен кластер из нескольких Arduino-совместимых микроконтроллеров; БМПН устанавливается на борт МКА «Якутия». АСПН является упрощенным функциональным аналогом БМПН и предназначается для отработки пользователями программ, загружаемых на борт КА. АСПН по интерфейсу USB подключается к рабочей станции пользователя.

Программная часть состоит из микропрограмм бортового модуля полезной нагрузки. Микропрограмма БМПН предоставляет интерфейсы для загрузки пользовательских программ на микроконтроллеры кластера.

БМПН должен быть программно и аппаратно совместим с платформой «Орбикрафт-Про 1U» от ООО «СПУТНИКС».

1.5 Ссылки на источники

1. <https://sputnix.ru/ru/platformyi/interfejsnyij-kontrolnyij-dokument-icd> – Интерфейсный контрольный документ для платформы «Орбикрафт-Про».

2 Общее описание

2.1 Общий взгляд на комплекс

МКА «Якутия» – проект по созданию первого в Якутии малого космического аппарата. Проект направлен на популяризацию и привлечение интереса школьников и студентов к изучению космической сферы. Реализация проекта позволит ученикам получить опыт работы с настоящим КА.

Основная миссия МКА – предоставление платформы для проведения экспериментов, разработанных школьниками Республики, на борту МКА. В дальнейшем возможно расширение доступа к платформе на другие регионы РФ.

Для выполнения миссии на борту МКА будет установлен модуль полезной нагрузки, предоставляющий кластеру микроконтроллеров доступ к комплекту датчиков для изучения космического пространства. На микроконтроллеры кластера будут загружаться экспериментальные микропрограммы, разработанные школьниками. Результаты выполнения микропрограмм будут передаваться на наземную станцию несколько раз в сутки. При разработке комплекса следует минимизировать порог вхождения школьников в разработку микропрограмм, загружаемых на борт, и использовать знакомые им инструменты.

Работа с КА будет производиться через наземную станцию, расположенную в Малой Академии Наук РС(Я).

МКА выполнен в соотв. со спецификацией CubeSat 1U на базе платформы «Орбикрафт-Про 1U» от ООО «СПУТНИКС». В платформу интегрируется бортовой модуль полезной нагрузки, разрабатываемый для нужд миссии. На [рисунке 2.1 \(с. 7\)](#) приведена структурная схема платформы МКА.

В контексте данного документа под комплексом понимается взаимосвязанная структура, состоящая из следующих компонентов:

- бортовой модуль полезной нагрузки:
 - несущая плата-адаптер для интеграции с платформой МКА;
 - кластер Arduino-совместимых микроконтроллеров;
 - плата с устройствами расширения;
 - микропрограммы платы-адаптера и кластера микроконтроллеров;
- аппаратный симулятор полезной нагрузки;
- наземное программное обеспечение для управления комплексом.

i

Спецификация технических требований к наземному программному обеспечению вынесена в отдельный документ *YKSA-101002*.

На [рисунке 2.2 \(с. 7\)](#) приведена контекстная диаграмма комплекса.

2.2 Классы пользователей

Оператор космического аппарата – технический специалист, занимающийся управлением и обслуживанием космического аппарата. Операторы КА используют наземное программное обеспечение комплекса для загрузки микропрограмм на кластер микроконтроллеров и получения результатов работы микропрограмм с борта КА. Операторы КА имеют полный доступ к управляющим командам и диагностической информации всего комплекса.

Оператор аэрокосмического класса – технический специалист, занимающийся подготовкой микропрограмм для загрузки на борт КА. Операторы аэрокосмических классов собирают завершённые микропрограммы у учащихся, проверяют работоспособность микропрограмм на АСПН и передают проверенные микропрограммы операторам КА. Операторы классов также передают полученные от операторов КА результаты работы микропрограмм. Операторы аэрокосмических классов имеют полный доступ к диагностической информации и управляющим командам АСПН.

Учащийся аэрокосмического класса – конечный пользователь комплекса. Учащиеся аэрокосмических классов разрабатывают микропрограммы для загрузки на борт КА по предоставленным методическим пособиям. Готовые микропрограммы передаются операторам классов для проверки. Аэрокосмические классы организовываются в рамках профильных смен образовательных учреждений, либо в виде постоянных секций в учреждениях дополнительного образования. Учащиеся аэрокосмических классов представлены школьниками 9-11 классов, студентами первых курсов профильных направлений подготовки.

Рисунок 2.1 — Структурная схема платформы МКА

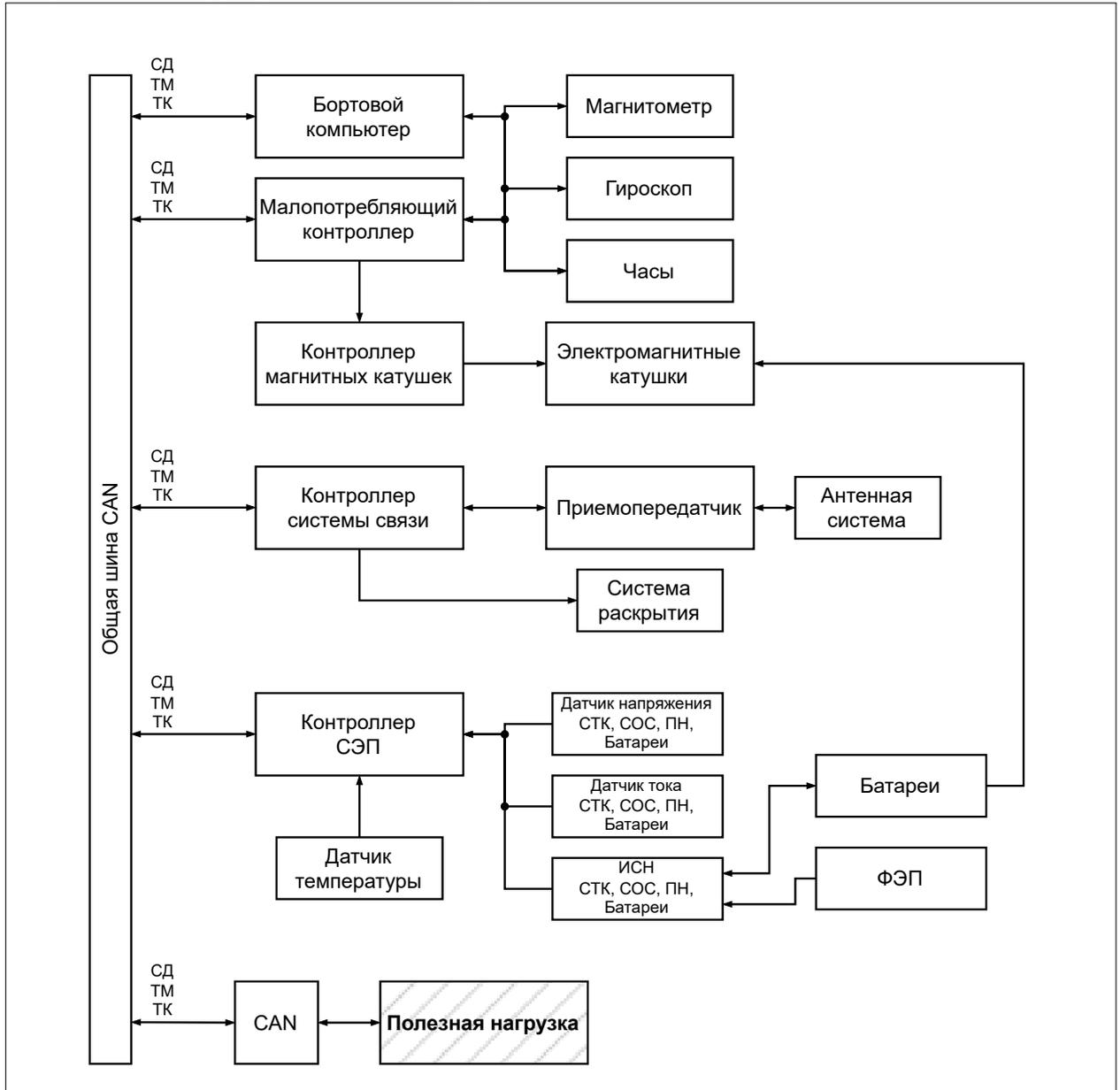
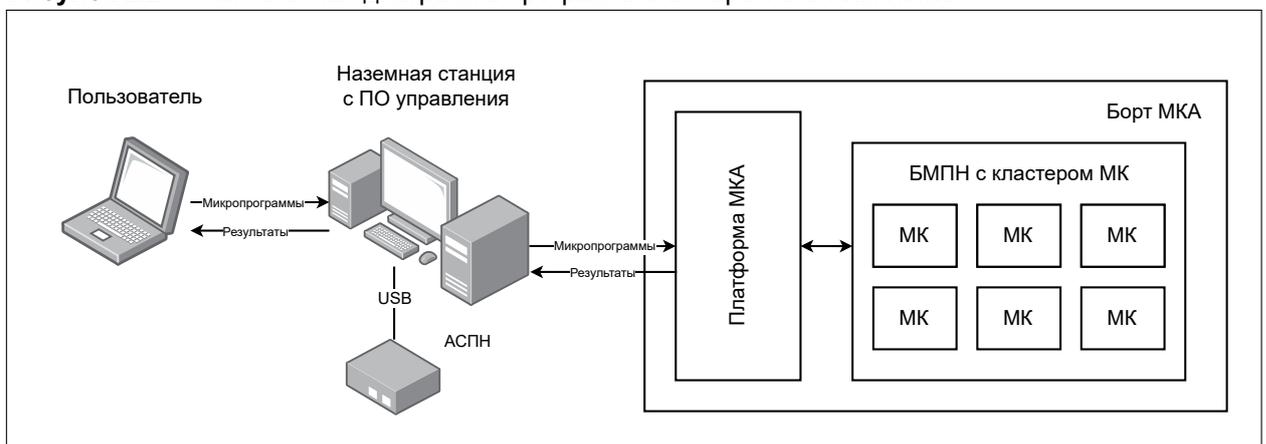


Рисунок 2.2 — Контекстная диаграмма программно-аппаратного комплекса



2.3 Операционная среда

Операционная среда, в которой разворачивается комплекс, должна соответствовать следующим требованиям:

2.3.1 R/OS-1 Операционная система

Наземное программное обеспечение должно быть развернуто на физическом оборудовании с установленной операционной системой Ubuntu 22.04 LTS. Для микропрограмм требований к операционной системе не предъявляется.

2.3.2 R/OS-2 Среда запуска микропрограмм модуля полезной нагрузки

Среда запуска микропрограмм кластера микроконтроллеров должна поддерживать комплект ПО Arduino не ниже версии 1.8. Среда запуска микропрограмм платы-адаптера должна поддерживать ПО, разработанное на языке Си не старше стандарта ISO/IEC 9899:1999.

2.3.3 R/OS-3 Система управления версиями

В качестве системы управления версиями используется Git. Все исходные тексты размещаются на сервере GitLab ООО «ЯКС». Конструкторская и эксплуатационная документация должна размещаться в сервисе распространения документации docs.yktaero.space.

2.3.4 R/OS-4 Интерфейсы обмена данными

R/OS-4.1 Платформа МКА должна предоставлять интерфейс обмена данными по шине CAN версии 2.0В скоростью не ниже 2 Мбит/с.

R/OS-4.2 Платформа МКА должна поддерживать протокол SPUTNIX UNICAN.

R/OS-4.3 Наземное программное обеспечение должно предоставлять интерфейс KISSTCP в клиентском режиме для соединения с промежуточным ПО ООО «СПУТНИКС».

R/OS-4.4 Наземное программное обеспечение должно поддерживать работу с устройствами USB с использованием библиотек `libusb`.

2.3.5 R/OS-5 Электрические и механические интерфейсы

Бортовой модуль полезной нагрузки должен быть электрически и механически совместим с платформой «Орбикрафт-Про 1U» от ООО «СПУТНИКС». Требования о совместимости указаны в [интерфейсном контрольном документе ООО «СПУТНИКС»](#).

2.3.6 R/OS-6 Условия окружающей среды

Бортовой модуль полезной нагрузки должен быть пригоден к эксплуатации в условиях вакуума и температурном диапазоне от -50 до +70 град. С. Конструкция бортового модуля полезной нагрузки не должна содержать материалов, склонных к газообразованию в вакууме. Подробнее см. [CubeSat Design Specification](#).

2.4 Ограничения реализации

R/DC-1 Параметры комплекса должны соответствовать всем требованиям [интерфейсного контрольного документа ООО «СПУТНИКС»](#).

R/DC-2 Проектирование электронных компонентов комплекса должно выполняться в САПР KiCad версии не ниже 6.0.

R/DC-3 Микропрограммы платы-адаптера должны быть написаны на языке Си с использованием компилятора GCC версии не ниже 5.4.0.

R/DC-4 Микропрограммы кластера должны быть написаны на языке C++ с использованием библиотек Arduino.

2.5 Конструкторская и эксплуатационная документация

2.5.1 Структура и вид документации

- R/DS-1** Документация комплекса по коду и сопровождению должна соответствовать стандартам IEEE, упомянутым в стандарте *IEEE-830-1998*.
- R/DS-2** Документация на электронные изделия в составе комплекса должна включать минимальный перечень документов, указанный в *ГОСТ 2.102-68*.
- R/DS-3** Документация на электронные изделия должна включать интерактивные сборочные чертежи в формате HTML и iCad в BOM.
- R/DS-4** Документация на электронные изделия должна включать программы и методики (ПиМ) вибрационных, термовакуумных, функциональных испытаний. Условия проведения испытаний устанавливает оператор запуска МКА.

2.6 Зависимости и предположения

2.6.1 R/AD-1 Зависимость от каналов обмена информацией

Комплекс нормально функционирует только при условии, что между всеми его узлами существует стабильный (не прерывающийся в течение сессии использования комплекса) канал связи.

2.6.2 R/AD-2 Зависимость от оборудования

Комплекс нормально функционирует только при условии, что все необходимое для него оборудование (см. [приложение Г](#)) находится в рабочем состоянии.

2.6.3 R/AD-3 Зависимость от платформы МКА

Комплекс нормально функционирует только при условии использования платформы МКА «Орбикрафт-Про 1U» от ООО «СПУТНИКС». В [таблице 2.1 \(с. 9\)](#) приведены характеристики платформы. В [приложении Г](#) указаны состав систем платформы и подробные характеристики.

Таблица 2.1 — Характеристики платформы от ООО «СПУТНИКС»

Габаритные размеры (с зажатой системой отделения)	108 x 108 x 113,5 мм – 1U CubeSat
Масса в сборе (без ПН)	не более 0,9 г (для Si ФЭП) не более 0,95 г (для GaAs ФЭП)
Максимальная допустимая масса с ПН	не более 1,33 кг
Доступный объем для установки ПН	не менее 80 x 70 x 20 мм
Напряжение внешнего питания	5 В ±0.5 В
Потребление внешнего питания	не более 2 А
Напряжение питания ПН	7.4—8.4 В ±0.25 В
Доступная средневытягиваемая мощность ПН на НОО (уточняется для конкретной орбиты)	не менее 200 мВт (для Si ФЭП) не менее 500 мВт (для GaAs ФЭП)

3 Функциональные требования к комплексу

3.1 Бортовой модуль полезной нагрузки

3.1.1 Несущая плата-адаптер

3.1.1.1 Описание и приоритет компонента

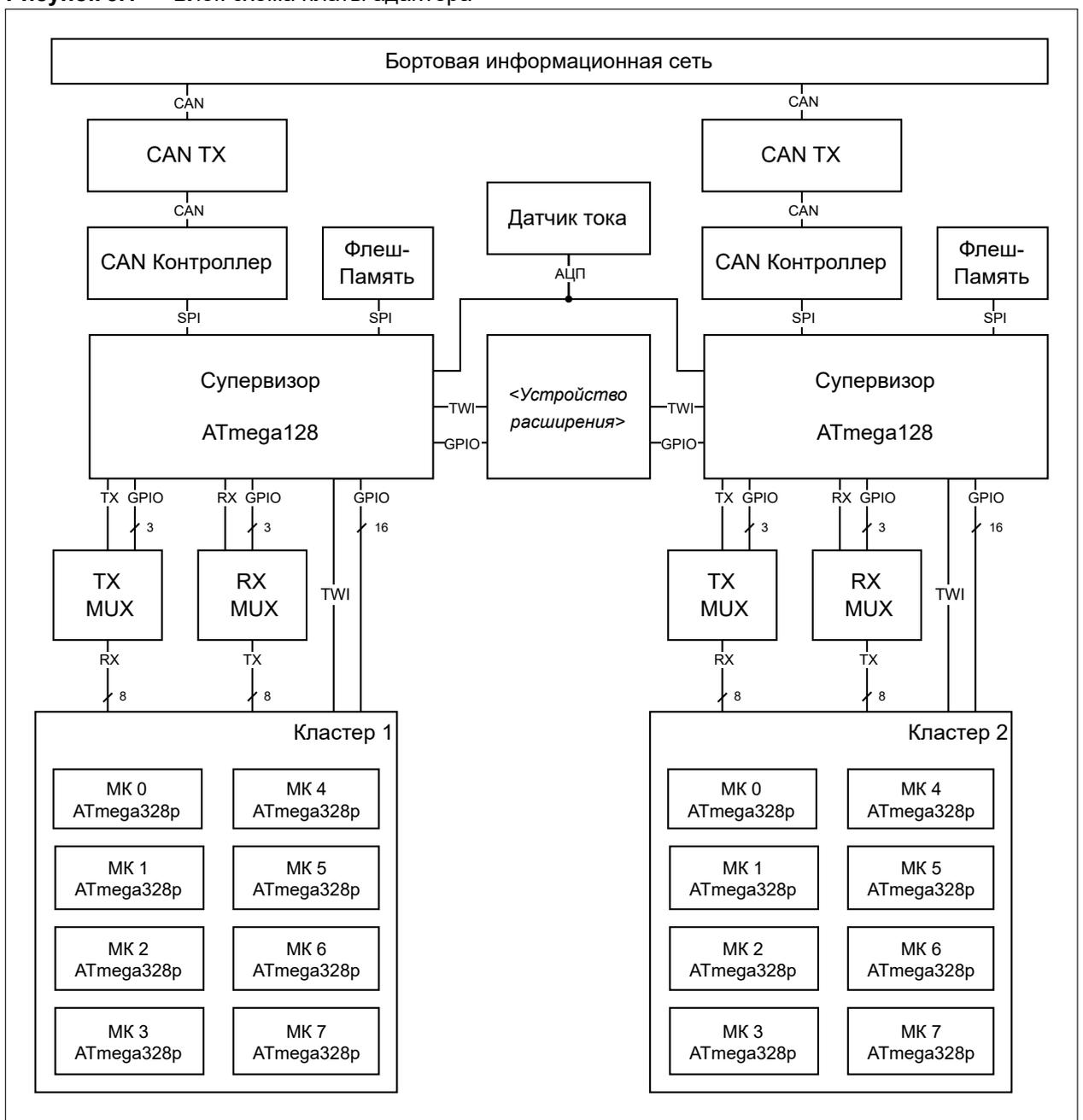
Полезная нагрузка состоит из набора плат, включающего несущую плату-адаптер, кластер микроконтроллеров и дополнительные устройства. Дополнительные устройства и кластер микроконтроллеров устанавливаются на несущую плату-адаптер, обеспечивающую электрические интерфейсы для подключения к общей шине КА и механические интерфейсы для интеграции с платформой.

На [рисунке 3.1](#) (с. 10) показан пример блок-схемы несущей платы-адаптера с дополнительными устройствами.

В [приложении Б](#) показан пример схемы распределения питания платы-адаптера.

Приоритет: высокий

Рисунок 3.1 — Блок-схема платы адаптера



3.1.1.2 Функциональные требования

- R/FN-1.1** Плата-адаптер должна иметь электрические и механические интерфейсы для соединения с платформой КА. Интерфейсы должны быть совместимы с [интерфейсным контрольным документом ООО «СПУТНИКС»](#).
- R/FN-1.2** Плата-адаптер должна предоставлять отладочные разъемы, необходимые для загрузки базовой микропрограммы на все устройства ПН.
- R/FN-1.3** Плата-адаптер может предоставлять интерфейсы для подключения дополнительных устройств. Интерфейсы могут включать питание, шины обмена данными и управляющие сигналы.
- R/FN-1.4** Интерфейсы для дополнительных устройств должны быть отключаемыми. Неисправность дополнительных устройств не должна влиять на работоспособность ПН.
- R/FN-1.5** Плата-адаптер должна размещать кластер не менее чем из 16 Arduino-совместимых микроконтроллеров ATmega328p.
- R/FN-1.6** Плата-адаптер должна размещать один или более *супервизоров*, управляющих кластером микроконтроллеров. Супервизор должен быть выполнен в виде отдельного микроконтроллера, со всеми необходимыми вспомогательными компонентами. Супервизор должен иметь систему тактирования с ошибкой частоты не более 100 ppm.
- R/FN-1.7** Супервизор должен быть подключен к шине обмена данными КА. Все взаимодействия кластера микроконтроллеров и систем КА должны обслуживаться супервизором.
- R/FN-1.8** Супервизор должен поддерживать интерфейс связи CAN 2.0B на скорости не ниже 2 Мбит/с. Допускается реализация интерфейса связи с помощью вспомогательных компонентов.
- R/FN-1.9** Супервизор должен иметь запоминающее устройство для хранения микропрограмм и результатов работы кластера.
- R/FN-1.10** Супервизор должен иметь сторожевой таймер, перезагружающий микропрограмму при зависании.
- R/FN-1.11** Кластер микроконтроллеров на плате-адаптере может быть разбит на группы. Для каждой группы должен быть выделен независимый супервизор.
- R/FN-1.12** Плата-адаптер должна предоставлять питание и интерфейсы связи для микроконтроллеров кластера.
- R/FN-1.13** Плата-адаптер должна обеспечивать одновременную работу как минимум 8 микроконтроллеров кластера, при доступности достаточной электрической мощности на борту.
- R/FN-1.14** Плата-адаптер должна обеспечивать питание напряжением не менее 3.3 В и током не менее 50 мА для каждого микроконтроллера кластера.
- R/FN-1.15** Плата-адаптер должна обеспечивать питание напряжением не менее 3.3 В и током не менее 100 мА для платы устройств расширения.
- R/FN-1.16** Плата-адаптер должна предоставлять общую шину I2C для всех устройств ПН. Параметры шины должны соответствовать спецификации I2C Fast Mode (400 кГц).
- R/FN-1.17** Плата-адаптер должна предоставлять выделенные двухсторонние последовательные линии связи (UART) для каждого микроконтроллера кластера. Допустимо применение мультиплексирования. Скорость каждой линии связи должна быть не ниже 9600 бод.
- R/FN-1.18** Плата-адаптер должна предоставлять выделенные линии управления питанием и сбросом для каждого микроконтроллера кластера.
- R/FN-1.19** Плата-адаптер должна иметь средства измерения энергопотребления. Супервизоры должны автоматически отключать устройства ПН при превышении заданного оператором КА порога.
- R/FN-1.20** Плата-адаптер должна быть устойчива к любым отказам микроконтроллеров кластера. Отказавшие микроконтроллеры кластера должны быть изолированы от остальной ПН.

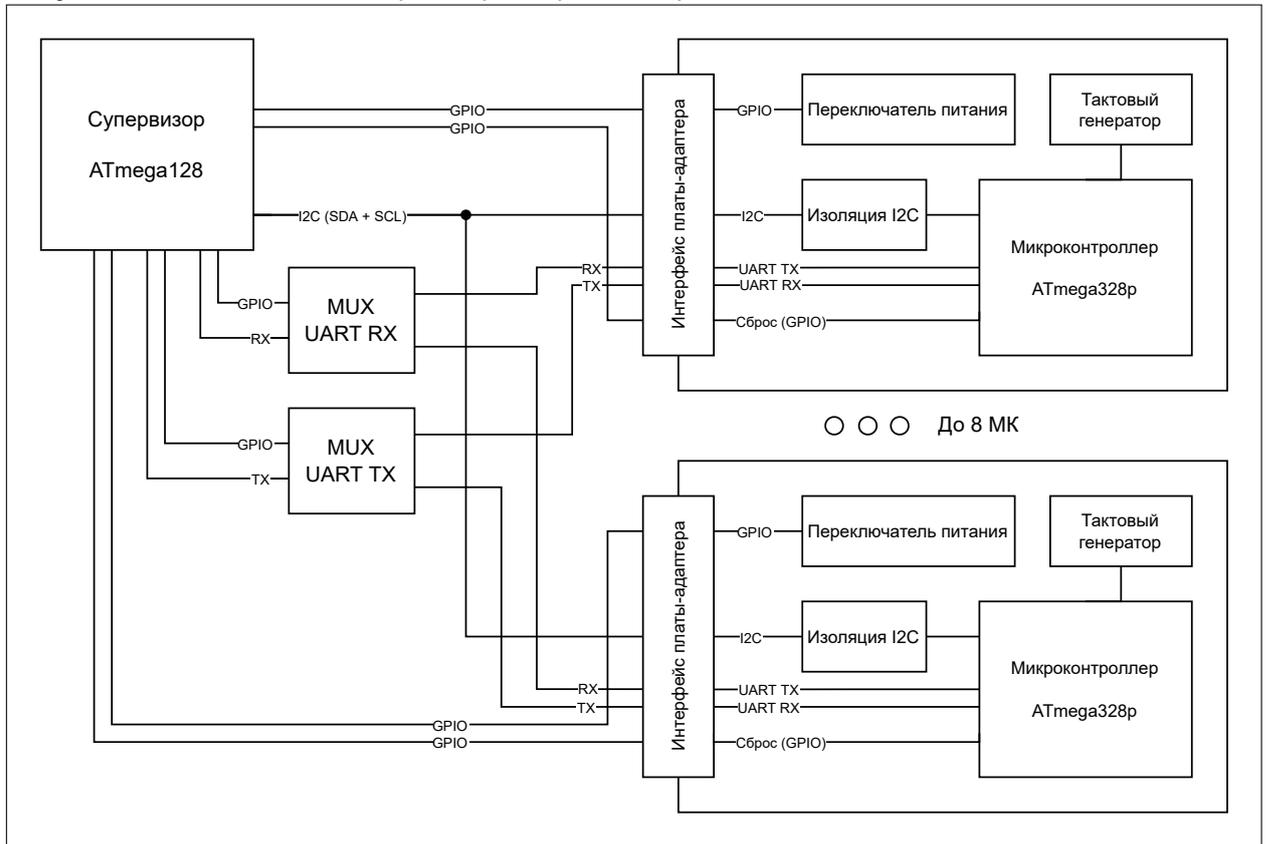
3.1.2 Кластер микроконтроллеров

3.1.2.1 Описание и приоритет компонента

Кластер микроконтроллеров размещается на плате-адаптере и исполняет микропрограммы, написанные пользователями. Микроконтроллеры кластера представлены Arduino-совместимыми контроллерами ATmega328p. На [рисунке 3.2](#) (с. 12) показана упрощенная блок-схема кластера.

Приоритет: высокий

Рисунок 3.2 — Блок-схема микроконтроллера кластера



3.1.2.2 Функциональные требования

- R/FN-2.1** Микроконтроллеры кластера должны иметь систему команд и набор периферийных устройств, совместимый с контроллерами ATmega328p.
- R/FN-2.2** Микроконтроллеры кластера должны устанавливаться на плату-адаптер. Допускается использование плат-подложек для размещения микроконтроллеров и вспомогательных компонентов.
- R/FN-2.3** Вспомогательные компоненты микроконтроллеров кластера должны включать переключатель питания и изоляцию интерфейсов связи. Переключатель питания должен быть управляем с платы-адаптера.
- R/FN-2.4** Микроконтроллеры кластера должны иметь функции снижения энергопотребления и сна. Микроконтроллеры кластера не должны потреблять более 50 мА при напряжении 3.3 В.
- R/FN-2.5** Микроконтроллеры кластера должны предоставлять интерфейсы для загрузки базовой микропрограммы.
- R/FN-2.6** Микроконтроллеры кластера должны быть электрически и механически совместимы с платой-адаптером.
- R/FN-2.7** Микроконтроллеры кластера должны предоставлять интерфейс I2C и интерфейс UART для связи с супервизором на плате-адаптере. Интерфейс I2C должен соответствовать спецификации Fast Mode (400 кГц), скорость интерфейса UART должна быть не ниже 9600 бод.

- R/FN-2.8 Микроконтроллеры кластера должны иметь возможность изоляции интерфейсов от остальной ПН.
- R/FN-2.9 Микроконтроллеры кластера должны иметь систему тактирования с ошибкой частоты не более 100 ppm.
- R/FN-2.10 Микроконтроллеры кластера должны иметь вывод для сброса. Вывод для сброса должен быть доступен с платы-адаптера.

3.1.3 Плата устройств расширения

3.1.3.1 Описание и приоритет компонента

Плата устройств расширения устанавливается на плату-адаптер и предоставляет кластеру микроконтроллеров датчики для проведения экспериментов. Плата расширения также предоставляет дополнительные электрические интерфейсы для подключения устройств.

Приоритет: средний

3.1.3.2 Функциональные требования

- R/FN-3.1 Плата устройств расширения должна устанавливаться на плату-адаптер. Плата устройств расширения должна быть механически и электрически совместима с платой-адаптером. Установка платы устройств расширения не должна влиять на совместимость бортового модуля ПН с платформой МКА.
- R/FN-3.2 Плата устройств расширения должна включать переключатель питания и изоляцию интерфейсов связи. Переключатель питания должен быть управляем с платы-адаптера.
- R/FN-3.3 Плата устройств расширения должна иметь функции снижения энергопотребления и сна. Плата устройств расширения не должна потреблять более 100 мА при напряжении 3.3 В.
- R/FN-3.4 Плата устройств расширения может включать один и более микроконтроллеров для управления устройствами расширения.
- R/FN-3.5 Плата устройств расширения должна предоставлять интерфейсы для загрузки базовой микропрограммы.
- R/FN-3.6 Плата устройств расширения должна предоставлять интерфейс I2C для связи с супервизором на плате-адаптере. Интерфейс I2C должен соответствовать спецификации Fast Mode (400 кГц).
- R/FN-3.7 Плата устройств расширения должна систему тактирования с ошибкой частоты не более 100 ppm.
- R/FN-3.8 Плата устройств расширения должна размещать комплект датчиков для изучения космического пространства. Состав датчиков может быть изменен в зависимости от набора датчиков, предоставляемых платформой МКА. Суммарное количество *различных* экспериментов, проводимых с использованием набора датчиков всего МКА, должно быть не менее 5.
- R/FN-3.9 Плата устройств расширения должна обеспечивать проведение *обязательных* экспериментов на борту МКА. Перечень обязательных экспериментов см. в [приложении В](#).
- R/FN-3.10 Плата устройств расширения может предоставлять интерфейсы для подключения внешних датчиков. Установка внешних датчиков не должна влиять на совместимость бортового модуля ПН с платформой МКА.

3.1.4 Микропрограммы платы-адаптера и кластера микроконтроллеров

3.1.4.1 Описание и приоритет компонента

Микропрограммы платы-адаптера запускаются на супервизорах и обеспечивают функционирование всех устройств ПН.

Приоритет: высокий

3.1.4.2 Функциональные требования

- R/FN-4.1** Микропрограммы платы-адаптера должны поддерживать возможность обновления с наземной станции.
- R/FN-4.2** Микропрограммы платы-адаптера должны предоставлять режим восстановления микропрограммы в случае повреждения. Все остальные устройства ПН в этом режиме должны быть отключены.
- R/FN-4.3** Микропрограммы платы-адаптера должны иметь реализовывать программный сторожевой таймер, перезагружающий устройства ПН не реже раза в сутки. Сторожевой таймер должен быть защищен от случайного сброса без телекоманды с наземной станции.
- R/FN-4.4** Микропрограммы платы-адаптера должны иметь функции диагностики для проверки устройств ПН. При обнаружении неисправностей, микропрограмма должна автоматически переходить в безопасный режим и отключать все устройства ПН, кроме супервизоров.
- R/FN-4.5** Микропрограммы платы-адаптера должны обеспечивать возможность загрузки микропрограмм на микроконтроллеры кластера с наземной станции.
- R/FN-4.6** Микропрограммы платы-адаптера должны осуществлять проверку целостности загружаемых в микроконтроллеры кластера микропрограмм.
- R/FN-4.7** Микропрограммы платы-адаптера должны обеспечивать сбор данных о результатах работы программ на микроконтроллерах кластера, а также хранение на период не менее 24 часов.
- R/FN-4.8** Микропрограммы платы-адаптера должны хранить метаданные для всех пакетов данных, полученных от кластера. Метаданные могут включать метки времени, идентификатор микропрограммы и др.
- R/FN-4.9** Микропрограммы платы-адаптера должны обеспечивать регулярную отправку результатов работы микропрограмм кластера на наземную станцию;
- R/FN-4.10** Микропрограммы платы-адаптера должны формировать отчет о выполнении программ на микроконтроллерах кластера не реже раза в час, а также генерировать телеметрическую информацию по запросу.
- R/FN-4.11** Микропрограммы платы-адаптера должны обрабатывать запросы на доступ к устройствам ПН и системам КА от кластера микроконтроллеров. Микропрограммы платы-адаптера должны иметь защиту от слишком частых или некорректных запросов.
- R/FN-4.12** Микропрограммы кластера должны поддерживать возможность обновления с супервизора.
- R/FN-4.13** Микропрограммы кластера должны осуществлять проверку собственной целостности. При обнаружении ошибок микропрограмма должна переходить в аварийный режим и ожидать команд с супервизора.
- R/FN-4.14** Микропрограммы кластера должны обеспечивать регулярную отправку результатов работы на супервизор. Результаты работы микропрограмм отправляются в виде пакетов. Структура пакетов задается разработчиком микропрограммы и обязательно включает метаданные.
- R/FN-4.15** Микропрограммы кластера должны иметь уникальный идентификатор. Метаданные результатов работы микропрограмм должны включать уникальный идентификатор микропрограммы.

3.2 Аппаратный симулятор полезной нагрузки

3.2.1 Аппаратный симулятор полезной нагрузки

3.2.1.1 Описание и приоритет компонента

Аппаратный симулятор полезной нагрузки (АСПН) – средство отладки микропрограмм кластера микроконтроллеров. АСПН представляет собой функциональный аналог бортового модуля ПН, с добавлением адаптера для подключения к рабочей станции пользователя по интерфейсу USB.

Приоритет: низкий

3.2.1.2 Функциональные требования

- R/FN-5.1** АСПН должен быть функционально аналогичен бортовому модулю полезной нагрузки. Функциональные требования к бортовому модулю ПН перечислены в [разделе 3.1.1.2 \(с. 11\)](#). Допустимо не выполнять требования, относящиеся к отказоустойчивости, для уменьшения стоимости. Все отличия АСПН и бортового модуля ПН должны быть указаны в соответствующей документации.
- R/FN-5.2** АСПН должен размещать кластер микроконтроллеров, функционально аналогичный кластеру в бортовом модуле ПН. Допустимо сократить количество микроконтроллеров в кластере для уменьшения стоимости.
- R/FN-5.3** Микропрограммы АСПН должны быть функционально аналогичны микропрограммам бортового модуля. Функциональные требования к микропрограммам бортового модуля ПН перечислены в [разделе 3.1.4.2 \(с. 14\)](#).
- R/FN-5.4** Микропрограммы кластера микроконтроллеров АСПН должны быть совместимы с микропрограммами бортового модуля ПН на уровне машинных кодов. Микропрограммы кластера микроконтроллеров должны запускаться на АСПН без перекомпиляции.
- R/FN-5.5** АСПН должен иметь интерфейс USB для подключения к рабочей станции пользователя. Предоставляемые протоколы должны быть аналогичны используемым в бортовом модуле ПН.
- R/FN-5.6** АСПН должен поддерживать обновление микропрограмм всех устройств по интерфейсу USB.
- R/FN-5.7** АСПН может предоставлять дополнительные интерфейсы отладки и программирования устройств.

4 Требования к внешним интерфейсам

4.1 Механические интерфейсы

4.1.1 R/NI-1 Крепежные отверстия платформы МКА

Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять крепежные отверстия, соответствующие стандарту [РС/104](#). Крепежные отверстия должны быть подключены к полигону «земли» через резистор номиналом не менее 1 МОм и конденсатор емкостью не менее 2000 пФ, напряжением пробоя не менее 1500 В для защиты от статического электричества.

4.1.2 R/NI-2 Крепления дополнительного оборудования

Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять крепления для платы устройств расширения.

4.2 Электрические интерфейсы

4.2.1 R/EI-1 Разъем РС/104 платформы

Бортовой модуль полезной нагрузки должен иметь 64-контактный сквозной разъем РС/104 с шагом контактов 2.54 мм. Расположение разъема и назначение выводов должно соответствовать [интерфейсному контрольному документу ООО «СПУТНИКС»](#).

4.2.2 R/EI-2 Интерфейс электропитания платформы

Бортовой модуль полезной нагрузки должен получать питание с бортовой шины платформы МКА и обеспечивать необходимые для работы устройств ПН напряжения питания. Входная емкость цепей питания бортового модуля ПН не должна превышать 80 мкФ. Параметры бортовой шины питания указаны в интерфейсном контрольном документе платформы.

4.2.3 R/EI-3 Разъем платы устройств расширения

Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять электрический интерфейс для платы устройств расширения. Электрический интерфейс должен включать электропитание, интерфейс передачи данных I2C, необходимые сигналы управления.

4.2.4 R/EI-4 Интерфейс наземного электропитания

Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять интерфейс для внешнего питания, используемый при производственных испытаниях ПН и отладке оборудования.

4.3 Интерфейсы передачи данных

4.3.1 R/DI-1 Интерфейс CAN

R/DI-1.1 Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять интерфейс CAN версии 2.0b со скоростью передачи данных не ниже 2.0 Мбит/с для соединения с общей шиной платформы МКА.

R/DI-1.2 Интерфейс должен быть защищен от статического электричества и помех.

R/DI-1.3 Интерфейс CAN модуля полезной нагрузки должен соответствовать всем требованиям [интерфейсного контрольного документа ООО «СПУТНИКС»](#).

R/DI-1.4 Аппаратный симулятор полезной нагрузки должен предоставлять интерфейс CAN через специальный адаптер для подключения к рабочей станции по интерфейсу USB.

4.3.2 R/DI-2 Интерфейс I2C

R/DI-2.1 Бортовой модуль полезной нагрузки должен предоставлять интерфейс I2C для подключения внешних дополнительных устройств.

R/DI-2.2 Параметры интерфейса должны соответствовать спецификации I2C Fast Mode (400 кГц).

R/DI-2.3 Интерфейс должен быть защищен от статического электричества и помех.

R/DI-2.4 Неисправности дополнительного интерфейса I2C не должны влиять на функционирование критических узлов ПН (супервизоров, подсистемы питания и кластера микроконтроллеров).

4.3.3 R/DI-3 Интерфейс ISP

Бортовой модуль и аппаратный симулятор полезной нагрузки должны предоставлять интерфейсы ISP (in-system programming) для загрузки микропрограмм на все установленные устройства. Конкретная реализация интерфейсов ISP зависит от выбранных комплектующих и не регламентируется этим документом.

4.3.4 R/DI-4 Интерфейс JTAG

Супервизоры бортового модуля и аппаратного симулятора полезной нагрузки должны предоставлять интерфейсы JTAG для отладки микропрограмм. Интерфейсы JTAG супервизоров должны поддерживаться набором ПО OpenOCD и GDB.

4.3.5 R/DI-5 Интерфейс UART

R/DI-5.1 Супервизоры бортового модуля и аппаратного симулятора полезной нагрузки должны предоставлять интерфейсы UART для отладки микропрограмм.

R/DI-5.2 Интерфейсы UART должны поддерживать скорость работы не ниже 9600 бод в обе стороны.

R/DI-5.3 Интерфейсы должны быть защищены от статического электричества.

4.3.6 R/DI-6 Интерфейс USB АСПН

Аппаратный симулятор полезной нагрузки должен предоставлять интерфейс USB для подключения к рабочей станции пользователя. Через интерфейс USB должны быть доступны все перечисленные ранее интерфейсы передачи данных ПН.

4.4 Программные интерфейсы

4.4.1 R/SI-1 Интерфейс UNICAN

Микропрограммы платы-адаптера бортового модуля полезной нагрузки должны поддерживать работу по протоколу UNICAN поверх бортовой шины CAN. Спецификацию протокола необходимо запросить у ООО «СПУТНИКС».

4.4.2 R/SI-2 Интерфейс телекоманд ПО Houston

Микропрограммы платы-адаптера бортового модуля полезной нагрузки должны обеспечивать управление всеми устройствами ПН с использованием ПО Houston Control Center ООО «СПУТНИКС». Команды управления устройствами ПН должны быть предоставлены в ООО «СПУТНИКС» в виде XML-файла с описаниями полей пакетов UNICAN. Команды управления должны включать:

- команды включения/отключения всех устройств ПН;
- команды запроса диагностической информации всех устройств ПН;
- команды чтения и записи произвольных областей памяти супервизоров ПН и подключенных к ним накопителей данных;
- команды прямой передачи данных по внутренним интерфейсам ПН;
- команды переключения режимов работы ПН;
- прочие команды управления устройствами ПН, заданные конкретной реализацией.

4.4.3 R/SI-3 Интерфейс самопрограммирования через бортовую шину данных

Микропрограммы платы-адаптера бортового модуля полезной нагрузки должны поддерживать самообновление через бортовую шину данных. Программа самообновления должна поддерживать протокол UNICAN и может поддерживать протокол обновления ПО ООО «СПУТНИКС». Допускается реализация собственного протокола обновления ПО поверх протокола UNICAN.

4.4.4 R/SI-4 Интерфейс обновления ПО устройств ПН

Микропрограммы платы-адаптера бортового модуля полезной нагрузки должны обеспечивать обновление микропрограмм других устройств ПН (включая кластер микроконтроллеров) через внутренние интерфейсы обмена данными. Функции обновления должны быть реализованы в виде команд ПО Houston Control Center.

4.4.5 R/SI-5 Интерфейс телеметрии

Микропрограммы платы-адаптера бортового модуля полезной нагрузки должны регулярно выдавать пакет диагностической информации в бортовую шину данных. Пакет диагностической информации может ширококестельно передаваться по радиоканалу в составе пакета радиомаяка. Пакет должен включать следующий набор данных:

- время с момента включения питания ПН;
- состояние и режим работы вспомогательных устройств ПН;
- состояние устройств кластера микроконтроллеров;
- заполненность запоминающих устройств супервизоров ПН;
- прочая информация, заданная конкретной реализацией ПН.

5 Прочие требования

5.1 Требования к производительности и отказоустойчивости

5.1.1 R/PF-1 Количество пользователей

Кластер микроконтроллеров бортового модуля полезной нагрузки должен обеспечивать работу не менее 8 пользовательских микропрограмм, при доступности необходимой электрической мощности на борту. Кластер микроконтроллеров АСПН должен обеспечивать работу не менее 16 пользовательских микропрограмм.

5.1.2 R/PF-2 Отказоустойчивость комплекса

R/PF-2.1 Бортовой модуль полезной нагрузки должен обеспечивать изоляцию отказов некритических устройств. Отказ некритических устройств не должен влиять на функционирование других устройств ПН. При обнаружении отказа, ПН должна автоматически переходить в безопасный режим и отключать все устройства, кроме супервизоров платы-адаптера.

R/PF-2.2 При использовании нескольких супервизоров на плате-адаптере, отказ одного из них не должен влиять на работоспособность остальных.

R/PF-2.3 Критические отказы бортового модуля полезной нагрузки не должны влиять на работоспособность платформы МКА. Интерфейсы между платформой МКА и модулем ПН должны быть защищены и изолируемы в случае критических неисправностей.

5.1.3 R/PF-3 Хранение информации

Запоминающие устройства супервизоров должны хранить результаты работы микропрограмм кластера за период не менее 24 ч. Объем данных определяется из расчета $1 \text{ Кб} \cdot \text{ч} \cdot \text{количество активных микроконтроллеров}$.

5.1.4 R/PF-4 Контроль целостности информации

R/PF-4.1 Контроль целостности микропрограмм должен выполняться с помощью контрольных сумм CRC-32. Выбор полинома определяется производительностью выбранных микроконтроллеров.

R/PF-4.2 Контроль целостности данных, передаваемых по шине CAN, должен выполняться в соотв. со спецификацией протокола UNICAN.

R/PF-4.3 Данные, передаваемые по радиоканалу, должны использовать помехоустойчивое кодирование (FEC). При использовании платформы ООО «СПУТНИКС», рекомендуется включить протокол радиообмена USP с поддержкой FEC.

5.2 Требования к безопасности

5.2.1 R/SE-1 Требования к разграничению доступа к информации

Пользователи комплекса, за исключением операторов МКА, не должны иметь доступа к управляющим командам ПН, за исключением публичной диагностической информации. Микропрограммы кластера микроконтроллеров не должны оказывать влияния на критическую функциональность ПН.

5.2.2 R/SE-2 Требования к аутентификации и авторизации

Источник управляющих телекоманд должен идентифицироваться по радиопозывному. Неавторизованные телекоманды не должны выполняться.

5.3 Требования к техническому контролю

5.3.1 R/QA-1 Соответствие спецификации

Разработанный программно-аппаратный комплекс должен быть проверен на соответствие настоящей спецификации. Результаты проверки должны быть оформлены в виде заключения. Все несоответствия спецификации должны быть представлены в виде таблицы идентификаторов требований и описаний несоответствия.

5.3.2 R/QA-2 Соответствие интерфейсному контрольному документу

Разработанный программно-аппаратный комплекс должен быть проверен на соответствие требованиям [интерфейсному контрольному документу ООО «СПУТНИКС»](#). Результаты проверки оформляются в виде формы PL-E ООО «СПУТНИКС». Все несоответствия требованиям должны быть указаны в соответствующей документации и оперативно исправлены путем выпуска новой ревизии комплекса.

5.3.3 R/QA-3 Производственный контроль

Все изделия в составе программно-аппаратного комплекса должны пройти визуальный контроль на наличие дефектов, электрический контроль печатных плат, электрический контроль паяных соединений, функциональные испытания. Электрический контроль производится по списку цепей, указанном в конструкторской документации. Функциональные испытания включают загрузку всех микропрограмм и запуск программ самодиагностики.

5.3.4 R/QA-4 Вибрационные испытания

Бортовой модуль полезной нагрузки должен пройти вибрационные испытания согласно ПИМ, предоставленным пусковым оператором.

5.3.5 R/QA-5 Климатические (термовакuumные) испытания

Бортовой модуль полезной нагрузки должен пройти термовакuumные испытания согласно ПИМ, предоставленным пусковым оператором.

5.3.6 R/QA-6 Испытания на совместимость с платформой МКА

Бортовой модуль полезной нагрузки должен пройти испытания на совместимость с платформой МКА согласно ПИМ, предоставленным ООО «СПУТНИКС». Испытания на совместимость включают:

- установку бортового модуля полезной нагрузки в платформу МКА и выполнение всех соединений;
- подачу питания на модуль ПН из бортовой сети;
- загрузку всех микропрограмм через бортовую сеть и запуск программ самодиагностики;
- выполнение всех указанных в XML-спецификации Houston телекоманд.

История изменений

ВЕРСИЯ	ДАТА	АВТОР	СПИСОК ИЗМЕНЕНИЙ
B1	26.06.2023	Петров А. Н.	Исправлены многочисленные ошибки и неточности.
B0	27.04.2023	Петров А. Н.	Документ приведен в соотв. стандарту IEEE 1233. Код документа изменен на YKSA-460001.
A0	18.08.2021	Петров А. Н.	Начальная версия.

Список недоработок

ВЕРСИЯ	СПИСОК НЕДОРАБОТОК
В1	– E/SP-1 : Не завершен раздел «Глоссарий».

Приложение А. Глоссарий

МКА *Синонимы: КА, спутник.* Малый космический аппарат.

Платформа МКА *Синонимы: платформа.* Комплект вспомогательных систем (система электропитания, радиосвязи, ориентации и т.п.) от стороннего поставщика, обеспечивающий все необходимые средства для функционирования ПН.

ПН *Синонимы: полезная нагрузка, модуль ПН.* Устройство или набор устройств КА, обеспечивающий выполнение задач миссии КА. Устанавливается на борт КА и интегрируется с платформой.

БМПН *Синонимы: Бортовой модуль полезной нагрузки.* См. полезная нагрузка.

АСПН *Синонимы: Аппаратный симулятор полезной нагрузки.* Набор ПО и оборудования, симулирующий внутреннее устройство КА и БМПН в условиях аэрокосмического класса. Функционально аналогичен БМПН.

Кластер микроконтроллеров *Синонимы: Кластер, кластер МК.* Набор микроконтроллеров, установленных на БМПН и выполняющих экспериментальные микропрограммы.

Экспериментальные микропрограммы *Синонимы: Микропрограммы кластера микроконтроллеров.* Микропрограмма, выполняющая какой-либо эксперимент на борту МКА. Разрабатывается учащимися аэрокосмических классов по методическим пособиям и загружается на борт по радиоканалу.

Результаты работы микропрограммы *Синонимы: Полезные данные, результаты работы кластера.* Любые данные, сгенерированные в ходе выполнения экспериментальной микропрограммы.

Приложение В. Перечень обязательных экспериментов на МКА

Эксперименты с платформой

Получение версии микропрограммы радиомодуля

Категория	Вводный эксперимент
Цели	Проверить корректность разработки, загрузки, выполнения микропрограммы путем отправки запроса версии микропрограммы радиомодуля.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с процедурами работы с МКА; – проверка работоспособности систем МКА.
Оборудование	Бортовой приемопередатчик

Получение напряжения солнечных батарей по осям

Категория	Вводный эксперимент
Цели	Проверить корректность разработки, загрузки, выполнения микропрограммы путем отправки нескольких сложных команд в бортовую сеть.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с процедурами работы с МКА; – проверка работоспособности систем МКА; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Бортовая СЭП

Получение сырых данных с бортовой ИНС

Категория	Навигация
Цели	Получить и обработать сырые данные датчиков бортовой ИНС (магнитометр, гироскоп, акселерометр); сравнить с эталонными значениями из контроллера системы ориентации.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с процедурами работы с МКА; – проверка работоспособности систем МКА; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Бортовая ИНС

Вычисление ориентации МКА по данным магнитометра

Категория	Навигация
Цели	Получить и обработать сырые данные бортового магнитометра; вычислить углы поворота МКА в магнитном поле Земли; сравнить с эталонными значениями из контроллера системы ориентации.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с алгоритмами, используемыми в космической навигации; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Бортовая ИНС

Вычисление приближенного местоположения МКА

Категория	Навигация
Цели	Получить точное время с бортового компьютера управления; передать на борт параметры орбиты в формате TLE; вычислить местоположение МКА по параметрам орбиты и времени.

Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с алгоритмами, используемыми в космической навигации; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Бортовые часы

Обнаружение границ бразильской магнитной аномалии

Категория	Исследование окружающей среды
Цели	Получить и обработать сырые данные бортового магнитометра; изучить материалы по теме; разработать алгоритм обнаружения аномалии; записать время прохождения границ; вычислить местоположение МКА по параметрам орбиты.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с алгоритмами, используемыми в космической навигации; – ознакомление пользователей с окружающей средой и проблемами освоения космоса; – оценка точности бортового магнитометра.
Оборудование	Бортовая ИНС; бортовые часы

Эксперименты с ПН

Съемка заданной местности с бортовой камеры

Категория	Дистанционное зондирование земли
Цели	Получить точное время с бортового компьютера управления; передать на борт параметры орбиты в формате TLE; вычислить местоположение МКА по параметрам орбиты и времени; выдать команду на съемку в заданном месте.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с алгоритмами, используемыми в космической навигации; – ознакомление пользователей с принципами дистанционного зондирования земли; – ознакомление пользователей с окружающей средой и проблемами освоения космоса;
Оборудование	Бортовая камера; бортовые часы

Исследование температурного режима на борту

Категория	Исследование окружающей среды
Цели	Получение температуры со всех термодатчиков на борту; определение нахождения на освещенной стороне Земли; анализ динамики нагрева МКА во время витка.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с окружающей средой и проблемами освоения космоса; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Датчики освещенности ПН; термодатчики ПН; бортовые часы

Вычисление приближенной ориентации МКА по датчикам освещенности

Категория	Навигация
------------------	-----------

Цели	Получить и обработать данные с солнечных датчиков; вычислить углы поворота МКА по данным датчиков; сравнить с эталонными значениями из контроллера системы ориентации.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с алгоритмами, используемыми в космической навигации; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	Бортовая ИНС; датчики освещенности ПН

Кластерная обработка информации

Категория	Системы управления
Цели	Объединение нескольких микроконтроллеров кластера для выполнения ресурсоемкой вычислительной задачи.
Решаемые задачи	– ознакомление пользователей с принципами распределенной обработки информации; – ознакомление с системами МКА.
Оборудование	–

Приложение Г. Оборудование платформы МКА

Компоновка КА

Основные системы МКА: система управления (бортовой компьютер), система ориентации, система связи, система электропитания, полезная нагрузка. На [рисунке Г.1 \(с. 28\)](#) показано 3D изображение КА.

Рисунок Г.1 — Изображение КА, ООО «СПУТНИКС»

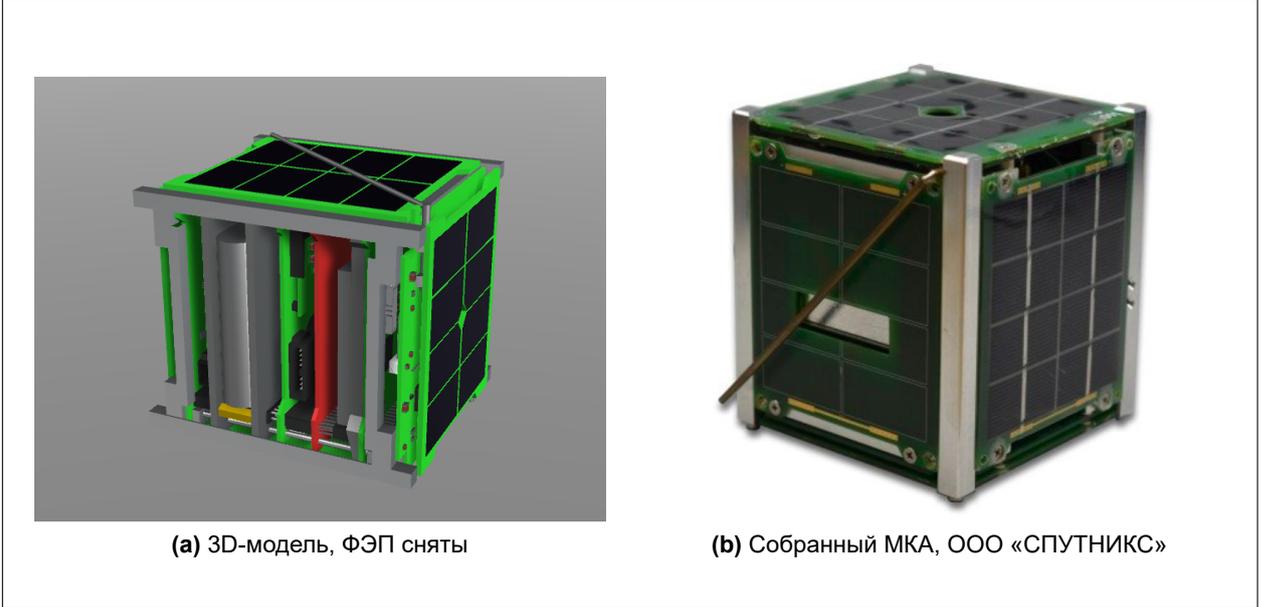


Схема деления и функциональная схема

На [рисунке Г.2 \(с. 28\)](#) показана схема функционального деления КА. Схема описывает взаимодействие между подсистемами КА и информационный обмен.

Рисунок Г.2 — Схема деления и функциональная схема



Система радиосвязи

Состав системы радиосвязи

Система радиосвязи представлена приемопередатчиком УКВ OrbiCraft Pro SXC-UHF-02 от ООО «СПУТНИКС».

Приемопередатчик УКВ-диапазона OrbiCraft Pro SXC-UHF-02 выполнен в виде платы, подключаемой к стеку плат основного блока электроники космического аппарата по разъему PC104. На плате приемопередатчика находится разъем SMA для подключения антенны и интерфейс развертывания антенны.

Основные характеристики:

- Полудуплексная связь через одну антенну;
- Единый радиоканал для телеметрии, телекоманд и сигналов радиомаяка;
- Работа на настраиваемой частоте из диапазона 434-436 МГц в полосе пропускания не шире 20 КГц;
- Выходная мощность – 1 Вт, чувствительность 119 дБм.

Командная и телеметрическая радиоперелинии

Параметры командной радиоперелинии:

- Режим работы – полудуплекс, uplink;
- Объемы данных – килобайты;
- Требуемая битовая скорость передачи – 4800 бит/с;
- Частотный диапазон UHF, 435-438 МГц, скорость до 9600 бит/с;
- Модуляция – GMSK;
- Мощности Борта – 1 Вт, GS – 10 Вт.

Параметры телеметрической радиоперелинии:

- Режим работы – полудуплекс, downlink;
- Объемы данных – килобайты;
- Требуемая битовая скорость передачи – 4800 бит/с;
- Частотный диапазон UHF, 435-438 МГц, скорость до 9600 бит/с;
- Модуляция – GMSK;
- Мощности Борта – 1 Вт, GS – 10 Вт.

Таблица Г.1 — Бюджет радиоперелинии

ПАРАМЕТР РАДИОКАНАЛА	ЗНАЧЕНИЕ
Мощность передатчика, $P_{прд}$	1 Вт (0 дБВт)
Коэффициент усиления передающей антенны, $G_{прд}$	2,2 дБи
Коэффициент усиления приёмной антенны, $G_{прм}$	11 дБи
Эффективный шум системы, T	4000К (36 дБК)
Суммарные потери при распространении сигнала, $L_{п}$	155,4 дБ
Потери в антенне передатчика, $L_{апрд}$	0,2 дБ
Потери в антенне приёмника, $L_{апрм}$	0,4 дБ
Константа Больцмана, k	-228,6 дБВ/Гц
Требуемое отношение энергии бита к мощности шума	10 дБ
Скорость передачи данных в канале	4800 бит/с (36,8 дБ/Гц)
Энергетический запас линии	3 дБ

Система управления и бортовой компьютер

Бортовой компьютер

Бортовой вычислительный модуль (БВМ) SXC-MB-04 предназначен для управления спутником и содержит следующий набор устройств:

- Слот установки процессорного модуля Raspberry CM3 с соответствующей системой электропитания;
- Автономный контроллер системы ориентации и стабилизации (опционально);
- Энергосберегающий микроконтроллер управления датчиками;

- Гироскоп и магнитометр;
- Блок управления электромагнитными катушками;
- Датчик температуры;
- Таймер реального времени с резервным источником питания;
- Система энергопитания;
- Система централизованного программирования и отладки программ.

Вычислитель Raspberry и все устройства подключены к бортовой шине CAN. К основному гнезду могут подключаться как модуль Raspberry Pi CM3, так и модуль Raspberry Pi CM1, имеющий меньшее энергопотребление.

Система электропитания

Система энергопитания SXC-PSU-03 управляет энергопитанием спутника от аккумуляторного блока SXC-BAT-03 и панелей солнечных батарей (обычно SXC-SSS-03, SXC-SSE-03, SXC-SGS-03 или SXC-SGE-03), которые могут подключаться в количестве до 14 штук. Контакт для зарядки внешних аккумуляторов находится на разъеме PC104 и, как правило, соединяется с разъемом USB сервисной панели SXC-SP-03. Для обмена данными с аккумуляторным блоком используется специальный интерфейс.

Солнечная панель Sputnix Orbicraft-Pro SXC-SGS-03 использует GaAs (арсенид галлия) фотоэлектрические преобразователи и встроенные электромагнитные катушки [5]. Всего на КА устанавливается 6 панелей, по одной с каждой стороны.

На [таблице Г.2 \(с. 30\)](#) указано энергопотребление всех систем КА.

Таблица Г.2 — Энергопотребление систем КА

ПОДСИСТЕМА	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ТРЕБОВАНИЯ К ПИТАНИЮ		
		ШИНА	МОЩНОСТЬ	ВРЕМЯ
Система электропитания	СЭП	7.4 В бат.	0.16 Вт	Всегда
Система ориентации и стабилизации	СОС	5.0 В	0.25 Вт	Всегда
Приемопередатчик УКВ	УКВ	5.0 В	0.20 Вт	Всегда
		7.4 В бат.	3.50 Вт	7 мин
Бортовой компьютер (Raspberry Pi)	БК	5.0 В	0.90 Вт	5 мин
Полезная нагрузка	ПН	5.0 В	0.50 Вт	Всегда

Графики на [рисунке Г.3 \(с. 30\)](#) показывают динамику энергопотребления аппарата на витке.

i

Расчеты производились для орбиты, указанной в [таблице Г.3 \(с. 31\)](#).

Электрические параметры:

$P_{LOAD} = 1.11 \text{ Вт}$, $I_{LOAD} = 0.15 \text{ А}$, $W_{BAT} = 39.00 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$, $P_{SA} = 4.00 \text{ Вт}$, $C_{BAT} = 5.00 \text{ А} \cdot \text{ч}$.

Рисунок Г.3 — Динамика энергопотребления

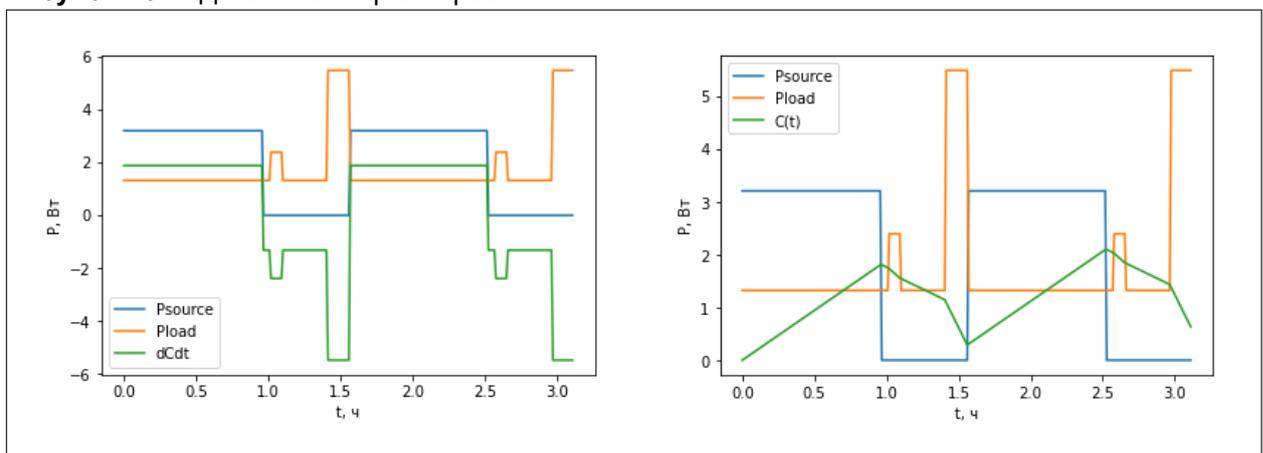


Таблица Г.3 — Параметры орбиты МКА

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕНИЕ
Тип орбиты	круговая, солнечно-синхронная
Угол наклонения	97 градусов
Высота орбиты	500 км
Период обращения КА	1,56 ч
Орбитальная скорость КА	7,58 км/с

Система ориентации

Система ориентации представлена встроенными в солнечные панели электромагнитными катушками и набором датчиков, см. [раздел 5.3.6 \(с. 29\)](#).