



Е.С. Нұрғизат¹, Ж.С. Саргазин²

¹Energo University, Алматы, Казахстан

²Department of military education and science of the Ministry of defense of the Republic of Kazakhstan, Астана, Казахстан

E-mail: y.nurgizat@aes.kz

ПРОТОТИП БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ СИСТЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Переход от отдельных электронных модулей к физически интегрированным бортовым системам требует последовательной концепции механического проектирования, которая обеспечит компактность системы, упорядоченность конструкции, удобство технического обслуживания, а также соответствие требованиям поэтапного тестирования. В данной статье представлены механическая интеграция и инженерная реализация бортового прототипа системы управления для компактных авиакосмических приборов, основанного на многослойной конструкции. В данном исследовании основное внимание уделяется внутренней компоновке модульных электронных плат, структурной организации приборного отсека, изготовлению корпуса с использованием технологий быстрого прототипирования, а также процессу интеграции отдельных электронных блоков в единую инженерную модель. Представленный прототип подтверждает осуществимость вертикальной многоярусной внутренней компоновки, которая поддерживает модульный дизайн, обеспечивает возможность повторной сборки и совместима с будущими испытаниями на стендах и испытаниями в реальных условиях. Эта концепция разработки создает практический мост между разработкой электроники на уровне печатных плат и созданием физически интегрированных исследовательских модулей для аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: механическая интеграция, инженерный прототип, многоярусная сборка, аэрокосмические системы, проектирование корпусов.

Введение.

В компактных аэрокосмических системах механическая реализация авионики [1] имеет не меньшее значение, чем сама электронная архитектура. Работоспособная печатная плата может стать полноценным авионикским блоком только после интеграции в физически целостную конструкцию, обеспечивающую правильное расположение, доступность, стабильность и удобство технического обслуживания. Поэтому механическую интеграцию



следует рассматривать как самостоятельную инженерную дисциплину, а не как второстепенный этап монтажа.

Эта проблема особенно актуальна в компактных, высокодинамичных системах [2], где внутреннее пространство ограничено и несколько подсистем должны сосуществовать в рамках ограниченной конструктивной оболочки. Расположение электронных модулей влияет на спецификации проводки, доступность для отладки, удобство обслуживания прототипов и готовность системы к последующим стендовым или экологическим испытаниям.

В данной статье рассматривается инженерная реализация прототипа бортового управления [3-5] на основе стека, разработанного для экспериментальных исследований в аэрокосмической [6] отрасли. Основное внимание уделяется внутренней компоновке модульных печатных плат, расположению отсеков, элементам структурной поддержки и концепциям сборки для преобразования электронных платформ на уровне плат в интегрированные инженерные модели.

Вклад статьи заключается в демонстрации практической стратегии физической интеграции, пригодной для итеративной разработки и последующего тестирования. Предложенный подход показывает, как объединить модульные электронные устройства в компактный и удобный в обслуживании бортовой комплекс научно-исследовательского уровня [7].

Целью исследования является разработка и инженерная реализация прототипа бортового комплекса управления для компактных систем аэрокосмического оборудования с использованием многоуровневой модульной компоновки, обеспечивающей компактность, удобство сборки, обслуживания и готовность к дальнейшим испытаниям.

Материалы и методы.

1.1 Внутренняя компоновка на основе многоуровневой сборки.

Основным конструктивным решением данной механической концепции является вертикальная многоуровневая компоновка электронных модулей [8, 9]. В этой конфигурации печатные платы отдельных подсистем размещаются во внутреннем отсеке прототипа в упорядоченном осевом порядке.

Такой подход обладает целым рядом преимуществ [10]. Он позволяет эффективно использовать доступное внутреннее пространство, уменьшить запутанность внутренней проводки и обеспечить четкую иерархическую структуру при размещении подсистем. Кроме того, концепция на основе штабелирования способствует повторяемости, поскольку положение каждого модуля может быть зафиксировано относительно опорной конструкции и соседних печатных плат.

С точки зрения системного инжиниринга [11], штабелированная компоновка особенно подходит для компактных авиакосмических приборных блоков, в которых радиальное пространство ограничено, а

вертикальная компоновка обеспечивает более рациональный подход к организации подсистем.

Продольный разрез головного модуля демонстрирует размещение БКУ под коническим обтекателем в приборном отсеке с вертикальной модульной стойкой (стек из четырёх печатных плат: датчики, MCU, питание, приводы), фиксируемой на внутренних направляющих (рис. 1). Ниже расположен блок источников питания из двух цилиндрических элементов в кассетном держателе; силовые шины и межплатные разъёмы ориентированы вдоль оси [12], что минимизирует петельные токи. По бортам интегрированы аэродинамические рули с сервоприводами, что сокращает длину тяг и уменьшает люфты. Компоновка центрирует массы, экранирует чувствительные MEMS от силовой части и обеспечивает технологичный доступ при обслуживании.

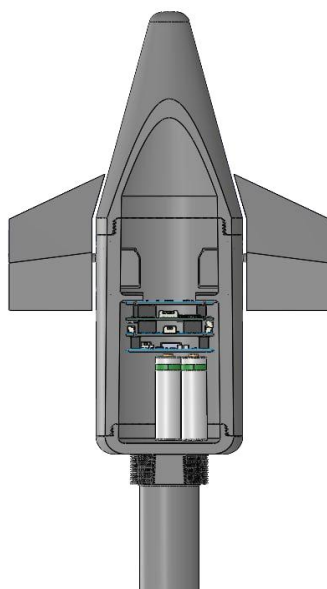


Рисунок 1 - Продольный разрез головного модуля с расположением «стека» электроники и аккумуляторного блока

Значение данного этапа заключается в том, чтобы доказать, что прототип представляет собой не просто набор отдельных печатных плат, а физически интегрированную систему с четкой внутренней логикой.

1.2 Конструктивная реализация и дизайн корпуса.

Для преобразования модульного электронного устройства в инженерный прототип мы разработали вариант конструкции корпуса с использованием методов быстрого прототипирования. Данная конструкция включает в себя элементы корпуса, внутренние опоры для укладки печатных плат, а также сопрягающие элементы, облегчающие многократную разборку и повторную сборку в ходе разработки.

Набор 3D-печатных деталей корпуса показан перед сборкой: хвостовой адаптер-вставка с наружной резьбой под сопряжение с несущей трубой, посадочное седло обтекателя, конический обтекатель, две внутренние

консоли-кронштейна для фиксации «стека» электроники и цилиндрический приборный отсек с внутренней резьбой под навинчивание обтекателя (рис. 2). Материал - PLA/PETG; резьбовая пара рассчитана на многократную разборку, обеспечены соосность и повторяемость сборки.



Рисунок 2 - Набор 3D-печатных деталей корпуса БКУ: адаптер, седло и обтекатель, внутренние консоли, приборный отсек

Использование методов быстрого прототипирования на этапе создания инженерных моделей вполне оправдано. Это позволяет осуществлять эффективную итерацию, проверять геометрическую совместимость и выявлять практические проблемы, связанные с доступом, креплением и внутренними соединениями, которые зачастую невозможно полностью учесть, опираясь только на цифровые модели.

Полученный в результате корпус доказал, что выбранная внутренняя компоновка не только может быть реализована в компактной форме, но и позволяет сохранить ремонтпригодность встроенного электронного оборудования и модульный доступ к нему.

1.3 Порядок сборки инженерного прототипа.

Изготовление прототипа основано на поэтапном процессе сборки. В рамках этого процесса сначала осуществляется изготовление и тестирование модульных печатных плат и конструктивных элементов, затем готовятся внутренние опорные элементы, монтируется стопка печатных плат и размещаются элементы питания, а в заключение производится общая сборка

корпуса. На рисунке 3 показан макет с четырьмя платами, иллюстрирующий модульность и совместимость плат с посадочными местами внутри корпуса.

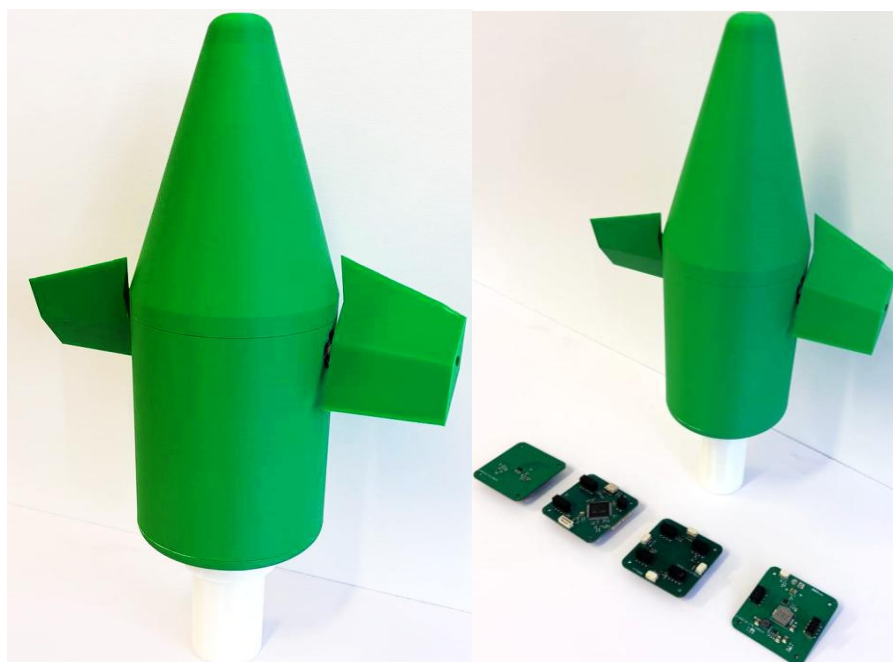


Рисунок 3 - Внешний вид собранного инженерного макета БКУ

Поэтапный подход к сборке имеет решающее значение в процессе создания прототипа, поскольку он позволяет разработчикам своевременно выявлять проблемы с выравниванием, конфликты при прокладке кабелей и ограничения в доступе для технического обслуживания до полного закрытия системы. Кроме того, этот подход помогает обеспечить, чтобы окончательная интегрированная конструкция оставалась доступной для обслуживания, а не превратилась в недоступный закрытый монолит.

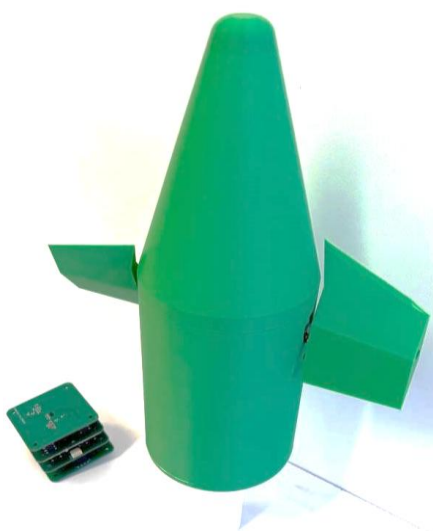


Рисунок 4 - Макет с электронными модулями (датчики, MCU, питание, приводы) перед стыковкой

Готовая инженерная модель подтверждает осуществимость выбранной логики сборки и доказывает, что модульные подсистемы могут быть интегрированы в конструктивно целостный прототип без ущерба для повторяемости или обслуживаемости.

Хотя в данном исследовании не утверждается, что прототип прошел полную экологическую сертификацию, созданная инженерная модель готова к следующему этапу проверки. Она представляет собой конструктивно обоснованную и экспериментально ценную платформу для стендовых испытаний, тестирования интеграции подсистем, а также будущих исследований, связанных с вибрацией, температурными воздействиями или надежностью расширенных сборок.

Готовность данного прототипа следует понимать как степень зрелости прототипа, а не как степень зрелости конечного применения. Это различие имеет решающее значение в научной литературе, поскольку позволяет избежать преувеличения результатов и четко обозначить фактический вклад данного исследования.

Таким образом, данный прототип представляет собой физически интегрированную исследовательскую платформу, готовую к постепенной экспериментальной оценке.

Результаты и обсуждения.

Теоретический фундамент, заложенный в основу системы, нашел свое практическое воплощение в Phyton. Программа интегрирует в себе экспериментальный виртуальный блок, предназначенный для апробации предложенных алгоритмов БКУ [13]. Далее приводится описание [14] программного интерфейса и анализ данных, полученных в ходе виртуальных испытаний.

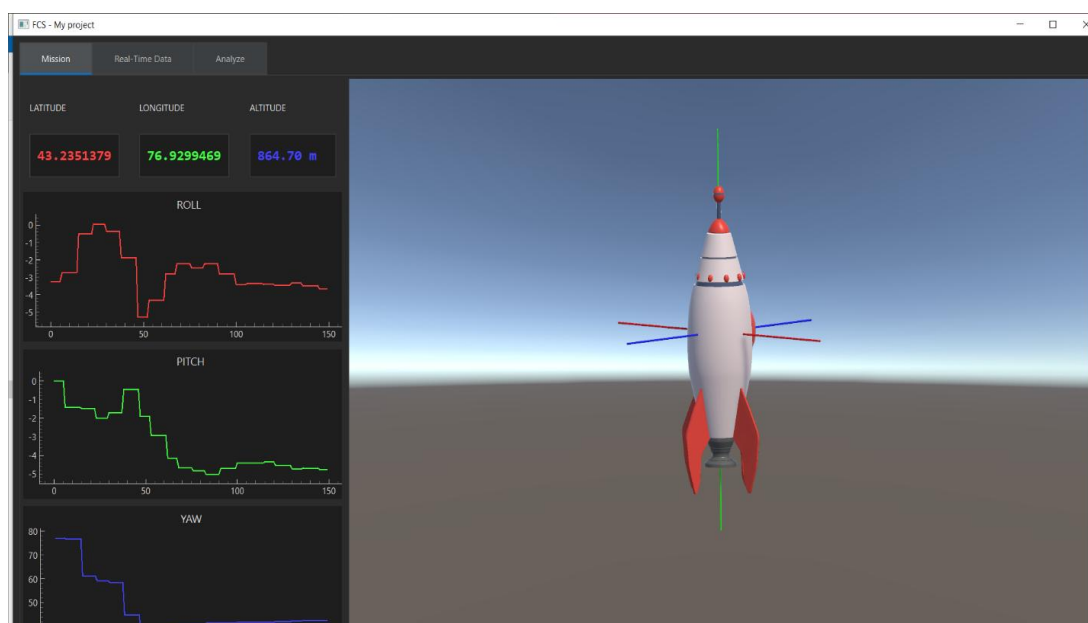


Рисунок 5 – Интерфейс раздела Mission с визуализацией положения летательного аппарата

На рисунке 5 представлен основной экран программного интерфейса управления полётом. В левой части отображаются текущие телеметрические данные: широта, долгота и высота, а также графики изменения углов ориентации по каналам roll, pitch и yaw. Правая часть интерфейса содержит 3D-модель летательного аппарата, позволяющую визуально оценивать его пространственное положение относительно осей координат. Данный экран предназначен для оперативного контроля навигационных параметров и ориентации аппарата в процессе полёта.

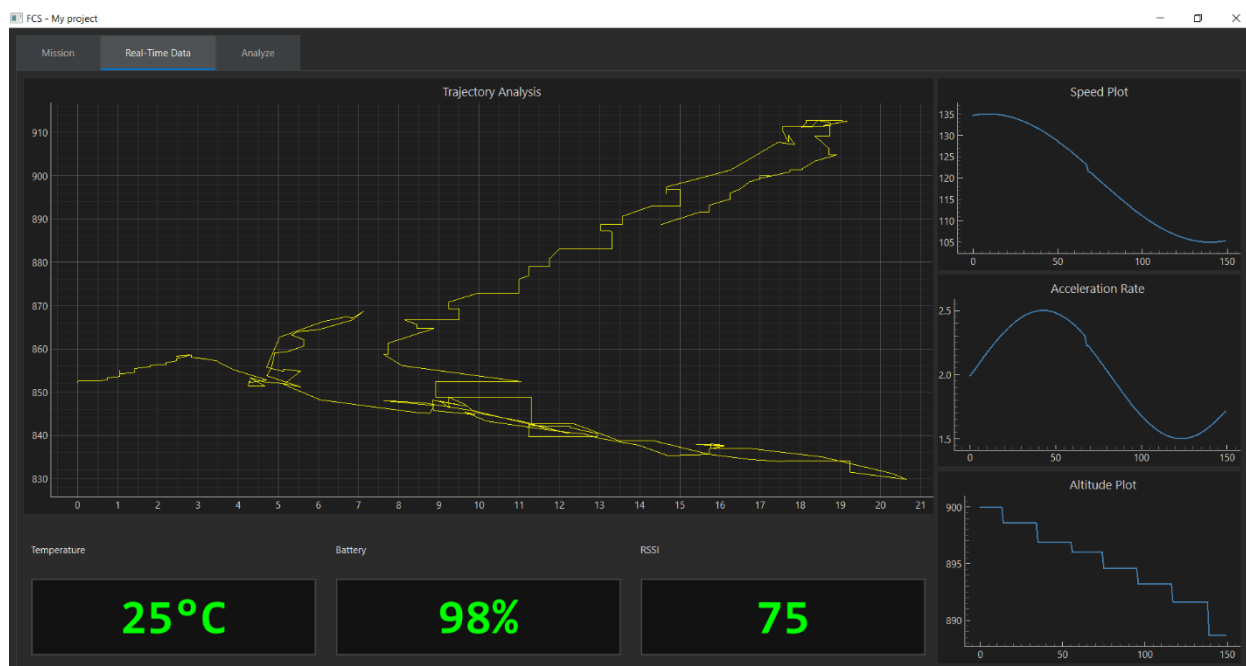


Рисунок 6 – Раздел Real-Time Data с анализом траектории и параметров полёта

На рисунке 6 показан экран мониторинга данных в реальном времени. Основной график Trajectory Analysis отражает изменение траектории движения летательного аппарата, а дополнительные графики справа демонстрируют динамику скорости, ускорения и высоты. Видно, что скорость постепенно снижается, высота изменяется ступенчато, а ускорение имеет плавный характер изменения. В нижней части интерфейса дополнительно представлены служебные параметры: температура, уровень заряда батареи и качество радиосигнала RSSI, что позволяет оценивать техническое состояние системы во время испытаний.

На рисунке 7 приведён экран аналитической обработки полётных данных. В левой части показана траектория на активном участке и график управления аэродинамическими рулями, где отображаются команды отклонения рулевых поверхностей в заданных пределах. В правой части представлены графики коррекции траектории с учётом GPS-данных, работа рулей при коррекции и оценка точности достижения цели. Данные графики демонстрируют, как система управления формирует управляющие

воздействия для уменьшения отклонения от заданной траектории и повышения точности наведения.

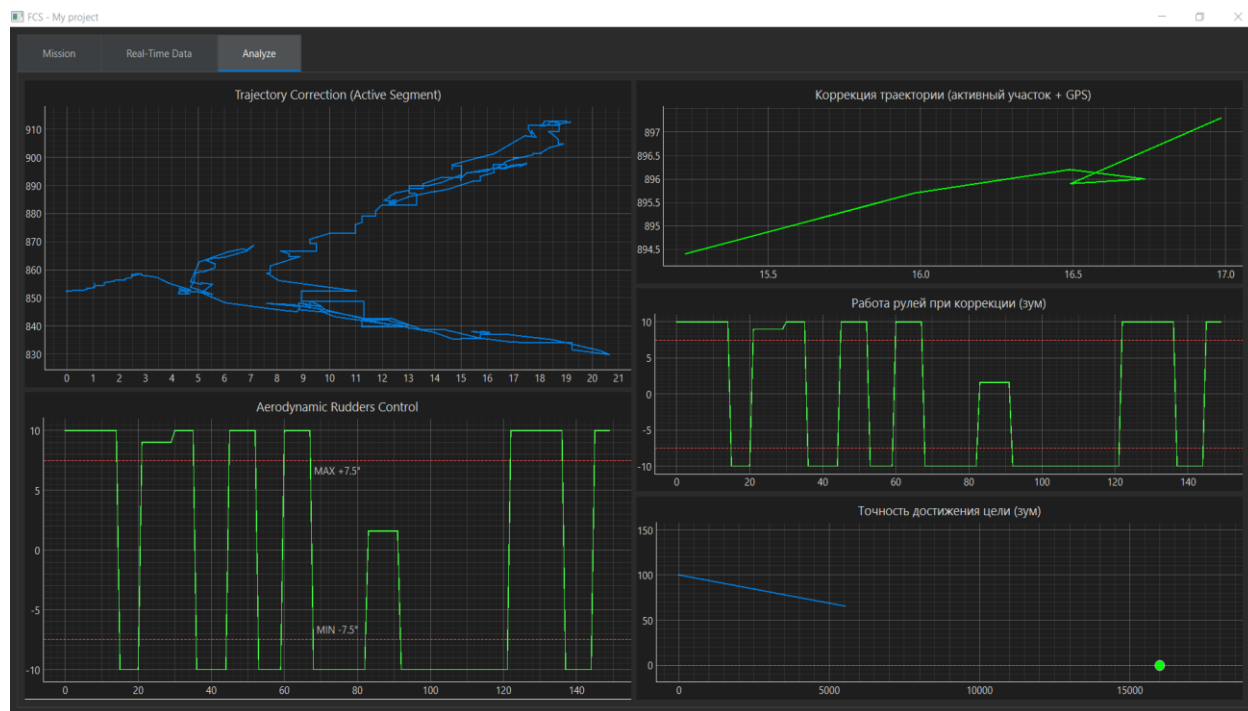


Рисунок 7 – Раздел Analyze с результатами коррекции траектории и работы рулевых органов

Результаты показывают, что предложенный прототип БКУ представляет собой практичное решение для интеграции нескольких электронных подсистем в компактную аэрокосмическую конструкцию. Вертикальная многоуровневая компоновка плат датчиков, микроконтроллера, источника питания и исполнительных механизмов оптимизирует внутреннюю планировку, упрощает прокладку проводов и облегчает повторную сборку в процессе разработки.

Модульная конструкция является одним из основных преимуществ данного прототипа. Возможность доступа, замены или модификации отдельных печатных плат без необходимости изменения всей конструкции имеет решающее значение для экспериментальных аэрокосмических систем. Использование деталей корпуса, изготовленных с помощью 3D-печати, также позволяет быстро проверить геометрию конструкции, процесс сборки и удобство технического обслуживания.

Программные интерфейсы расширяют функциональность прототипа за счет реализации визуализации телеметрических данных, мониторинга ориентации, анализа траектории и оценки команд управления. Тем не менее, система все еще находится на стадии инженерного прототипа и не прошла полную экологическую сертификацию. Поэтому дальнейшая работа должна включать испытания на вибрацию, термостойкость, электромагнитную совместимость и надежность.



В целом, данный прототип успешно соединил независимые электронные модули с физически интегрированной бортовой системой управления и предоставил подходящую платформу для дальнейшей лабораторной и полевой проверки.

Заключение.

В данной работе были представлены аспекты механической интеграции и инженерной реализации прототипа компактного бортового комплекса управления (БКУ) для аэрокосмических приложений. Разработанная система основана на многоуровневой внутренней компоновке электронных модулей, включая платы датчиков, микроконтроллера, системы питания и управления исполнительными механизмами. Предложенная стековая конфигурация позволила эффективно использовать внутреннее пространство, улучшить структурную организацию и обеспечить доступность компонентов для сборки, обслуживания и последующих модификаций.

Корпус, изготовленный методом 3D-печати, подтвердил жизнеспособность выбранной концепции дизайна и продемонстрировал, что быстрое прототипирование является эффективным методом разработки и валидации компактных исследовательских аэрокосмических модулей. Наличие внутренних опор, резьбовых элементов корпуса и организованного приборного отсека позволило объединить разрозненные электронные подсистемы в единый инженерный прототип.

Представленный в статье программный интерфейс расширяет функциональные возможности системы, обеспечивая мониторинг миссии, визуализацию телеметрии в реальном времени, анализ траектории и оценку управляющих воздействий. Это подтверждает, что прототип может использоваться не только как механическая модель, но и как экспериментальная платформа для отладки алгоритмов бортового управления и подготовки к будущим лабораторным и полевым испытаниям.

Основным результатом работы является создание физически интегрированного и обслуживаемого прототипа, готового к следующему этапу экспериментальной проверки. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на анализе виброустойчивости, тепловой стабильности, электромагнитной совместимости, испытаниях на надежность, а также на совершенствовании алгоритмов бортового управления в условиях, максимально приближенных к реальным. Таким образом, предложенный прототип представляет собой значимый шаг на пути к созданию компактных модульных систем управления аэрокосмической техникой, готовых к полноценным испытаниям.

Финансирование. Результаты исследований проведены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта AP22685171 "Разработка интеллектуального бортового комплекса управления реактивных снарядов".



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McSwain, R. G., Geuther, S. C., Howland, G., Patterson, M. D., Whiteside, S. K., & North, D. D. (2020). An experimental approach to a rapid propulsion and aeronautics concepts testbed (No. NF1676L-34253).
2. Tunçdemir, Ş., & Tolun, Ö. C. (2025, May). Design and Development of a Modular Mission Control Board for Autonomous Systems. In 2025 7th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (ICHORA) (pp. 1-6). IEEE.
3. Dolega, B., & Rogalski, T. (2004). The new conception of the laboratory testing of the FBW control system for small aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 76(3), 293-298.
4. Battipede, M., Gili, P., Lando, M., & Gunetti, P. (2006). Flight Control System Rapid Prototyping for the Remotely-Controlled Elettra-Twin-Flyer Airship. In AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit (p. 6624).
5. Randhawa, P., & Shanthagiri, V. (2015). Concept of operations to system design and development-an integrated system for aircraft mission feasibility analysis using STK engine, matlab and labview. *Int. J. Instrum. Control Syst*, 5(4), 01-12.
6. Morioka, K., Kohmura, A., Yonemoto, N., Jansen, L. J., Mäurer, N., Gräupl, T., & Schnell, M. (2023). Rapid prototyping and international validation activity for the L-band digital aeronautical communications system (LDACS). *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 4, 2186-2203.
7. Labrèche, G., Evans, D., Marszk, D., Mladenov, T., Shiradhonkar, V., & Zelenevskiy, V. (2022). Agile development and rapid prototyping in a flying mission with open source software reuse on-board the ops-sat spacecraft. In AIAA SCITECH 2022 Forum (p. 0648).
8. Yang, Y., Yu, X., Li, Z., & Basin, M. V. (2023). A new overactuated multirotor: Prototype design, dynamics modeling, and control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(8), 9449-9459.
9. Ғапу, А., & Дрăгуlinescu, А. М. (2025, December). IoT-enabled Integrated Avionic System for Supersonic Multi-purpose Rockets with Real-Time Telemetry and Autonomous Flight Control. In GLOBECOM 2025-2025 IEEE Global Communications Conference (pp. 2964-2969). IEEE.
10. Nilsson, T., Bensch, L., Dufresne, F., Rometsch, F., de Medeiros, P., Guerra, E., ... & Cowley, A. (2023). Out of this world design: Bridging the gap between space systems engineering and participatory design practices. *Proceedings of SpaceCHI*, 3.
11. Laterza, M., Khoo, K. S., Lim, W. J. J., Ali, S. G., Ong, K. E. M., Agarwal, D., ... & Lim, J. W. M. (2024, May). Development of a compact xenon propellant management assembly for low-power Hall effect thrusters: system design, hardware prototype, and pressure qualification. In *Proceedings of the 9th Space Propulsion Conference*, Glasgow, UK.



12. Kruger, J. J., Guffanti, T., Park, T. H., Murray-Cooper, M., Low, S. Y., Bell, T., ... & Westphal, J. (2024). Adaptive End-to-End Architecture for Autonomous Spacecraft Navigation and Control During Rendezvous and Proximity Operations. In AIAA SCITECH 2024 Forum (p. 0430).

13. de Souza, K. V., Bouslimani, Y., & Ghribi, M. (2022). Flight software development for a CubeSat application. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, 3(4), 184-196.

14. Randhawa, P., & Shanthagiri, V. (2015). Concept of operations to system design and development-an integrated system for aircraft mission feasibility analysis using STK engine, matlab and labview. Int. J. Instrum. Control Syst, 5(4), 01-12.

Еркебұлан Нұрғизат, PhD, қауымдастырылған профессор, Energo University, Алматы, Қазақстан, y.nurgizat@aues.kz

Жанибек Саргазин, полковник, Департамент бастығының орынбасары-қорғанысты ғылыми қамтамасыз ету және шетелде кадрлар даярлау басқармасының бастығы, Department of military education and science of the Ministry of defense of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан

ШАҒЫН АЭРОҒАРЫШТЫҚ ЖАБДЫҚТАР ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН БОРТТЫҚ БАСҚАРУ КЕШЕНІНІҢ ПРОТОТИПІ

Андатпа. Жекелеген электрондық модульдерден физикалық тұрғыдан біріктірілген борттық жүйелерге көшу жүйенің ықшамдылығын, құрылымдық реттелуін, техникалық қызмет көрсетуге қолайлылығын, сондай-ақ кезең-кезеңімен сынақ жүргізу талаптарына сәйкестігін қамтамасыз ететін жүйелі механикалық жобалау тұжырымдамасын қажет етеді. Бұл мақалада көпқабатты құрылымға негізделген шағын аэроғарыштық аспаптарға арналған борттық басқару жүйесі прототипінің механикалық интеграциясы мен инженерлік іске асырылуы қарастырылады. Зерттеуде негізгі назар модульдік электрондық платалардың ішкі орналасуына, аспаптық бөліктің құрылымдық ұйымдастырылуына, жылдам прототиптеу технологияларын қолдану арқылы корпусы дайындауға, сондай-ақ жекелеген электрондық блоктарды бірыңғай инженерлік модельге біріктіру процесіне аударылады. Ұсынылған прототип модульдік жобалауды қолдайтын, қайта жинақтауға мүмкіндік беретін және болашақ стендтік әрі нақты жағдайдағы сынақтармен үйлесімді тік көпдеңгейлі ішкі компоновканың іске асырылу мүмкіндігін растайды. Бұл әзірлеу тұжырымдамасы баспа платалары деңгейіндегі электрониканы жобалау мен аэроғарыш саласына арналған физикалық тұрғыдан біріктірілген зерттеу модульдерін құру арасындағы практикалық байланысты қамтамасыз етеді.



Түйінді сөздер: механикалық интеграция, инженерлік прототип, көпдеңгейлі жинақтау, аэроғарыштық жүйелер, корпус жобалау.

Yerkebulan Nurgizat, PhD, associate professor, Energo University, Almaty, Kazakhstan, y.nurgizat@aes.kz

Zhanibek Sargazin, Colonel, Deputy Head of Department - Head of the Directorate for Scientific Support of Defense and Personnel Training Abroad, Department of military education and science of the Ministry of defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

PROTOTYPE OF AN ONBOARD CONTROL COMPLEX FOR COMPACT AEROSPACE EQUIPMENT SYSTEMS

Abstract. The transition from separate electronic modules to physically integrated onboard systems requires a consistent mechanical design concept that ensures system compactness, structural organization, ease of maintenance, and compliance with staged testing requirements. This article presents the mechanical integration and engineering implementation of an onboard control system prototype for compact aerospace instruments based on a multilayer structure. The study focuses on the internal arrangement of modular electronic boards, the structural organization of the instrument compartment, the fabrication of the housing using rapid prototyping technologies, and the integration of separate electronic units into a unified engineering model. The presented prototype confirms the feasibility of a vertical multi-tier internal layout that supports modular design, enables repeated assembly, and is compatible with future bench and real-world testing. This development concept creates a practical bridge between printed circuit board-level electronics development and the creation of physically integrated research modules for the aerospace industry.

Keywords: mechanical integration, engineering prototype, multi-tier assembly, aerospace systems, housing design.

Поступила: 25 августа 2026 года

Рецензирована: 01 сентября 2026 года

Принята: 08 сентября 2026 года