

УДК 629.78+681.518

## Комплексный стенд для полунатурной отработки алгоритмов ориентации малых космических аппаратов

Прошкин Максим Александрович

Самыловский Иван Александрович

ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Аннотация.** Представлена разработка комплексного полунатурного стенда для моделирования вращательной динамики малых космических аппаратов формата CubeSat и отработки алгоритмов системы ориентации. Описана механическая конструкция трехосного подвеса с балансировкой, макет спутника с работающими маховиками, а также программно-аппаратная система ASTRIA, обеспечивающая сбор телеметрии, вычисление параметров ориентации и реализацию контуров управления. Приведено математическое обоснование используемых моделей динамики и структуры управляющих алгоритмов. Показано, что разработанный стенд обеспечивает необходимую архитектуру для последующих испытаний и дальнейших исследований в области управления ориентацией наноспутников.

**Ключевые слова:** малые космические аппараты, CubeSat, система ориентации, полунатурное моделирование, динамика вращения, маховики, математическое моделирование

**Введение.** Современные тенденции миниатюризации космических аппаратов привели к широкому распространению наноспутников формата CubeSat [1], оснащенных функциональными системами ориентации [2]. Разработка и проверка алгоритмов ориентации требует комплексных экспериментальных стендов, способных воспроизводить ключевые элементы динамики вращательного движения и взаимодействие реальных исполнительных органов с моделью внешней среды [3, 4]. Полунатурные испытания позволяют валидировать математические модели, снизить риски отказов и повысить надежность миссий. В данной работе представлена разработка комплексного стенда, включающего механическую платформу, оцифрованную модель среды и программно-аппаратный контур управления.

**Методы и материалы; результаты.** Основу работы составляет разработка трехосного механического стенда, включающего систему подвижных рам на подшипниках и регулируемую балансировку, обеспечивающую свободное вращение макета малого космического аппарата в лабораторных условиях. Конструкция выполнена на базе конструкционных алюминиевых профилей с узлами, изготовленными методом 3D-печати, что позволило добиться высокой точности совмещения осей и минимизации паразитных моментов. В отличие от воздушных подвесов, требующих специальной инфраструктуры, поддержания стабильного воздушного потока и строгих ограничений по массе, трехосный механический подвес обеспечивает более высокую конструк-

ционную жесткость, предсказуемость характеристик, удобство монтажа и возможность интеграции дополнительных элементов. Он позволяет работать с полноразмерным макетом КА без существенного усложнения стенда, тогда как воздушные платформы чувствительны к смещению центра масс и сильно ограничивают вариативность экспериментов. При этом учитываются неизбежные эффекты трения в подшипниках, остаточные моменты и ограниченную идеальность механики, закладывая методы компенсации и оценку их влияния на достоверность результатов испытаний. Макет спутника оснащен тремя малогабаритными маховиками, инерциальными датчиками, магнитометром и бортовым вычислителем.

Программно-аппаратный комплекс ASTRIA обеспечивает полный цикл обмена данными между макетом спутника и наземным вычислительным контуром. Система включает бортовую прошивку на микроконтроллере ESP32, программу-ретранслятор на языке программирования Python, серверный REST API модуль и систему асинхронной передачи данных через очередь сообщений. Реализованы функции сбора телеметрии, передачи команд управления, визуализации состояния спутника и формирования управляющих сигналов.

**Заключение.** Разработанный комплексный стенд представляет собой универсальную платформу для дальнейших исследований и отработки алгоритмов ориентации малых космических аппаратов. Механическая конструкция, интегрированная с программно-аппаратным комплексом, обеспечивает возможность расширения функциональности стенда и проведения полнатурных испытаний. Полученные результаты формируют основу для последующей экспериментальной валидации алгоритмов ADCS и служат этапом подготовки к прикладным задачам орбитального управления.

## Список источников

- [1] *Nanosats Database*. URL: <https://www.nanosats.eu/> (accessed 04.06.2025).
- [2] *NASA SSRI Knowledge Base*. URL: <https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/topics/48/> (accessed 04.06.2025).
- [3] Tapsawat W., Sangpet T., Kuntanapreeda S. Development of a hardware-in-loop attitude control simulator for a CubeSat satellite. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 297 (1), art. no. 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012010>
- [4] Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. *Управление ориентацией космических аппаратов*. Москва, Наука, 1974.