

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА БОРТУ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Т. Г. Орешенко✉, И. В. Назаров, А. С. Чапаева

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
г. Красноярск, Российская Федерация

Целью разработки является создание измерительной аппаратуры для мониторинга параметров солнечных батарей на борту малых космических аппаратов формата CubeSat, обеспечивающей точное снятие вольт-амперных характеристик, регистрацию данных о температуре и освещенности, а также их первичную обработку для передачи в центр управления. Цель представленной работы – разработка схемы нагрузочного устройства – определила необходимость постановки и решения основных задач: 1. Разработать электрическую схему измерительной аппаратуры, включая выбор подходящих компонентов и их интеграцию в единую систему. 2. Обеспечить стабилизацию параметров измерений с использованием корректирующих устройств и схем подавления помех. 3. Реализовать систему электропитания, обеспечивающую необходимый уровень напряжения для цифровых и аналоговых элементов при минимизации пульсаций. 4. Выбрать и интегрировать микроконтроллер, способный выполнять функции измерения, управления и передачи данных через бортовую шину CAN.

Ключевые слова: бортовое нагрузочное устройство, структурная схема, микроконтроллер, солнечные панели, микросхема.

Разработка измерительной аппаратуры требует решения нескольких ключевых задач, включая выбор подходящих компонентов, обеспечение устойчивости системы и интеграции с бортовыми устройствами. В основе проекта лежит создание системы для мониторинга параметров солнечных батарей на борту малых космических аппаратов CubeSat.

Для обеспечения устойчивости данной системы требуется провести моделирование устойчивости и рассчитать частотные характеристики схемы, скорректировать ее и разработать схему подключения.

Модель нагрузочного элемента представлена на рисунке 1а, частотные характеристики – на рисунке 1б.

Запас по фазе составляет всего 6 градусов, что указывает на наличие колебательных процессов в системе со значительным перерегулированием. Чтобы улучшить переходный процесс, в модель будет введено интегро-дифференцирующее корректирующее устройство (рисунок 2).

Получены частотные характеристики скорректированной системы (рисунок 3). Как видно из по-

лученных характеристик, запас по фазе увеличился до 123,5 градусов, что означает значительное улучшение параметров устойчивости нагрузочного элемента.

Солнечная батарея, в зависимости от подключенной нагрузки, функционирует либо как источник тока при низкой нагрузке, либо как источник напряжения при высокой. Поэтому нагрузочное устройство должно быть устойчивым к изменениям напряжения в цепи измеряемого источника, обеспечивая поддержание заданной силы тока. Важным условием является минимизация времени регулирования системы, так как процесс сбора данных сопровождается выделением мощности на транзисторе, генерируемой солнечной батареей. Единственным способом снизить общую выделяемую мощность является сокращение времени, необходимого для снятия характеристик. Для этого переходные процессы должны быть максимально быстрыми.

Пример переходного процесса с синусоидальным сигналом возмущения, приложенным к каналу сток-исток МОП-транзистора, при стабилизации силы тока на уровне 500 мА с использованием операционного усилителя, представлен на рисунке 4.

✉ veisver@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

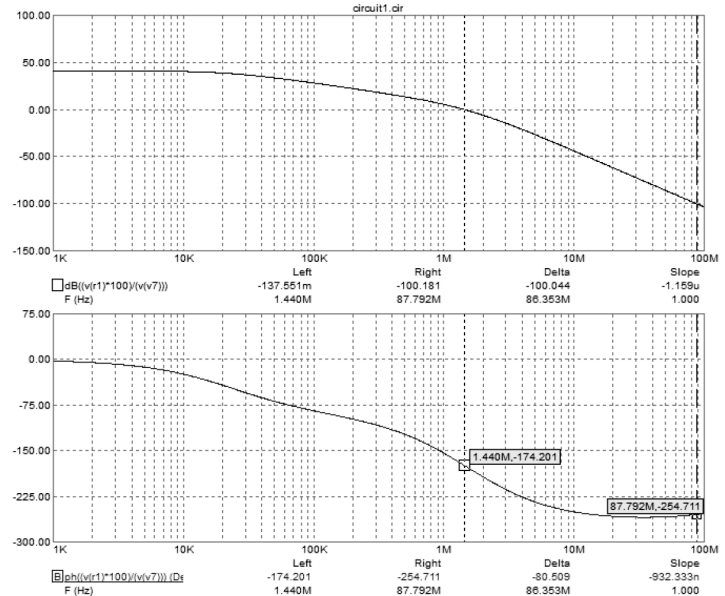
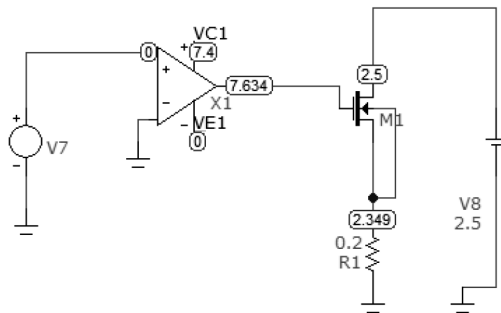


Рисунок 1: а – модель разомкнутого контура нагрузочного элемента в *MicroCAP 12*; б – частотные характеристики нескорректированного нагрузочного элемента

Система устойчива при изменении напряжения в цепи измеряемого источника, переходные процессы завершаются за 29 микросекунд.

Электрическая принципиальная схема скорректированного нагрузочного элемента представлена на рисунке 5.

Измерительная аппаратура должна быть встроена в общую архитектуру *ReshUCube*, включая систему электропитания, шину *CAN* и цифровые компоненты управления. Питание системы осуществляется от аккумуляторов, выдающих напряжение в диапазоне 6–8,4 В, что требует наличия встроенных преобразователей для питания цифровых и аналоговых устройств.

Для организации доступа микроконтроллера в *CAN*-шину необходима специальная микросхема-трансмисмиттер.

Для работы и прошивки микроконтроллера требуется реализовать электрическую схему с соответствующими спецификации компонентами, подключёнными на выводах микроконтроллера. Эти компоненты стабилизируют питание, исключают паразитные микротоки на выводах контроллера, переводят логику устройства в рабочее состояние.

Таким образом, структурная схема устройства приведена на рисунке 6.

Для разработки модуля управления солнечными батареями спутника требуется выбрать микроконтроллер, соответствующий требованиям по периферии, вычислительным возможностям, энергопотреблению и совместимости с системами спутника. Микроконтроллер должен обеспечивать формирование управляющих сигналов, сбор данных с электрической цепи солнечной батареи, первичную обработку данных и их передачу че-

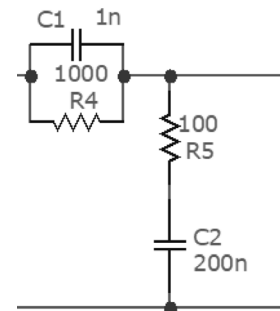


Рисунок 2. Модель корректирующего устройства

рез *CAN*-шину. Необходимы встроенные АЦП, ЦАП, контроллер *CAN*-шины либо возможность подключения внешних устройств через *SPI* или *PC*. Вычислительная мощность должна быть достаточной для базовой обработки данных, желательно наличие аппаратного ускорения математических операций. Дополнительно выбирается микросхема для работы с протоколом *CAN*, соответствующая требованиям по уровням напряжения и взаимодействию с системой электропитания. Завершающим этапом является разработка нагрузочного элемента и измерительной аппаратуры для анализа параметров солнечных панелей. Такой подход обеспечивает энергоэффективность, надежность и функциональность системы.

Таким образом, исходя из проведенного анализа доступных микроконтроллеров, следует выбрать *STM32f103c8t6*. Контроллер с поддержкой *CAN*-шины, 12-битным АЦП с разрешением до 1 миллиона выборок в секунду и встроенным датчиком температуры предоставляет высокую производительность для обработки данных в реальном времени. Два канала *SPI* и два канала *I2C* для под-

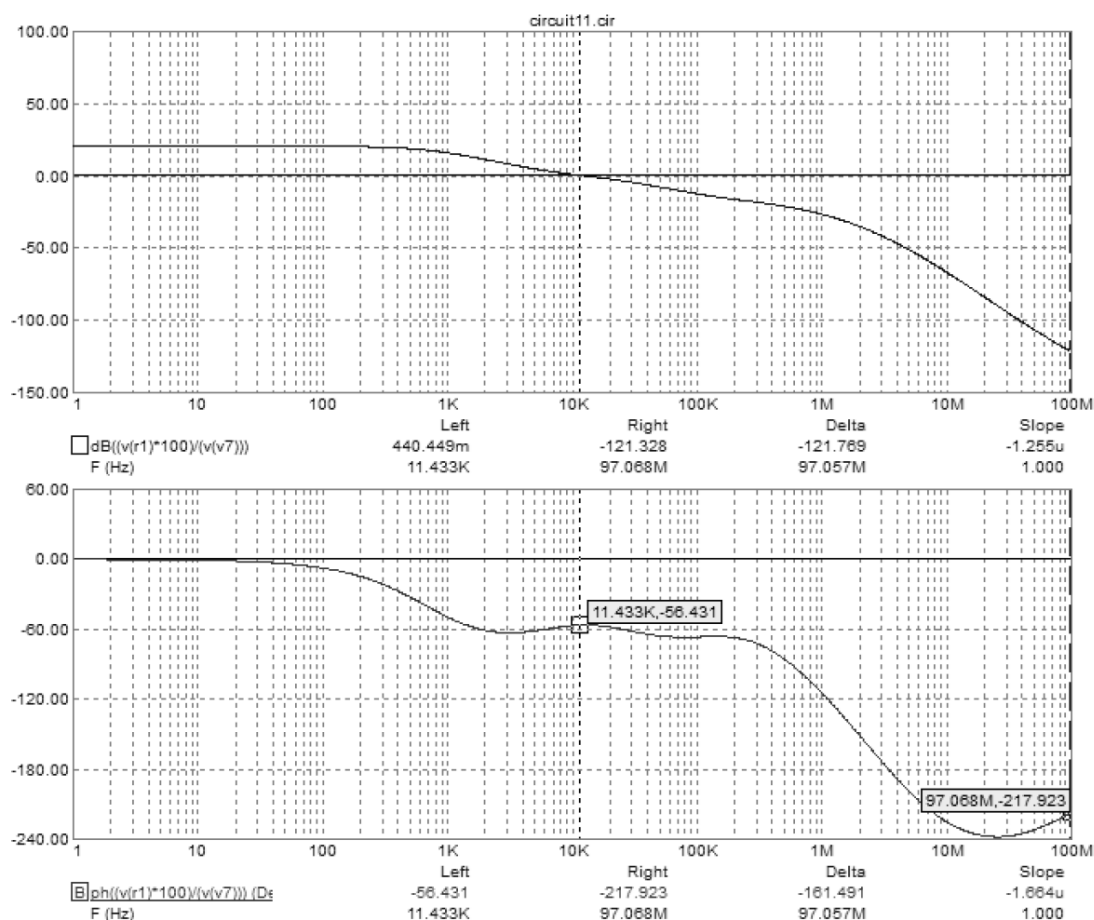


Рисунок 3. Частотные характеристики скорректированного нагрузочного устройства

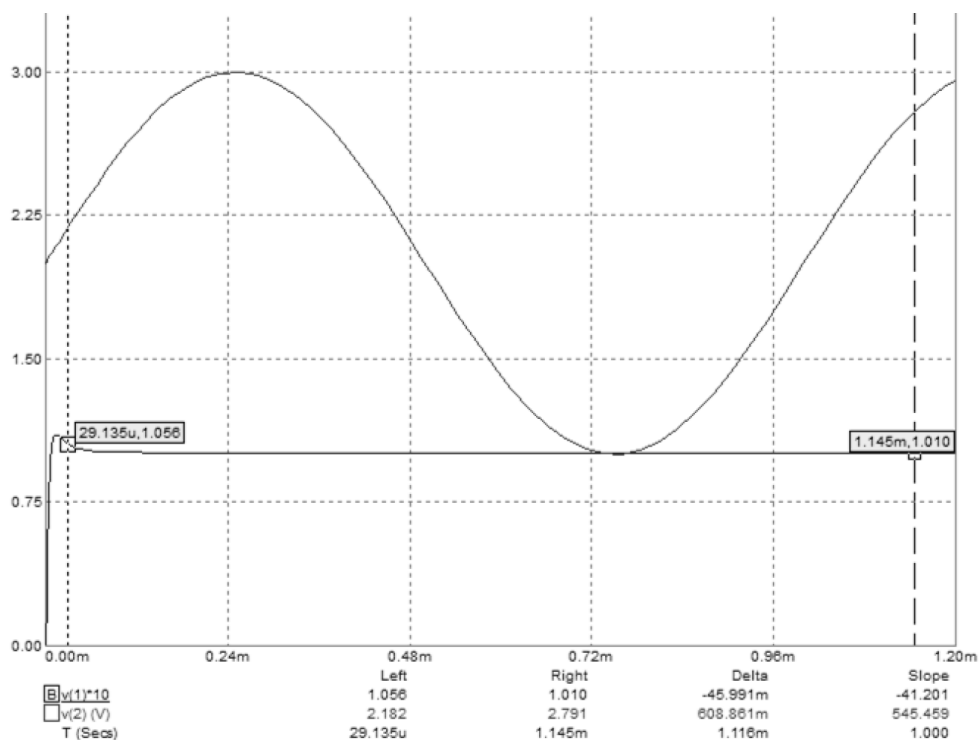


Рисунок 4. Переходные процессы скорректированного нагрузочного элемента

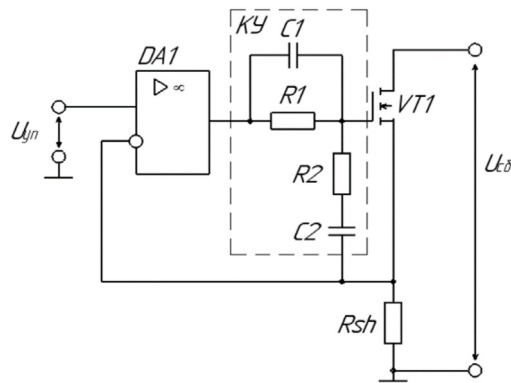


Рисунок 5. Нагрузочный элемент на основе полевого транзистора и операционного усилителя с корректирующим устройством: КУ – корректирующее устройство; R_{sh} – шунт; $U_{уп}$ – управляющий сигнал; $U_{сб}$ – напряжение солнечной батареи

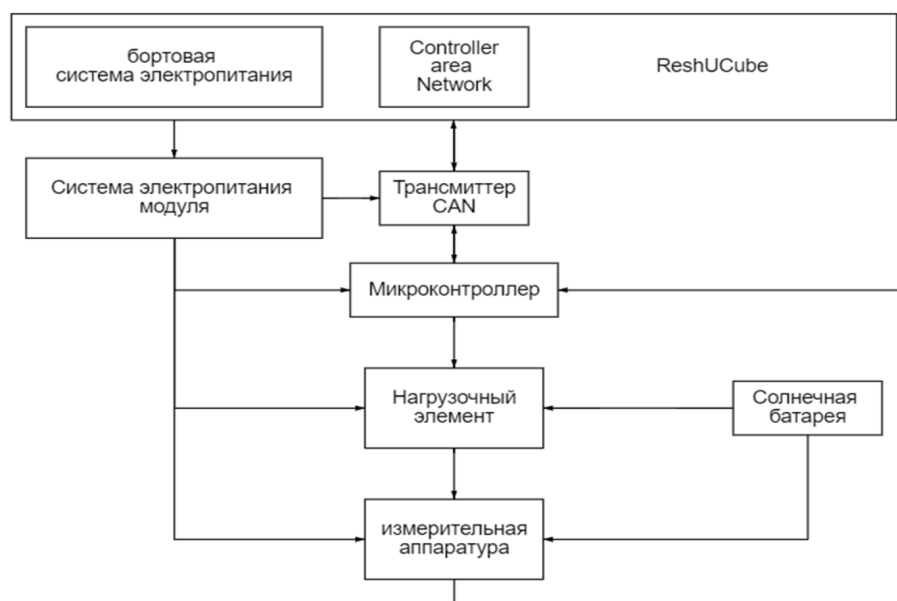


Рисунок 6. Структурная схема нагрузочного устройства

ключения внешних ЦАП обеспечивают гибкость системы. Ядро микроконтроллера, работающее на частоте до 72 МГц, обеспечивает необходимую вычислительную мощность для эффективного управления процессами и обработки данных с минимальными задержками. Также большинство цифровых устройств на *ReshUCube* функционирует именно на микроконтроллерах *STM32*.

Для выбранного микроконтроллера требуется реализовать минимальную схему обвязки. На четырех парах контактов питания необходимо установить конденсаторы для подавления паразитных микротоков и один общий конденсатор с большим значением емкости, для прошивки МК и проведения испытаний устанавливается кнопка, прерывающая питание МК для его перезагрузки.

Так как микроконтроллер не имеет внутреннего модуля ЦАП, следовательно, необходимо подключить внешний модуль, ввиду простоты подключения и управления используем микросхему *MCP4725*.

Для включения микроконтроллера в *CAN*-шину требуется подключить к нему приемопередатчик, предназначенный для передачи данных в протоколе *CAN*. В качестве этого устройства применим микросхему *TJA1042T*.

Для стабильной работы электроники, установленной на модуль нагрузочного устройства, следует обеспечить необходимый уровень питания при минимальных пульсациях в цепи питания. Как определено на схеме подключения трансивера, для его работы, помимо уровня напряжения в 3.3 В, необходима цепь питания с напряжением 5 В для работы в *CAN*-шине *ReshUCube*. Для стабилизации напряжения 3.3 и 5 В применим микросхемы *LM1117-3v3* и *LM1117-5* соответственно.

Для обеспечения стабильности выходного напряжения и улучшения переходных характеристик рекомендуется использовать танталовый конденсатор емкостью не менее 10 мкФ. Для минимизации помех в работе стабилизатора необходимо следовать рекомендациям по трасси-

ровке: токовые трассы должны быть широкими для снижения паразитной индуктивности, а контур обратной связи между V_{OUT} и GND должен быть максимально коротким. Для защиты схемы при замыкании V_{IN} на землю следует подключить внешний диод от V_{OUT} к V_{IN} , чтобы отвести импульсный ток от выходного конденсатора. Диод должен быть размещен вблизи соответствующих выводов микросхемы для повышения эффективности.

Схема нагрузочного элемента со стабилизацией выходного тока полевого транзистора приведена на рисунке 7.

В качестве дифференциального операционного усилителя использован $TL331IDBV$, в качестве

операционных усилителей измерительной аппаратуры использованы прецизионные операционные усилители $AD8571ARZ$.

Смоделированное нагрузочное устройство для малого космического аппарата изображено на рисунке 8.

Таким образом, схема нагрузочного элемента обеспечивает корректное моделирование рабочих режимов батарей, а встроенные системы стабилизации и подавления помех гарантируют надежность измерений в условиях открытого космоса. Программное обеспечение модуля реализует управление процессами измерения, первичную обработку данных и их передачу через шину CAN в бортовую систему спутника.

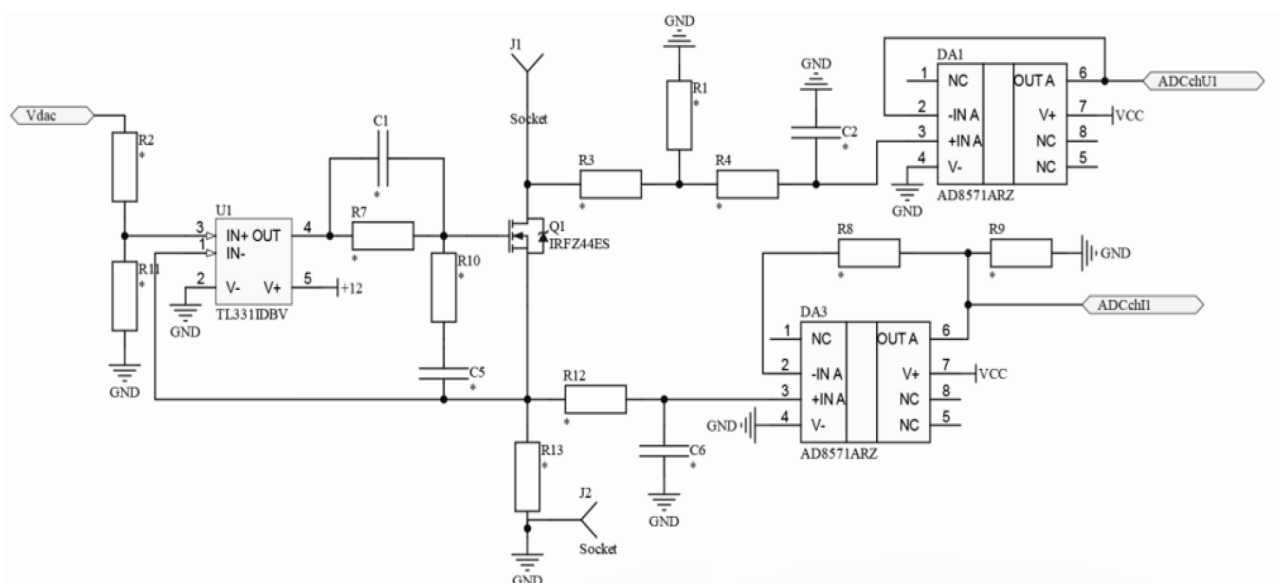


Рисунок 7. Схема нагрузочного элемента с измерительными устройствами

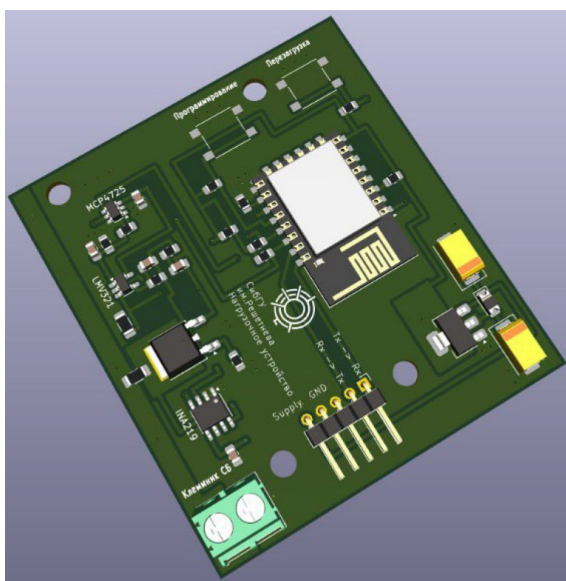


Рисунок 8. Смоделированное нагрузочное устройство

Список литературы

- [1] Повный А. Н. Характеристики солнечных батарей // Электрик Инфо Теория и практика. URL: <https://elektrik.info/main/energy/1550-harakteristiki-solnechnyh-batarey.html> (дата обращения: 13.02.24)
- [2] Основные особенности стандарта CubeSat: Научно-образовательный проект Space-Pi URL: <https://spacepi.space/wiki/article/chto-takoe-cube-sat-kubsat/> (дата обращения: 23.03.24)
- [3] Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: 12-е изд. Т. I. М.: ДМК пресс. 2008. 832 с.
- [4] Колтун М. М. Солнечные элементы // Планета Земля и Вселенная / автор вступительной статьи и примечаний Н. С. Беляев. М.: Наука; М.: БАН, 2017. 192 с.
- [5] Конструкция и варианты комплектации нагрузочных модулей // Электрик-Мастер. URL: <https://elektrik-master.ru/articles/operating-modules-construction-and-complentation.html> (дата обращения: 04.04.24)

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR MONITORING THE PARAMETERS OF SOLAR PANELS ON BOARD SMALL SPACECRAFT

T.G. Oreshenko, I.V. Nazarov, A.S. Chapaeva

*Siberian State University of Science and Technology
named after Academician M. F. Reshetnev
Krasnoyarsk, The Russian Federation*

The purpose of the development is to create measuring equipment for monitoring the parameters of solar panels on board small CubeSat spacecraft, providing accurate removal of voltage characteristics, registration of temperature and illumination data, as well as their primary processing for transmission to the control center. The purpose of the presented work is to develop a load device circuit. This goal has determined the need to set and solve the main tasks: 1. To develop an electrical circuit of measuring equipment, including the selection of suitable components and their integration into a single system. 2. To ensure the stabilization of measurement parameters using corrective devices and interference suppression circuits. 3. Implement a power supply system that provides the necessary voltage level for digital and analog elements while minimizing ripples. 4. Select and integrate a microcontroller capable of performing measurement, control and data transmission functions via the on-board CAN bus.

Keywords: on-board load device, block diagram, microcontroller, solar panels, microcircuit.

References

- [1] Povny A. N. Characteristics of solar panels // Electrician Info. Theory and practice. URL: <https://elektrik.info/main/energy/1550-harakteristiki-solnechnyh-batarey.html> (date of reference: 13.02.24)
- [2] The main features of the CubeSat standard: Scientific and educational project Space-Pi. URL: <https://spacepi.space/wiki/article/chto-takoe-cube-sat-kubsat/> (date of request: 23.03.24)
- [3] Titze W., Schenk K. Semiconductor Circuit Engineering: 12th Edition. Vol. I. M.: DMK press. 2008. 832 p.
- [4] Koltun M. M. Solar cells // Planet Earth and the Universe / author of the introductory article and notes N. S. Belyaev. M.: Nauka; M.: BAN, 2017. 192 p.
- [5] Design and configuration options for load modules // Electrician-Master. URL: <https://elektrik-master.ru/articles/operating-modules-construction-and-complentation.html> (date of application: 04.04.24)

Сведения об авторах

Орешенко Татьяна Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: автоматизация, управление сложными техническими системами, проектирование систем электропитания КА.

Назаров Илья Владимирович – аспирант кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: цифровые двойники, автоматизация, системы электропитания КА.

Чапаева Анна Сергеевна – студент кафедры «Системы автоматического управления» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева. Область интересов: автоматизация, электроника и электротехника.