

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN



**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ  
КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР  
ЖУРНАЛЫ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ И  
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION  
AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

**2025 (24) 4**

*қазан- желтоқсан*

ISSN 2708–2032 (print)  
ISSN 2708–2040 (online)

## БАС РЕДАКТОР:

**Исахов Асылбек Абдишимович** — есептеу теориясы саласында математика бойынша PhD доктор, "Компьютерлік ғылымдар және информатика" бағыты бойынша қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің Басқарма Төрағасы – Ректор (Қазақстан)

## БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЫ:

**Колесникова Катерина Викторовна** — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі проректор (Қазақстан)

## ҒАЛЫМ ХАТШЫ:

**Ипалакова Мадина Түлегеновна** — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі департамент директоры (Қазақстан)

## РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:

**Разак Абдул** — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессоры (Қазақстан)  
**Лучино Томмазо де Паолис** — Саленто Университеті (Италия) инновация және технологиялық инжиниринг департаменті AVR зертханасының зерттеу және әзірлеу бөлімінің директоры

**Лиз Бэкон** — профессор, Абертей Университеті (Ұлыбритания) вице-канцлерінің орынбасары

**Микеле Пагано** — PhD, Пиза Университетінің (Италия) профессоры

**Өтелбаев Мұхтарбай Өтелбайұлы** — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰҒА академигі, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының профессоры (Қазақстан)

**Рысбайұлы Болатбек** — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Есептеу және деректер ғылымдары департаментінің профессоры, Astana IT University (Қазақстан)

**Дайнеко Евгения Александровна** — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

**Дузаев Нуржан Токсужаевич** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті цифрландыру және инновациялар жөніндегі проректор (Қазақстан)

**Синчев Бахтгерей Куспанович** — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры (Қазақстан)

**Сейлова Нургуль Абдуллаевна** — техника ғылымдарының докторы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультетінің деканы (Қазақстан)

**Мұхамедиева Ардак Габитовна** — экономика ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті бизнес медиа және басқару факультетінің деканы (Қазақстан)

**Абдикаликова Замира Тұрсынбаевна** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

**Шильдибеков Ерлан Жаржанович** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті экономика және бизнес кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

**Дамелия Максумовна Ескендірова** — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

**Ниязгулова Айгуль Аскарбековна** — филология ғылымдарының кандидаты, доцент, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті медиакоммуникация және Қазақстан тарихы кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

**Айтмағамбетов Алтай Зуфарович** — техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының профессоры (Қазақстан)

**Бахтиярова Елена Азизбековна** — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

**Канибек Сансызбай** — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

**Тынымбаев Сахиябай** — техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік инженерия кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

**Алимереб Али Абд** — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

**Мохамед Ахмед Хамада** — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

**Янг Им Чу** — PhD, Гачон университетінің профессоры (Оңтүстік Корея)

**Талеуш Валдас** — PhD, Адам Мицкевич атындағы (Польша) университеттің проректоры

**Мамырбаев Оркен Жұмажанович** — PhD, КР ҒЖБМ Ғылым комитеті ақпараттық және есептеу технологиялары институты ӨМК директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Қазақстан)

**Бушув Сергей Дмитриевич** — техника ғылымдарының докторы, профессор, Украинаның "УКРНЕТ" жобаларды басқару қауымдастығының директоры, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті жобаларды басқару кафедрасының меңгерушісі (Украина)

**Белошицкая Светлана Васильевна** — техника ғылымдарының докторы, доцент, Astana IT University есептеу және деректер ғылымы кафедрасының профессоры (Қазақстан)

## РЕДАКТОР:

**Мрзабаева Раушан Жалиевна** — магистр, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің редакторы (Қазақстан)

---

Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Меншік иесі: АҚ «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» (Алматы қ.).

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігіне мерзімді баспасөз басылымын есепке қою туралы куәлік № KZ82VPY00020475, 20.02.2020 ж. берілген

Тақырып бағыты: ақпараттық технологиялар, ақпараттық қауіпсіздік және коммуникациялық технологиялар, әлеуметтік-экономикалық жүйелерді дамытудағы цифрлық технология.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Тираж: 100 дана.

Редакция мекенжайы: 050040 Алматы қ., Манас к., 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09.

E-mail: [ijict@iitu.edu.kz](mailto:ijict@iitu.edu.kz)

Журнал сайты: <https://journal.iitu.edu.kz>

© Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті АҚ, 2025

Журнал сайты: <https://journal.iitu.edu.kz> © Авторлар ұжымы, 2025

---

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Исахов Асылбек Абдиашимович** — доктор PhD по математике в области теории вычислимости, ассоциированный профессор по направлению "Компьютерные науки и информатика", Председатель Правления – Ректор Международного университета информационных технологий (Казахстан)

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

**Колесникова Катерина Викторовна** — доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

## УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

**Ипалакова Мадина Тулегеновна** — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, директор департамента по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Разак Абдул** — PhD, профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Лучио Томмазо де Паолис** — директор отдела исследований и разработок лаборатории AVR департамента инноваций и технологического инжиниринга Университета Саленто (Италия)

**Лиз Бэкон** — профессор, заместитель вице-канцлера Университета Абертей (Великобритания)

**Микеле Пагано** — PhD, профессор Университета Пизы (Италия)

**Отелбаев Мухтарбай Отелбайұлы** — доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, профессор кафедры математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Рысбайұлы Болатбек** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Astana IT University (Казахстан)

**Дайнеко Евгения Александровна** — PhD, профессор-исследователь кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Дузбаев Нуржан Токкужаевич** — PhD, ассоциированный профессор, проректор по цифровизации и инновациям Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Синчев Бахтгерей Куспанович** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Сейлова Нургуль Абадуллаевна** — кандидат технических наук, декан факультета компьютерных технологий и кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Мухамедиева Ардак Габитовна** — кандидат экономических наук, декан факультета бизнеса медиа и управления Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Абдикаликова Замира Турсынбаевна** — PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Шильдибеков Ерлан Жаржанович** — PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой экономики и бизнеса Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Дамеля Максумовна Ескендирова** — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Ниязгулова Айгуль Аскарбековна** — кандидат филологических наук, доцент, профессор, заведующая кафедрой медиакоммуникации и истории Казахстана Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Айтмагамбетов Алтай Зуфарович** — кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Бахтиярова Елена Ажибековна** — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Канибек Сансызбай** — PhD, ассоциированный профессор, профессор-исследователь кафедры кибербезопасности, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Тынымбаев Сахибай** — кандидат технических наук, профессор, профессор-исследователь кафедры компьютерной инженерии, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Алмисреб Али Абд** — PhD, ассоциированный профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Мохамед Ахмед Хамада** — PhD, ассоциированный профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Янг Им Чу** — PhD, профессор университета Гачон (Южная Корея)

**Талеуш Валлас** — PhD, проректор университета имен Адама Мицкевича (Польша)

**Мамырбаев Оркен Жумажанович** — PhD, заместитель директора по науке РГП Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки МНВО РК (Казахстан)

**Бушуев Сергей Дмитриевич** — доктор технических наук, профессор, директор Украинской ассоциации управления проектами «УКРНЕТ», заведующий кафедрой управления проектами Киевского национального университета строительства и архитектуры (Украина)

**Белошницкая Светлана Васильевна** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислений и науки о данных Astana IT University (Казахстан)

## РЕДАКТОР:

**Мрзабаева Раушан Жалиевна** — магистр, редактор Международного университета информационных технологий (Казахстан)

**Международный журнал информационных и коммуникационных технологий**

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Собственник: АО «Международный университет информационных технологий» (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ82VPY00020475, выданное от 20.02.2020 г.

Тематическая направленность: информационные технологии, информационная безопасность и коммуникационные технологии, цифровые технологии в развитии социально-экономических систем.

Периодичность: 4 раза в год.

Тираж: 100 экземпляров.

Адрес редакции: 050040 г. Алматы, ул. Манаса 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09.

E-mail: [ijict@iitu.edu.kz](mailto:ijict@iitu.edu.kz)

Сайт журнала: <https://journal.iitu.edu.kz>

© АО Международный университет информационных технологий, 2025

© Коллектив авторов, 2025

## EDITOR-IN-CHIEF

**Assylbek Issakhov** — PhD in Mathematics in Computability Theory, associate professor in “Computer Science and Informatics,” Chairman of the Board – Rector of the International Information Technology University (Kazakhstan)

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Kateryna Kolesnikova** — Doctor of Technical Sciences, professor, Vice-Rector for Research, International Information Technology University (Kazakhstan)

## ACADEMIC SECRETARY

**Madina Ipalakova** — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Director of the Research Department, International Information Technology University (Kazakhstan)

## EDITORIAL BOARD

**Abdul Razak** — PhD, professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Lucio Tommaso De Paolis** — Director of the R&D Department of the AVR Laboratory, Department of Engineering for Innovation, University of Salento (Italy)

**Liz Bacon** — Professor, Deputy Vice-Chancellor, Abertay University (United Kingdom)

**Michele Pagano** — PhD, Professor, University of Pisa (Italy)

**Mukhtarbay Otelbayev** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Bolatbek Rysbauly** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of the Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)

**Yevgeniya Daineko** — PhD, research professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Nurzhan Duzbayev** — PhD, associate professor, Vice-Rector for Digitalization and Innovation, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Bakhtgerai Sinchev** — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Nurgul Seilova** — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Computer Technologies and Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Ardak Mukhamediyeva** — Candidate of Economic Sciences, Dean of the Faculty of Business, Media and Management, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Zamira Abdikalikova** — PhD, associate professor, Head of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Yerlan Shildibekov** — PhD, associate professor, Head of the Department of Economics and Business, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Damilya Yeskendirova** — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Aigul Niyazgulova** — Candidate of Philological Sciences, Professor, Head of the Department of Media Communications and History of Kazakhstan, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Altai Aitmagambetov** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Yelena Bakhtiyarova** — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Kanibek Sansyzbay** — PhD, research professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Sakhybay Tynymbayev** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Professor, Department of Computer Engineering, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Ali Abd Almisreb** — PhD, associate professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Mohamed Ahmed Hamada** — PhD, associate professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

**Yang Im Chu** — PhD, Professor, Gachon University (South Korea)

**Tadeusz Wallas** — PhD, Vice-Rector, Adam Mickiewicz University (Poland)

**Orken Mamyrbayev** — PhD, Deputy Director for Science, RSE Institute of Information and Computational Technologies, Committee for Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Kazakhstan)

**Sergey Bushuyev** — Doctor of Technical Sciences, professor, Director of the Ukrainian Project Management Association “UKRNET,” Head of the Department of Project Management, Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine)

**Svetlana Beloshitskaya** — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)

## EDITOR

**Raushan Mrzabayeva** — Master of Science, editor, International Information Technology University (Kazakhstan)

«International Journal of Information and Communication Technologies»

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Owner: International Information Technology University JSC (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan, Information Committee No. KZ82VPY00020475, issued on 20.02.2020.

Thematic focus: information technology, digital technologies in the development of socio-economic systems, information security and communication technologies

Periodicity: 4 times a year.

Circulation: 100 copies.

Editorial address: 050040. Manas st. 34/1, Almaty. +7 (727) 244-51-09. E-mail: [ijict@iitu.edu.kz](mailto:ijict@iitu.edu.kz)

Journal website: <https://journal.iitu.edu.kz>

© International Information Technology University JSC, 2025

© Group of authors, 2025

INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Vol. 6. Is. 4. Number 24 (2025). Pp. 136–152

Journal homepage: <https://journal.iitu.edu.kz><https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.008>

ӘОЖ 629.78: 004.27

UDC 629.78: 004.27

## DEVELOPMENT AND BENCH TESTING OF AN ONBOARD CONTROL COMPLEX FOR CUBESAT-CLASS NANOSATELLITES

*A. Boranbayeva<sup>1,2,3\*</sup>, G. Serghazin<sup>4</sup>, Y. Nurgizat<sup>5</sup>, K. Bagitova<sup>6</sup>, T. Iliev<sup>7</sup>*

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty;

<sup>2</sup>Academician U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Machine Science, Kazakhstan, Almaty;

<sup>3</sup>Satbayev Kazakh National Technical Research University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>4</sup>M. Tynyshbaev ALT University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>5</sup>G. Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan;

<sup>6</sup>Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan;

<sup>7</sup>Angel Kanchev University of Ruse, Ruse, Bulgaria.

E-mail: [boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com](mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com)

**Anargul Boranbayeva** — 3rd-year PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, researcher, the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician O.A. Zholdasbekov, and senior lecturer, Satbayev Kazakh National Technical Research University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com](mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com),

<https://orcid.org/0000-0003-2221-9604>;

**Gani Serghazin** — PhD, associate professor, ALT University, Almaty, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0003-2762-473>;

**Yerkebulan Nurgizat** — PhD, G. Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0002-9712-5592>;

**Kalamkas Bagitova** — PhD, associate professor, Head of the Computer Science Department, Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0003-1587-1995>;

**Teodor Iliev** — PhD, professor, University of Ruse, Ruse, Bulgaria.

<https://orcid.org/0000-0003-2214-8092>.

© A. Boranbayeva, G. Serghazin, Y. Nurgizat, K. Bagitova, T. Iliev

**Abstract.** This work presents the development of an onboard control complex



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

(OBC) for CubeSat-class nanosatellites with emphasis on energy safety, verifiability, and fault tolerance. The architecture follows a “space–ground” functional split: on board, deterministic protections (threshold/hysteresis), state-of-charge (SoC) estimation via an Extended Kalman Filter, and a schedule executor run on an STM32H743 microcontroller supported by an external watchdog timer; on the ground, energy-balance forecasting and schedule optimization account for illumination and communication windows. The sensor suite leverages accessible COTS components (IMU, magnetometer, barometer), while attitude estimation combines point solutions (TRIAD/QUEST) with recursive refinement (MEKF/EKF). A two-tier storage subsystem-QSPI-NAND for critical logs and SD via SDIO for bulk telemetry-prioritizes writes and remains robust under power shortfalls. Bench tests confirmed the correctness of the start-up state machine, stable sensor I/O, and preservation of the “black box” under energy deficit. Planned next steps include finalizing the firmware, introducing a lightweight AI layer (primarily groundside), extended climatic/vibrodynamic and reliability testing, and cybersecurity hardening. The resulting platform provides a basis for practical deployment in 1U–3U missions with stringent mass and power budgets.

**Keywords:** nanosatellite, onboard control complex, attitude and navigation system, inertial-magnetic navigation, attitude estimation, microcontrollers, energy efficiency and power management

**For citation:** A. Boranbayeva, G. Serghazin, Y. Nurgizat, K. Bagitova, T. Iliev. Development and Bench Testing of an Onboard Control Complex for Cubesat-Class Nanosatellites// International journal of information and communication technologies. 2025. Vol. 6. No. 24. Pp. 136–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.008>.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

## CUBESAT ПІШІНДЕГІ НАНОСПУТНИКТЕР ҮШІН БОРТТЫҚ БАСҚАРУ КЕШЕНІН ДАЙЫНДАУ ЖӘНЕ СТЕНДТІК ТЕКСЕРУ

*А.Т. Боранбаева<sup>1,2,3\*</sup>, Г.Қ. Сергазин<sup>4</sup>, Е.С. Нұрғизат<sup>5</sup>, Қ.Б. Бағитова<sup>6</sup>, Т. Илиев<sup>7</sup>*

<sup>1</sup>Әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан;

<sup>3</sup>Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>4</sup>М. Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>5</sup>Г. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>6</sup>Х.Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>7</sup>Ангел Кынчев атындағы Русе университеті, Русе, Болгария.

E-mail: boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com

**Боранбаева Анаргүл** — Әл Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің 3-ші курс докторанты, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институтының ғылыми қызметкері, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан

E-mail: [boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com](mailto:boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-2221-9604>;

**Серғазин Ғани** — PhD, қауымдастырылған профессор, АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0003-2762-473>;

**Нұрғизат Еркебұлан** — PhD, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0002-9712-5592>;

**Багитова Қаламқас** — PhD, қауымдастырылған профессор, Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университетінің «Информатика» кафедрасының меңгерушісі, Атырау, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0003-1587-1995>;

**Илиев Теодор** — PhD, профессор, Русе университеті, Болгария

<https://orcid.org/0000-0003-2214-8092>.

© Т. Боранбаева, Ғ.Қ. Серғазин, Е.С. Нұрғизат, Қ.Б. Багитова, Т. Илиев

**Аннотация.** Жұмыс CubeSat форматына арналған борттық басқару кешенін (ББК) әзірлеуге арналған және энергетикалық қауіпсіздік, верификацияланғыштық пен ақауға төзімділікке басымдық береді. Архитектура «борт-жер» функцияларын бөлу қағидатына негізделген: бортта шекті/гистерезистік қорғаныстар, кеңейтілген Калман сүзгісі негізіндегі аккумулятордың зарядталу дәрежесін (SoC) бағалау және STM32H743 микроконтроллерінде сыртқы «watchdog»-таймермен орындалатын жоспарлар іске асырылған; жердегі контурда жарықтану мен байланыс терезелерін ескере отырып, энергия балансын болжау және жоспарларды оңтайландыру орындалады. Сенсорлық контур қолжетімді COTS-компоненттеріне (IMU, магнитометр, барометр) негізделген, ал бағдарды бағалау TRIAD/QUEST сияқты нүктелік алгоритмдерді MEKF/EKF рекурсивті әдістерімен ұштастырады. Екі деңгейлі деректер сақтау қосалқы жүйесі (сыни журналдар үшін QSPI-NAND және жаппай телеметрия үшін SDIO арқылы SD) жазуларды басымдықпен жүргізуді және энергия тапшылығы кезінде орнықтылықты қамтамасыз етеді. Стендтік сынақтар іске қосу автоматының дұрыстығын, датчиктермен тұрақты алмасуды және энергия тапшылығы жағдайында «қара жәшіктің» сақталуын растады. Сонымен қатар, микробағдарламаны аяқтау, жеңіл жасанды интеллект қабатын (негізінен жердегі жағында) енгізу, кеңейтілген климаттық-вибродинамикалық және сенімділік сынақтары, сондай-ақ киберқауіпсіздік шаралары жоспарланып



отыр. Ұсынылған платформа масса және энергия бюджеті қатаң шектелген 1U-3U миссияларында практикалық қолдануға негіз қалайды.

**Түйін сөздер:** наноспутник, борттық басқару кешені, бағдарлау және навигация жүйесі, инерциалды-магниттік навигация, бағдарды бағалау, микроконтроллерлер, энергия тиімділігі және энергияны басқару

**Дәйексөздер үшін:** Т. Боранбаева, Ғ.Қ. Серғазин, Е.С. Нұрғизат, Қ.Б. Багитова, Т. Илиев. Cubesat пішіндегі наноспутниктер үшін борттық басқару кешенін дайындау және стендтік тексеру// Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы. 2025. Том. 6. № 24. 136–152 бет. (Орыс тілі). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.008>.

**Мүдделер қақтығысы:** Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

## РАЗРАБОТКА И СТЕНДОВАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ ФОРМАТА CUBESAT

*А.Т. Боранбаева<sup>1,2,3\*</sup>, Ғ.К. Серғазин<sup>4</sup>, Е.С. Нурғизат<sup>5</sup>, Қ.Б. Багитова<sup>6</sup>, Т. Илиев<sup>7</sup>*

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан;

<sup>3</sup>Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

<sup>4</sup>Университет АЛТ имени М. Тынышбаева, Алматы, Казахстан;

<sup>5</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан;

<sup>6</sup>Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Казахстан;

<sup>7</sup>Русенский университет им. Ангела Кынчева, Русе, Болгария.

E-mail: boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com

**Боранбаева Анаргүль** — докторант 3-го курса, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, научный сотрудник, Институт механики и машиноведения имени академика О.А. Джолдасбекова, старший преподаватель, Казахский национальный технический исследовательский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

E-mail: boranbayeva.anargul.talgatkyzy@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-2221-9604>;

**Серғазин Гани** — PhD, ассоциированный профессор, университет АЛТ, Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-2762-473>;

**Нұрғизат Еркебулан** — PhD, Алматинский университет энергетики и связи

имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-9712-5592>;

**Багитова Каламкас** — PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой информатики, Атырауский университет имени Халела Досмухамедова, Атырау, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-1587-1995>;

**Илиев Теодор** — PhD, профессор, Русенский университет, Русе, Болгария

<https://orcid.org/0000-0003-2214-8092>.

© .Т. Боранбаева, Ф.Қ. Серғазин, Е.С. Нұрғизат, Қ.Б. Багитова, Т. Илиев

**Аннотация.** Работа посвящена разработке бортового комплекса управления (БКУ) для наноспутников формата CubeSat с акцентом на энергетическую безопасность, верифицируемость и отказоустойчивость. Предложена архитектура с разделением функций между бортом и наземным контуром: на борту реализованы детерминированные механизмы защиты (порог/гистерезис), оценка степени заряженности аккумулятора на основе расширенного фильтра Калмана и исполнитель расписаний на микроконтроллере STM32H743 с внешним сторожевым таймером; на земле - прогноз энергетического баланса и оптимизация расписаний с учётом освещённости и окон связи. Сенсорный контур построен на доступных COTS-компонентах (IMU, магнитометр, барометр), а оценка ориентации комбинирует точечные алгоритмы (TRIAD/QUEST) с рекурсивным уточнением (MEKF/EKF). Двухуровневая подсистема хранения (QSPI-NAND для критических журналов и SD по SDIO для массивной телеметрии) поддерживает приоритизацию записей и устойчивость к энергетическим просадкам. Стендовые испытания подтвердили корректность конечного автомата запуска, стабильный обмен с датчиками и сохранность «чёрного ящика» при дефиците энергии. Обсуждаются планируемые шаги по завершению прошивки, внедрению лёгкой ИИ-прослойки (преимущественно на наземной стороне), расширенным климато-вибродинамическим и надёжностным тестам, а также кибербезопасности. Представленная платформа формирует основу для практического применения в миссиях 1U-3U с жёсткими ограничениями по массе и энергобалансу.

**Ключевые слова:** наноспутник, бортовой комплекс управления, система ориентации и навигации, инерциально-магнитная навигация, оценка ориентации, микроконтроллеры, энергоэффективность и управление энергией

**Для цитирования:** Т. Боранбаева, Ф.Қ. Серғазин, Е.С. Нұрғизат, Қ.Б. Багитова, Т. Илиев. Разработка и стендовая верификация бортового комплекса управления для наноспутников формата cubesat//Международный журнал информационных и коммуникационных технологий. 2025. Т. 6. No. 23. Стр. 136–152. (На русс.). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.008>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

## Введение

За последние два десятилетия формат CubeSat стал одним из ключевых драйверов «демократизации» космической деятельности: стандартизация механики и интерфейсов, удешевление микроэлектроники и расширение доступа к пускам позволили университетам, НИИ и технологическим компаниям реализовывать научные и прикладные миссии в сжатые сроки и с умеренными бюджетами (Poghosyan et al., 2017; Liddle et al., 2020; Nieto-Peroy et al., 2019). При этом специфические факторы низких околоземных орбит (LEO) - неоднородности и вариации плотности термосферы, аэродинамические возмущения, гравитационные и магнитные поля - формируют повышенные угловые ускорения, как следствие, сокращённый срок активного существования малых космических аппаратов (КА) по сравнению с аппаратами большого класса (Belokonov et al., 2018). Масштабирование числа запусков и переход к созвездиям усиливают требования к предсказуемости энергетики, устойчивости к отказам и проверяемости критических функций бортовой аппаратуры уже на этапах проектирования и стендовой отработки (Rigo et al., 2022).

Для аппаратов формата 1U-3U бортовой комплекс управления (БКУ) должен, как минимум, обеспечивать: (i) надёжный старт/перезапуск и базовую отказоустойчивость, (ii) устойчивое определение и управление ориентацией на базе бюджетных датчиков, (iii) энерго-безопасное планирование включений подсистем при ограниченном энергобалансе, (iv) детерминированность и верифицируемость алгоритмов с учётом ограниченной радиационной стойкости COTS-элементной базы. Классический «онборд-центристский» подход, когда все интеллектуальные функции переносятся на борт, повышает вычислительные и энергетические риски и усложняет верификацию. В качестве альтернативы требуется архитектура с жёстко детерминированной, проверяемой бортовой логикой и вынесением ресурсоёмких задач в наземный контур (Finance et al., 2021).

В данной работе предложен БКУ для CubeSat, реализующий указанную парадигму разделения: на борту - порогово-гистерезисные защиты, оценка степени заряженности аккумулятора (SoC) на базе расширенного фильтра Калмана и исполнитель расписаний на микроконтроллере STM32H743 в сочетании с внешним сторожевым таймером; на земле — прогноз энергетического баланса и оптимизация расписаний с учётом освещённости и окон связи. Навигация строится на совмещении бюджетных сенсоров (IMU LSM6DSV32, магнитометр/акселерометр LSM303AGR, резервный барометр BMP585 для стендовой калибровки и гермоконтроля), а оценка ориентации - на детерминированных алгоритмах (TRIAD/QUEST) с рекурсивным уточнением (MEKF/EKF), что соответствует современной практике малых КА (Finance et al., 2021; Dos Santos et al., 2021). Двухуровневая подсистема хранения (QSPI-NAND для прошивок и «чёрного ящика», SD по SDIO для массивной телеметрии) поддерживает приоритизацию журналирования и энерго-адаптивные режимы записи.

Предложенный разделённый контур „Земля ↔ Борт“ снижает сложность верификации, повышает управляемость эксплуатацией и обеспечивает энергобезопасность при жёстких ресурсных ограничениях (Nieto-Peroy et al., 2019; Finance et al., 2021; Dos Santos et al., 2021).

### **Материалы и методы**

БКУ наноспутника проектировался как интегрированная система сбора и предобработки телеметрии, управления энергетикой, оценки и управления ориентацией (ADCS/AOCS), а также исполнения команд и расписаний. Для аппаратов форматов 1U–3U основным конструкторским ограничением выступают ресурсы мощности и тепла, поэтому архитектурные решения выбирались с приоритетом минимизации потребления, предсказуемой отказоустойчивости и проверяемости алгоритмов при использовании компонентной базы класса COTS. В рамках обзора существующих подходов были рассмотрены три доминирующие траектории развития ОВС/OBDH: MCU-ориентированные решения на малопотребляющих микроконтроллерах, гибриды CPU+FPGA с реконфигурируемой логикой и, наконец, системы на базе MPU/SoC (Linux-класс). Практика показывает, что для 1U–3U наилучший баланс «производительность/Вт/верифицируемость» обеспечивают контроллерные решения (STM32, MSP430 и аналоги), тогда как гибриды CPU+FPGA оправданы при повышенных требованиях к онборд-обработке и радиационному смягчению, а Linux-класс целесообразен в конфигурациях 6U+ с насыщенными полезными нагрузками (Villela et al., 2019; de Melo et al., 2020; Ali et al., 2014; Sabogal et al., 2020).

Ключевым методологическим принципом стала совместная проработка энергетической подсистемы и БКУ. Это означает приоритизацию критических журналов («чёрного ящика»), аппаратные ограничения токов и «мягкий пуск» тяжёлых линий, а также энерго-обусловленное планирование включений радиолинии и полезной нагрузки. Решения обосновывались на основе системного профилирования потребления и микробенчмаркинга целевого микроконтроллера под реальные режимы ADCS и телеметрии (de Melo et al., 2020; Ali et al., 2014; Sabogal et al., 2020). Для повышения живучести в составе БКУ предусмотрены внешние сторожевые таймеры, порогово-гистерезисные защиты, «безопасные» конфигурации по умолчанию и строго заданная последовательность старта; на уровне ПО применяются автоматизированные стресс- и fuzz-тесты полётного ПО (подтвердившие эффективность, в частности, в проектах SUCHAI), а также стендовая характеристика контуров OBDH под типовые отказные сценарии (Gutierrez et al., 2021; Arseno et al., 2019).

Целевая архитектура реализована вокруг микроконтроллера с насыщенным набором интерфейсов QSPI/SDIO/USB-C/CAN/UART/SPI. Сенсорный контур включает инерциальный модуль (акселерометр и гироскоп), магнитометр, барометр и GPS-приёмник; по каждой оси предусмотрены каналы управления исполнительными механизмами, а также световая индикация



технологических состояний. Подсистема памяти двуслойная: QSPI-FLASH/NAND отведена под прошивки и высоконадёжное журналирование («чёрный ящик»), тогда как карта SD, подключённая по 4-битному SDIO, используется для массивной телеметрии и «сырых» данных. Тактовая база и RTC формируются внешними резонаторами с короткой трассировкой и охранными земляными кольцами. На уровне алгоритмов бортовая часть строго детерминирована: реализованы порогово-гистерезисные защиты, оценка степени заряженности аккумулятора (SoC) на расширенном фильтре Калмана и исполнитель расписаний. Вычислительно затратные задачи - прогноз энергетического баланса и оптимизация расписаний с учётом освещённости и окон связи - вынесены в наземный контур, что упрощает доказательство корректности и снижает риски перегрузки по мощности (Villela et al., 2019; de Melo et al., 2020; Ali et al., 2014; Sabogal et al., 2020).

Обобщённая архитектура БКУ с разнесением интерфейсных доменов, двухуровневой памятью (QSPI-NAND/SD по SDIO), тактовой базой (HSE/LSE) и сенсорным контуром (IMU, магнитометр, барометр, GPS-приёмник) приведена на рисунке 1.

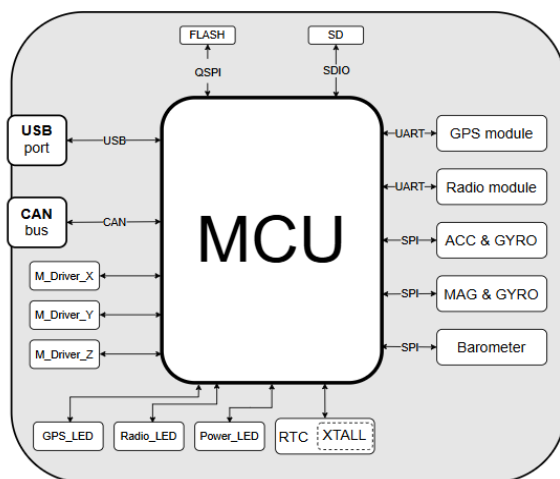


Рис. 1. Архитектура бортового комплекса управления

Контур ориентации построен на сочетании детерминированных оценщиков (TRIAD/QUEST) с рекурсивным уточнением (MEKF/EKF). Такая комбинация обеспечивает требуемую точность при умеренной вычислительной сложности и хорошо согласуется с опытом орбитальной эксплуатации на малых КА (например, UVSQ-SAT и последующие исследования). Для снижения дрейфа гироскопа реализована кросс-проверка показаний IMU и магнитометра; барометр применяется в наземных калибровках и для контроля герметичности при стендовых испытаниях (Takátsy et al., 2022). Последовательность запуска задана как конечный автомат: после стабилизации питания и получения PWR\_

GOOD формируется шина 3,3 В и стартует MCU при отключённых «тяжёлых» линиях; далее выполняются самотест и считывание телеметрии, инициализация датчиков, после чего энергоёмкие подсистемы разрешаются условно - по SoC, освещённости, термостанам и прогнозу энергобаланса. Любая аномалия ведёт к немедленному снятию тяжёлых линий и переходу в Safe Mode (Villela et al., 2019; Takátsy et al., 2022).

Конструкторско-технологические решения направлены на обеспечение ЭМС и предсказуемости параметров. Печатная плата выполнена на 4-6 слоях с контролируемыми импедансами по высокоскоростным шинам SDIO/QSPI/USB/CAN и разделением аналоговой и цифровой «земель». В чувствительных цепях применены LC/П-фильтры, на внешних портах - ESD-защита (TVS), на силовых линиях - шунты и датчики тока. Для HSE/LSE обеспечены минимальная длина трасс и локальная развязка (0,1–1,0 мкФ) непосредственно у корпусов. Технология монтажа предполагает использование низколетучих флюсов с обязательной отмывкой и сушкой; высокие компоненты фиксируются (steking), при необходимости наносится конформное покрытие, а кабельные жгуты и разъёмы дополнительно крепятся для повышения вибростойкости (Ali et al., 2014).

Методика верификации включает последовательные функциональные проверки «без АКБ» (с ограничением входного тока) и «с АКБ» (циклы заряд/разряд, UV-lock), климато-механические испытания (термо- и виброциклы), а также кампанию HIL с моделированием динамики ADCS. Дополнительно выполняется профилирование энергопотребления по режимам (ожидание, навигация, приём/передача, работа полезной нагрузки, комбинированные сценарии) и автоматизированный fuzz-тестинг каналов команд/телеметрии и драйверов. Для ADCS планируются количественные метрики - RMS-ошибка ориентации, спектральные характеристики шумов и задержки вычислительного конвейера; для памяти - устойчивость к «brown-out», скорость и надёжность записи в NAND/SD и сохранность «чёрного ящика» в отказных сценариях (Gutierrez et al., 2021; Arseno et al., 2019; Takátsy et al., 2022). Такой план испытаний обеспечивает воспроизводимую оценку функциональной полноты и устойчивости предложенной архитектуры в условиях, близких к эксплуатационным.

В завершение методической части фиксируем принятые допущения по энергобалансу (рабочие шины 3,3 В и 5 В; длительность витка 90 мин с освещённостью ~60 мин и тенью ~30 мин; доли активности подсистем - согласно стендовому профилю). Сводные расчётные значения токов/мощностей по режимам, а также оценка средней мощности и энергии на виток приведены в таблице 1.

## Результаты

В настоящей главе представлены ключевые результаты разработки и стендовой отработки БКУ наноспутника формата CubeSat.



Таблица 1. Энергобюджет по режимам (пример для 1U–3U, 3.3 В/5 В шина)

Режим	I <sub>3,3В</sub> , мА	P <sub>3,3В</sub> , Вт	I <sub>5В</sub> , мА	P <sub>5В</sub> , Вт	Мощность, Вт	Доля времени (день/ночь)	Средний вклад, Вт
Базовый «Ожидание»	120	0,396	40	0,200	0,596	100 % / 100 %	0,596
ADCS (добавка)	+80	+0,264	+0	+0,000	+0,264	30 % / 20 %	0,069
Радио RX (добавка)	+0	+0,000	+100	+0,500	+0,500	10 % / 6 %	0,066
Радио TX (добавка)	+0	+0,000	+300	+1,500	+1,500	5 % / 0 %	0,050
Полезная нагрузка (добавка)	+0	+0,000	+400	+2,000	+2,000	15 % / 0 %	0,200
Safe Mode (альт. режим)	50	0,165	0	0,000	0,165	-	-
Средняя мощность за виток	-	-	-	-	-	-	≈0,98–1,00
Энергия за виток (90 мин = 1,5 ч)	-	-	-	-	-	-	≈1,47 Вт·ч

Для фокусировки на наиболее информативных аспектах оставлены шесть базовых иллюстраций, отражающих системную интеграцию, сенсорный контур, подсистему хранения, ядро управления, механизм живучести и реализацию печатной платы. Интегральные оценки мощности и энергии по режимам представлены в таблице 1, что позволяет сопоставлять стендовые профили потребления с ограничениями энергетического баланса на виток.

На рисунке 2 приведена укрупнённая структурная схема БКУ с привязкой интерфейсов и каналов питания. Центральным элементом является микроконтроллер (MCU), к которому по шинам QSPI и SDIO подключены энергетически разнесённые носители долговременного хранения: QSPI-FLASH (прошивки, «чёрный ящик») и SD (bulk-телеметрия). Сенсорный контур (IMU, магнитометр, барометр, GPS-приёмник) и коммуникационные устройства (резервная радиолития, межмодульная шина) подключены по UART/SPI/CAN с соблюдением требований электромагнитной совместимости и ESD-защиты. С учётом допущений таблице 1 средняя мощность за виток составила ~1.0 Вт, при этом доминирующий вклад формирует полезная нагрузка (~0.20 Вт), далее - ADCS и приёмный тракт (по ~0.07 Вт каждый), тогда как передача занимает ~0.05 Вт благодаря малой доле активности. Такая декомпозиция уменьшает сцепление критических и некритических цепей и упрощает верификацию отказных сценариев.

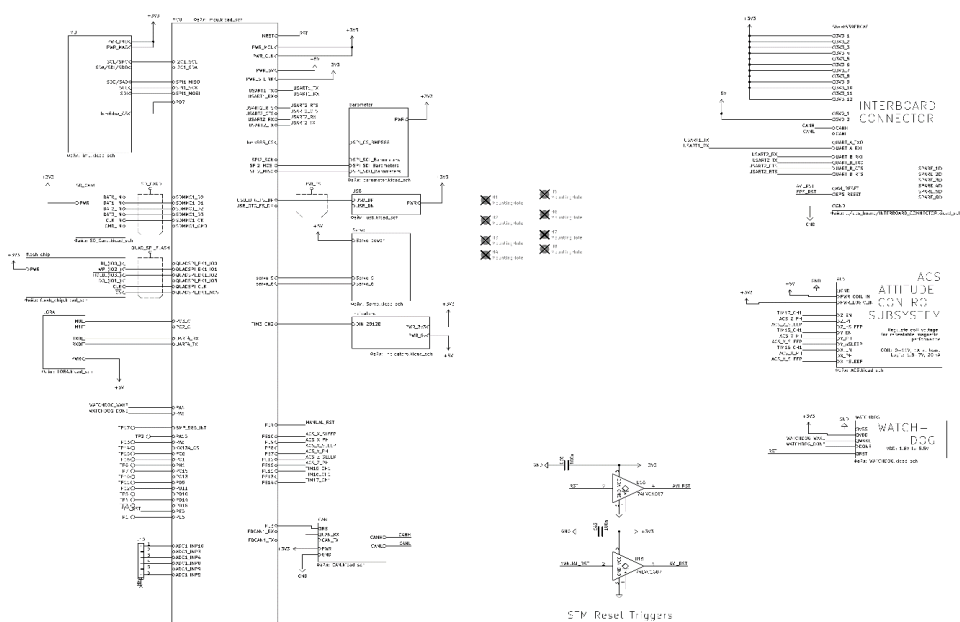


Рис.2. Общая структурная диаграмма подключения функциональных блоков БКУ

Типовое включение LSM6DSV32 (акселерометр/гироскоп) и LSM303AGR (магнитометр) показано на рисунке 3. Линии SPI/I<sup>2</sup>C оснащены подтягивающими резисторами и RC-фильтрами; питание чувствительных датчиков выполнено от малошумящего LDO с локальной развязкой 0,1–1,0 мкФ у корпусов. Обеспечено физическое разнесение магнитометра относительно токонесущих трасс и силовых ключей для минимизации магнитных наводок. В ходе стендовых испытаний подтверждено соответствие спектральных характеристик шумов паспортным значениям при выбранных режимах дискретизации, а также корректность кросс-коррекции дрейфа гироскопа по данным магнитометра.

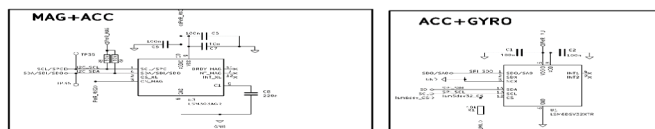


Рис. 3. Типовая схема подключения IMU LSM6DSV32 и магнитометра LSM303AGR

Интегральная схема подсистемы хранения представлена на рисунке 4: 4-битный SDIO → SD-карта с ESD-защитой сигнальных линий и согласованием импедансов, а также QSPI → SLC-NAND с линиями WP#/HOLD# и отдельной фильтрацией питания. Программная логика использует двухуровневый буфер ОЗУ и приоритизацию сбросов: критические события немедленно записываются в NAND, тогда как телеметрия агрегируется на SD. Такой режим обеспечил сохранность аварийных дампов при имитации дефицита энергии за счёт снижения частоты операций записи на SD.

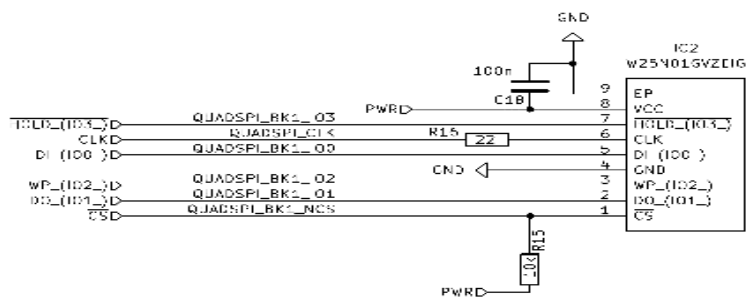


Рис. 4. Типовая схема подключения NAND Флеш памяти по интерфейсу qspi

На рисунке 5 демонстрируется включение STM32H743VIT с внешним тактированием (HSE 25 МГц, LSE 32,768 кГц) и интерфейсом SWD. Трассировка резонаторов выполнена по короткому пути с охранными земляными кольцами; для HSE соблюдены требования по нагрузочным конденсаторам. Подтверждена надёжная инициализация контроллера в холодном/тёплом старте, и корректная работа FPU при целевой частоте до 400 МГц.

Механизм живучести реализован на базе внешнего сторожевого таймера TPL5010 (на рисунке 6). Окно наблюдения задаётся резистивной матрицей; «пинок» формируется по линии WAKE, аварийный сброс - по RST. На стенде таймер устойчиво детектировал зависания пользовательского потока и инициировал восстановление работоспособности; собственное потребление узла соответствовало нанопотреблению, что критично для длительного пребывания в Safe Mode.

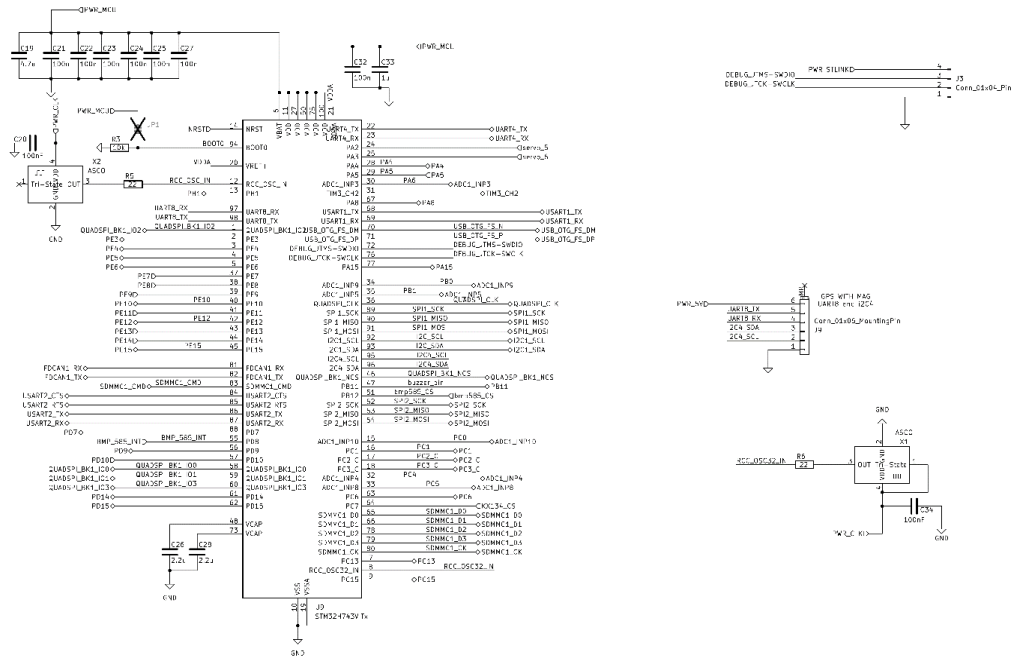


Рис. 5. Типовая схема подключения MCU STM32H743VIT с источниками внешнего тактирования (HSE, LSE)

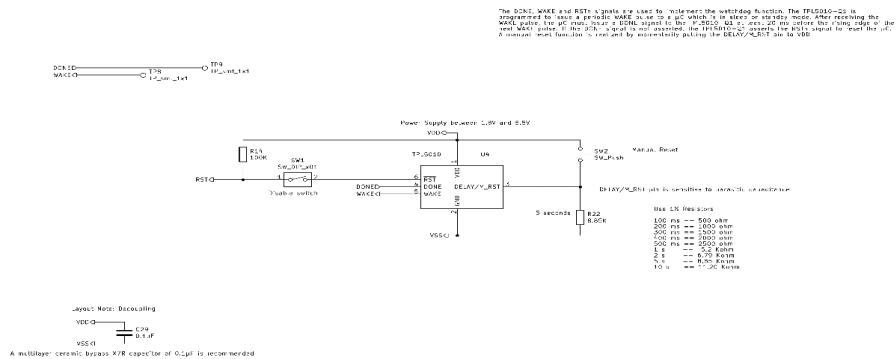
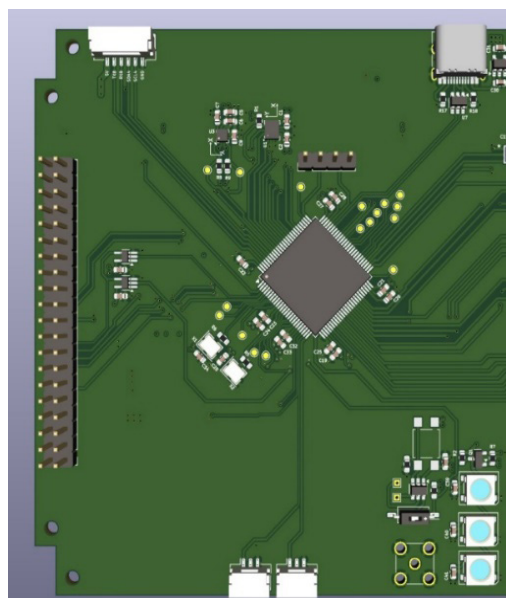


Рис. 6. Типовая схема включения внешнего сторожевого таймера TPL5010

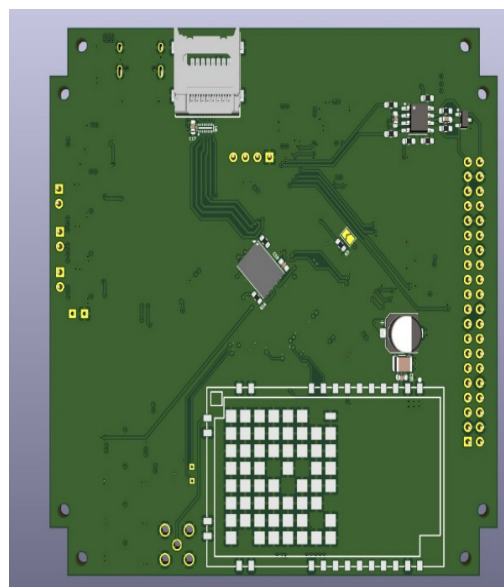
Общий вид печатной платы представлен на рисунке 7. Плата выполнена на 4–6 слоях с контролируруемыми импедансами по высокоскоростным шинам



(SDIO/QSPI/USB/CAN). Обеспечены разделение аналоговой и цифровой «земель», короткие тракты HSE/LSE, а также экранирование областей датчиков от доменов с высокими  $dV/dt$ . Размещение RTC и индикаторов выполнено с учётом минимизации паразитных наводок на чувствительные цепи.



(a)



(б)

Рис. 7. Общий вид печатной платы БКУ: (а) верхняя сторона; (б) нижняя сторона

Проведённая функциональная верификация подтвердила корректность ключевых сценариев работы. Последовательность запуска реализуется строго по конечному автомату: после стабилизации входного питания и получения PWR\_GOOD подаётся шина 3,3 В, стартует MCU при отключённых «тяжёлых» линиях, выполняются самотест и считывание телеметрии, далее инициализируются датчики; разрешение энергоёмких подсистем происходит условно - по состоянию аккумулятора (SoC), освещённости, температурным ограничениям и прогнозу энергетического баланса. Канал обмена с сенсорами (IMU, магнитометр, барометр) показал стабильность: спектральные характеристики шумов соответствуют паспортным данным, встроенные цифровые фильтры IMU функционируют корректно. Подсистема хранения данных продемонстрировала требуемую устойчивость: критические события надёжно фиксируются в QSPI-NAND при снижении частоты сбросов на SD в условиях энергетического дефицита - «чёрный ящик» не теряется. Внешний сторожевой таймер обеспечил детектирование зависаний и инициировал восстановление при собственном нано-уровне потребления, совместимом с длительным Safe Mode.

Суммарно результаты указывают на достаточную функциональную

полноту предлагаемой архитектуры для аппаратов формата 1U–3U при жёстких энергетических ограничениях. Сенсорный контур на базе компонентов COTS обеспечивает устойчивую работу 9-DoF-оценки ориентации с возможностью рекурсивного уточнения, а приоритизация журналирования и разделение критичных и массовых потоков данных повышают устойчивость к отказам и управляемость восстановлением. Реализованная печатная плата подтверждает технологическую осуществимость схемных решений и соответствие требованиям ЭМС/ESD, формируя основу для расширенной программы климатических и вибродинамических испытаний на следующем этапе.

### **Обсуждение**

В дальнейшей работе планируется завершить комплексную прошивку и интеграцию интеллектуального контура управления. На низком уровне будут отлажены загрузчик с резервным образом в QSPI-NAND и безопасное обновление (DFU по USB-C, резервный канал по LoRa), реализованы драйверы HAL для SDIO/QSPI/CAN/SPI/I<sup>2</sup>C и подсистема синхронизации (HSE/LSE), а также внедрён энерго-ориентированный планировщик (порог/гистерезис + оценка SoC на EKF) и штатные процедуры восстановления (внешний watchdog TPL5010, приоритизированное журналирование «чёрного ящика»). На уровне алгоритмов предусмотрены интеграция ADCS (TRIAD/QUEST + MEKF) с калибровкой датчиков и аппаратными HIL-испытаниями, а также верификация устойчивости в термо-виброциклах и при инъекциях отказов памяти. Контур ИИ предполагается развернуть преимущественно на наземной станции: прогноз освещённости и энергетического баланса, адаптивная оптимизация расписаний (стохастический поиск в сочетании с ограниченным RL), раннее обнаружение аномалий телеметрии (self-supervised/autoencoder) и выдача рекомендаций по настройке порогов с последующей телеметрически обоснованной валидацией; на борту допустима лишь лёгкая инференс-прослойка (компрессия/квантизация моделей) в некритическом контуре. Дополнительно запланированы меры кибербезопасности (подписанные прошивки, контроль целостности), расширенные испытания долговечности носителей (SD/NAND) и выпуск пакета воспроизводимости (скрипты сборки, профили нагрузок, трассируемые протоколы испытаний), по результатам которых будет сформирован релиз-кандидат программно-аппаратной платформы.

### **Заключение**

Представленная работа последовательно обосновывает и реализует архитектуру бортового комплекса управления для наноспутников формата CubeSat с акцентом на энергетическую безопасность, верифицируемость и отказоустойчивость. Компоновка на базе MCU STM32H743 в сочетании с внешним сторожевым таймером, разнесённая по приоритетам подсистема хранения (QSPI-NAND для критических журналов и SD по SDIO для массивной телеметрии), а также сенсорный контур (IMU, магнитометр, барометр) продемонстрировали состоятельность на стенде: соблюдение автомата



запуска, стабильный обмен с датчиками, сохранность «чёрного ящика» при энергетическом дефиците и надёжное восстановление после сбоев. Выбранная алгоритмическая схема - детерминированные оценщики ориентации (TRIAD/QUEST) с рекурсивным уточнением (MEKF/EKF) - обеспечивает требуемую точность при ограниченных ресурсах, а вынесение вычислительно затратного планирования на наземную станцию снижает риски и упрощает доказательство корректности критических функций.

Ограничения текущего этапа связаны с отсутствием длительных ресурсных испытаний (температурные и вибродинамические циклы, радиационная стойкость) и полноценной НИЛ-кампании с исполнительными механизмами, а также с необходимостью накопления расширенной статистики для численной оценки энергобаланса и шумовых характеристик датчиков. Запланированные шаги - завершение прошивки с безопасным обновлением и контролем целостности, интеграция наземного ИИ-контура (прогноз энергии, адаптивные расписания, раннее выявление аномалий) при сохранении жёсткой детерминированности бортовой логики, а также расширенные испытания долговечности носителей (SD/NAND) и устойчивости к отказам - доведут платформу до уровня релиз-кандидата для миссий 1U–3U с жёсткими ограничениями по массе, энергии и допустимому риску.

## REFERENCES

- Ali, A., Mughal, M.R., Ali, H. & Reyneri, L. (2014). Innovative power management, attitude determination and control tile for CubeSat standard NanoSatellites. *Acta Astronautica*. — 96. — Pp. 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.11.013>
- Belokonov, I., Timbai, I. & Nikolaev, P. (2018). Analysis and synthesis of motion of aerodynamically stabilized nanosatellites of the CubeSat design. *Gyroscopy and Navigation*. — 9. — Pp. 287–300. <https://doi.org/10.1134/S2075108718040028>
- de Melo, A.C.C.P., Café, D.C. & Borges R.A. (2020). Assessing power efficiency and performance in nanosatellite onboard computer for control applications. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. — 1(2). — Pp. 110–116. <https://doi.org/10.1109/JMASS.2020.3009835>
- Dos Santos, G.H., Seman, L.O., Bezerra, E.A., Leithardt, V.R.Q., Mendes, A.S. & Stefenon, S.F. (2021). Static attitude determination using convolutional neural networks. *Sensors*. — 21(19). — P. 6419.
- Finance, A., Dufour, C., Boutéraon, T., Sarkissian, A., Mangin, A., Keckhut, P. & Meftah, M. (2021). In-orbit attitude determination of the UVSQ-SAT CubeSat using TRIAD and MEKF methods. *Sensors*. — 21(21). — P. 7361. <https://doi.org/10.3390/s21217361>
- Gutierrez, T., Bergel, A., Gonzalez, C.E., Rojas, C.J., & Diaz, M.A. (2021). Systematic Fuzz Testing Techniques on a Nanosatellite Flight Software for Agile Mission Development. *IEEE Access*. — 9. — Pp. 114008–114021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104283>
- Liddle, J.D., Holt, A.P., Jason, S.J. et al. (2020). Space science with CubeSats and nanosatellites. *Nature Astronomy*. — 4. — Pp. 1026–1030. <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01247-2>
- Nieto-Peroy, C. & Emami, M.R. (2019). CubeSat mission: From design to operation. *Applied Sciences*. — 9(15). — P. 3110. <https://doi.org/10.3390/app9153110>
- Poghosyan, A., & Golkar, A. (2017). CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*. — 88. — Pp. 59–83. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>
- Rigo, C.A., Seman, L.O., Camponogara, E., Morsch Filho, E., Bezerra, E.A. & Munari, P. (2022). A branch-and-price algorithm for nanosatellite task scheduling to improve mission quality-of-service. *European Journal of Operational Research*. — 303(1). — Pp. 168–183.
- Sabogal, S., George, A. & Wilson, C. (2020). Reconfigurable framework for environmentally adaptive resilience in hybrid space systems. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*. — 13(3). — Pp. 1–32. <https://doi.org/10.1145/339838>



Takátsy, J., Bozóki, T., Dálya, G. et al. (2022). Attitude determination for nano-satellites — II. Dead reckoning with a multiplicative extended Kalman filter. *Experimental Astronomy*. — 53. — Pp. 209–223. <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09818-5>

Villela, T., Costa, C.A., Brandão, A.M., Bueno, F.T. & Leonardi, R. (2019). Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. *International Journal of Aerospace Engineering*. — 2019. — Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2019/5063145>

Arseno, D., Edwar E., Harfian, A.R. & Salsabila, J.N. (2019). Characterization of On-Board Data Handling (OBDH) Subsystem. In 2019 IEEE 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). — Bali, Indonesia. — Pp.. 223–227. <https://doi.org/10.1109/TSSA48701.2019.8985466>



**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ  
КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖУРНАЛЫ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ИНФОРМАЦИОННЫХ И  
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND  
COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

Правила оформления статьи для публикации в журнале на сайте:

**<https://journal.iitu.edu.kz>**

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Собственник: АО «Международный университет  
информационных технологий» (Казахстан, Алматы)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР  
**Мрзабаева Раушан Жалиқызы**

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР  
**Ермакова Вера Александровна**

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР  
**Рашидинов Дамир Рашидинович**

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА  
**Асанова Жадыра**

Подписано в печать 15.12.2025.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать - ризограф. 9,0 п.л. Тираж 100  
050040 г. Алматы, ул. Манаса 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09).

---

Издание Международного университета информационных технологий  
Издательский центр КБТУ, Алматы, ул. Толе би, 59