

УДК 629.735:629.7.018.7

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-59-65

## Стенд для комплексного тестирования и летных испытаний беспилотных воздушных судов мультироторного типа

*В. Н. Никитин<sup>1</sup>✉, В. Д. Волк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

**Аннотация.** В статье описывается созданный стенд для комплексного тестирования беспилотных воздушных судов. Выполнен анализ конструктивных подходов обеспечения подвижности летательных аппаратов. Сформулированы требования к проектируемому стенду, определены его конструктивные особенности. Получен натурный прототип разработанного стенда, выполнено его тестирование с использованием квадрокоптеров. Проведенные эксперименты показали работоспособность предложенной концепции стенда и полное соответствие прототипа сформулированным требованиям. Сделан вывод о возможности применения испытательного стенда для обучения особенностям конструкции, настройки и пилотирования беспилотных воздушных судов мультироторного типа, используемых для получения навыков аэрофотосъемочных работ с целью создания крупномасштабной топографической продукции и трехмерных моделей объектов местности.

**Ключевые слова:** беспилотные воздушные суда, аэрофотосъемка, испытательный стенд, летные испытания

### Для цитирования:

*Никитин В. Н., Волк В. Д.* Стенд для комплексного тестирования и летных испытаний беспилотных воздушных судов мультироторного типа // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 59–65. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-59-65

### Введение

Беспилотные воздушные суда (БВС) – феномен, изменивший нашу жизнь и произошедший буквально на наших глазах в течение последних десяти-пятнадцати лет. Их использование в быту, бизнесе, военном деле непрерывно расширяется и во многом носит революционный характер [1–3].

Особое значение беспилотные воздушные суда имеют для выполнения аэрофотосъемки с целью создания крупномасштабной топографической продукции и трехмерных моделей объектов местности [4–7]. Концептуальная простота конструкции, наличие большого выбора разнообразных комплектующих делают доступными их изготовление и сборку не только на промышленно-производственном, но и на индивидуально-любительском уровне [8].

При этом беспилотное воздушное судно является продуктом со сложной логикой поведения, управляемое тысячами строк программного кода и зависимое от сотен изменяемых параметров [9–11]. Важным условием при использовании БВС является обеспечение устойчивости статически нестабильных летательных аппаратов, реализуемое за счет обратной связи от датчиков [12].

Частично проблема тестирования решается использованием SITL-симуляторов [13–15], которые, как правило, основаны на упрощенной физической модели и не имеют возможности имитировать внешние воздействия, но даже такая возможность есть далеко не для всех полетных контроллеров.

Таким образом, для исключения ошибок сборки, программного обеспечения и конфигурирования требуется выполнять комплексное тестирование на реальных летательных аппара-

тах, но в безопасных и контролируемых условиях. Вопросы безопасного тестирования беспилотных воздушных судов также актуальны при организации учебного процесса.

Организация изолированной зоны для полетов решает вопрос безопасности внешних пилотов, но не сохранности летательных аппаратов. Для этого используют испытательные стенды различной конструкции и с различными возможностями. Статья посвящена испытательным стендам для беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа, так как для летных испытаний аппаратов самолетного типа нужна по крайней мере аэродинамическая труба, использование которой невозможно при решении учебных и образовательных задач.

Задача стенда – обеспечить подвижность летательного аппарата, одновременно ограничивая его. Летательный аппарат обладает шестью степенями свободы: три степени свободы относятся к линейным перемещениям, еще три – к вращению.

Существует множество традиционных способов обеспечения подвижности мультикоптеров на стенде. Изменение мультикоптером своей ориентации может быть достигнуто за счет применения в конструкции стенда карданова подвеса (рис. 1) [16, 17], шарового шарнира, универсального шарнира (шарнира Гука) [18] или за счет «мягкого» ограничения с помощью подвесов и ограничивающих шнуров [19].



Рис. 1. Использование карданова подвеса на стенде для обеспечения возможности вращения квадрокоптера в произвольном направлении

Для перемещения по всем трем степеням свободы требуется либо использование сложных систем кареток, как в комплексе «ТРЕНИКОП» [20], либо система упругих подвесов и ограничивающих шнуров [19]. Одну степень свободы обеспечивает вал в линейном подшипнике (рис. 2) [21] и использование системы шкивов [17].



Рис. 2. Конструктивные способы обеспечения возможности перемещения квадрокоптера в пространстве

### Результаты и обсуждение

Существует достаточно большой выбор базовых конструктивов, позволяющих создать испытательный стенд с заданными характеристиками.

Основное назначение создаваемого испытательного стенда – его использование в учебном процессе. Также он должен обеспечивать проверку корректности сборки и настройки беспилотных воздушных судов мультироторного типа. Отсюда вытекают следующие требования к его конструкции:

- мобильность (возможность перемещения стенда между аудиториями через стандартные дверные проемы шириной 800 мм и высотой 2 000 мм);
- компактность (возможность установки на стандартный рабочий стол шириной 800 мм);
- безопасность (возможность установки защитного экрана сеточного типа);

– возможность обработки стандартных элементов полета (взлет, висение, посадка, управление курсом / креном / тангажом);

– старт с горизонтальной поверхности, так как многие полетные контроллеры проводят предстартовую проверку, в том числе и на горизонтальность стартовой позиции.

В соответствии с перечисленными требованиями было спроектировано два варианта испытательного стенда (рис. 3), отличающиеся типом подвеса летательного аппарата.

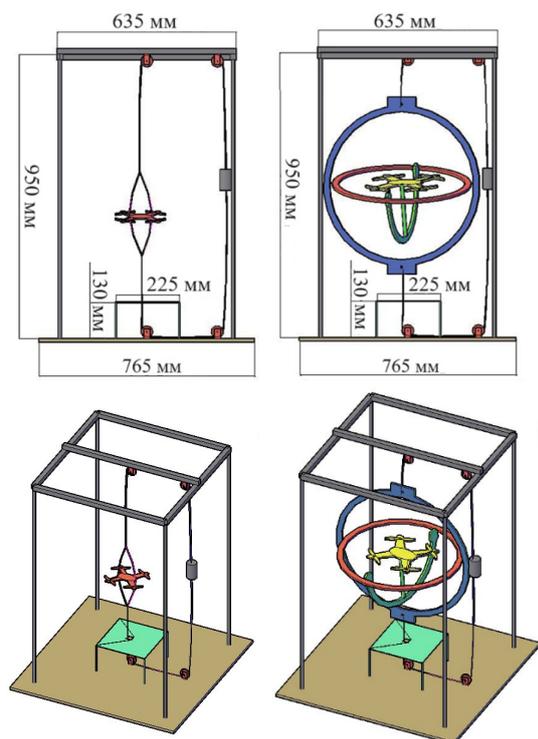


Рис. 3. Разработанные варианты испытательного стенда

Основой конструкции является фанерный лист толщиной 18 мм с ножками, позволяющими установить стенд на поверхность письменного стола. Горизонтальные размеры выбраны с учетом размера стандартного дверного проема и ширины столешницы. В качестве стоек используются резьбовые шпильки диаметром 8 мм и длиной 1 м, что обуславливает вертикальные размеры стенда. Верхний пояс собран из алюминиевых уголков шириной 20 мм и толщиной 2 мм. Все соединения элементов конструкции – резьбовые. Внешний каркас стенда позволяет установить дополнительную защиту в виде сетки.

Для обеспечения трех степеней свободы вращения используется либо скользящая петля, либо карданов подвес. Скользящая петля существенно ограничивает предельные углы наклона БВС. Для перемещения БВС в пространстве предусмотрена одна степень свободы в вертикальном направлении за счет использования подвеса на шнуре и системы шкивов. Для уменьшения силы трения выбран увеличенный диаметр шкивов – до 80 мм, а сами шкивы оснащены подшипниками качения. Для компенсации веса системы подвеса летательного аппарата используется балансировочный груз. Горизонтальный старт обеспечен наличием стартового столика.

Внешний вид изготовленного испытательного стенда показан на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид разработанного испытательного стенда

Для проверки работоспособности стенда были использованы квадрокоптеры Koris 2 HDV, «ГЕОСКАН Пионер» и BetaFPV Aquilla16. Для этого они закреплялись в скользящей петле и устанавливались на стартовый столик. После подключения батареи выполнялась предстартовая проверка, затем летательные аппараты переводились в состояние ARM и перемещением «стика» (англ. stick – «ручка управления») газа вверх подавалась команда на взлет. Манипулируя «стиком» газа, убеждались в управляемости БВС при движениях по вертикали. Зависнув в среднем положении, контролировали стабильность удержания высоты. Затем выполнялась проверка управляемости по осям курса / крена / тангажа путем перемещения «стиков» управления и визуального контроля поведения летательного аппарата.

При этом также выполнялся контроль стабильности удержания высоты. Выполнив программу испытательного полета, квадрокоптеры горизонтировались, затем плавно опускались до уровня стартовой площадки, после чего выполнялся контроль ручного или автоматического перевода летательного аппарата в состояние DISARM.

### Заключение

Таким образом, проведенные тесты показали корректность концепций, положенных в основу конструкции испытательного стенда с четырьмя степенями свободы, и его пригодность для решения задач комплексного тестирования и летных испытаний беспилотных воздушных судов мультироторного типа классов F90–F250. Летательные аппараты данной категории широко применяются для обучения внешних пилотов навыкам управления, в том числе для моделирования аэрофотосъемочных работ с целью создания крупномасштабной топографической продукции и трехмерных моделей объектов местности.

Тестирование квадрокоптера с использованием данного стенда позволяет обнаружить следующие виды ошибок:

– ошибки сборки (неправильные подключение двигателей, установка винтов, направление вращения двигателей);

– ошибки настройки аппаратуры пропорционального радиуправления (неправильная установка каналов управления и их инверсия, нечеткое переключение режимов безопасности и полетных режимов);

– ошибки настройки и калибровки датчиков инерциальной навигационной системы, высотомера;

– автоколебательные процессы, возникающие в каналах управления при отсутствии и наличии внешних факторов, однако данный стенд не предназначен для полного набора испытаний на устойчивость БВС к внешним периодическим воздействиям различной частоты и амплитуды;

– ошибки настройки PID-регуляторов, которые приводят к снижению скорости реакции на команды управления и возникновению автоколебательных процессов.

Углубленный анализ динамической модели БВС можно сделать, используя специализированные измерительные стенды и анализ логов каналов управления, датчиков различного типа и управляющих команд на измерительные механизмы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыльский И. А. Создание виртуальных моделей местности на базе данных лазерного сканирования для нужд сейсморазведки // Интеркарто. Интергис. – 2021. – Т. 27. – Вып. 1. – С. 304–316. – DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-304-316. – EDN IDRMLM.

2. Ефремов А. А. Имитатор сигналов для обучения операторов БПЛА // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития. Междунар. науч.-метод. конф. : сб. материалов (Тамбов, 6–7 мая 2019 г.). – Тамбов : ТГТУ, 2019. – С. 35–37.

3. Султанов Р. О., Шутов А. А., Лихвар Д. С., Еланцев М. О. Моделирование видеоряда полета БПЛА для задач тестирования алгоритмов зрительной навигации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – Вып. 4. – С. 189–193. – DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-189-193 – EDN YTZIAP.

4. Варфоломеев А. Ф., Коваленко А. К., Манухов В. Ф., Калашникова Л. Г. Особенности технологии аэрофотосъемки с применением беспилотных воздушных судов // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – Вып. 8. – С. 58–64. – DOI 10.22389/0016-7126-2020-962-8-58-64. – EDN KYFWTQ.

5. Юрченко В. И. Особенности проектирования аэрофотосъемочных работ с беспилотного воздушного судна // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 65–81. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-65-81. – EDN KXTWGZ.

6. Ламков И. М., Чермошенцев А. Ю., Арбузов С. А., Гук А. П. Исследование возможностей применения квадрокоптера для съемки береговой линии обводненного карьера с целью

государственного кадастрового учета // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 200–209. – EDN XQYXRRL.

7. Банкрутенко А. В., Елисеева Н. С. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в хозяйствах подтаежной зоны Западной Сибири // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 68–76. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-68-76. – EDN CCIFWU.

8. Holybro. QAV250 Kits [Электронный ресурс]. – URL: <https://holybro.com/products/qav250-kit> (дата обращения: 01.12.2023).

9. GitHub. Ardupilot [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/ArduPilot/ardupilot> (дата обращения: 30.11.2023).

10. GitHub. PX4-Autopilot [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/PX4/PX4-Autopilot> (дата обращения: 29.11.2023).

11. GitHub. BLHeli [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/bitdump/BLHeli> (дата обращения: 01.12.2023).

12. Арбузов С. А., Комиссаров А. В., Дедкова В. В., Никитин В. Н., Семенцов А. В. Дистанционное зондирование с беспилотного воздушного судна: оборудование и обработка : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – 174 с.

13. Ardupilot. Simulation [Электронный ресурс]. – URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html> (дата обращения: 28.11.2023).

14. PX4. PX4 User Guide main [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.px4.io/main/en/simulation/> (дата обращения: 30.11.2023).

15. GitHub. bbl2kml [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/stromnag/bbl2kml/wiki/fl2sitl> (дата обращения: 20.11.2023).

16. Educational Technologies for Tomorrow's Workforce. Aidex [Электронный ресурс]. – URL: <https://aidex.com/minds-i/uav-drone-gimbal> (дата обращения: 30.11.2023).

17. Угур Юзгеч, Ирфан Октеп, Хакан Югюн, Али Рыза Гюн, Телат Тюрккылмаз, Метин Кеслер, Джихан Каракузу, Гёкхан Учар. Разработка испытательной платформы для беспилотного летательного аппарата с вращающимся крылом // Научный журнал Университета Биледжик Шейх Эдебали. – 2016. – Т. 3. – Вып. 2. – ISSN: 2458-7575.

18. Яцун С., Емельянова О., Мартинес Леон А. С. Проектирование экспериментального испытательного стенда для конвертоплана типа БПЛА // 2019 Семинар по материалам и технике в авионавтике IOP Conf. Ser. Материаловедение и инженерия 714 (2020) 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/714/1/012009.

19. Саад М. С. Мукрас, Ханафи М. Омар. Разработка 6-степенной испытательной платформы для многороторных летательных аппаратов с подвешенными грузами // Aerospace. – 2021. – № 8. – С. 355. – DOI 10.3390/aerospace8110355. – EDN PGVLJM.

20. Trenicor. Комплекс ТРЕНИКОП [Электронный ресурс]. – URL: <https://trenicor.ru> (дата обращения: 30.11.2023).

21. Grabcad Community. Drone test rig [Электронный ресурс]. – URL: <https://grabcad.com/library/drone-test-rig-1> (дата обращения: 30.11.2023).

### Об авторах

*Вячеслав Николаевич Никитин* – кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

*Василий Дмитриевич Волк* – аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования.

Получено 22.12.2023

© В. Н. Никитин, В. Д. Волк, 2025

## Test bench for comprehensive test and flight testing of multi-rotor unmanned aerial vehicles

V. N. Nikitin<sup>1✉</sup>, V. D. Volk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

**Annotation.** The article describes the created test bench for comprehensive testing of an unmanned aircraft. An analysis of constructive approaches to ensure the mobility of aircraft was carried out. The requirements for the designed test bench are formulated and its design features are determined. A full-scale prototype of the developed test bench was obtained and tested using quadcopters. The experiments carried out showed the functionality of the proposed test bench concept and the full compliance of the prototype with the formulated requirements. A conclusion is made about the possibility of using a test bench for training in the design, configuration and piloting of multi-rotor unmanned aerial vehicles used to obtain aerial photography skills in order to obtain large-scale topographic products and three-dimensional models of terrain objects.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, aerial photography, test bench, flight tests

### REFERENCES

1. Rylsky, I. A. (2021). Lidar virtual models for seismic exploration. *InterCarto. InterGIS [InterCarto. InterGIS]*, Vol. 27, 1, 304–316, DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-304-316, EDN IDRMLM [in Russian].
2. Efremov, A. A. (2019). Signal simulator for training UAV operators. In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnomethodicheskoy konferentsii: Chetvortaya Vserossiyskaya molodozhnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchonnaya dnyu radio. Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya [Proceedings of International Scientific and Practical Conference: Fourth all-russian youth scientific conference dedicated to radio day radio electronics. Problems and development prospects]* (pp. 35–37). Tambov: TSTU Publ. [in Russian].
3. Sultanov, R. O., Shutov, A. A., Likhvar, D. S., & Elantsev, M. O. (2018). Modeling of Videosequence of Flight of UAV for Testing of Visual Navigation Algorithms. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova [Vestnik Kalashnikov Izh STU]*, Vol. 21, 4, 189–193, DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-189-193, EDN YTZIAP [in Russian].
4. Varfolomeev, A. F., Kovalenko, A. K., Manukhov, V. F., & Kalashnikova, L.G. (2020). Special features of aerial survey technology using unmanned aircraft. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*, Vol. 81, 8, 58–64 [in Russian].
5. Yurchenko, V. I. (2015). Design peculiarities of the aerial photography from an unmanned aircraft *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 26, 2, 65–81 [in Russian].
6. Lamkov, I. M., Chermoshentsev, A. Yu., Arbuzov, S. A., & Guk, A. P. The study of the possible application of quadcopter for shooting the coastline of the flooded quarry with the purpose of state cadastral registration (2016). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 200–209, EDN XQYXRL [in Russian].
7. Bankrutenko, A. V., Eliseeva, N. S. (2023). The use of unmanned aerial vehicles in the farms of the subtaiga zone of Western Siberia. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 28, 3, 68–76, DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-68-76, EDN CCIFWU [in Russian].
8. Holybro. QAV250 Kits (2023). Retrieved from <https://holybro.com/products/qav250-kit> (accessed December 01, 2023).
9. GitHub. Ardupilot (2023). Retrieved from <https://github.com/ArduPilot/ardupilot> (accessed November 30, 2023).

10. GitHub. PX4-Autopilot (2023). Retrieved from <https://github.com/PX4/PX4-Autopilot> (accessed November 29, 2023).
11. GitHub. BLHeli (2023). Retrieved from <https://github.com/bitdump/BLHeli> ((accessed December 01, 2023).
12. Arbuzov, S. A., Dedkova, V. V., Komissarov, A. V., Nikitin, V. N., & Semetsov, A. V. (2023). *Distantstionnoye zondirovaniye s bespilotnogo vozdušnogo sudna: oborudovaniye i obrabotka* [Remote sensing from an unmanned aerial vehicle: equipment and processing]. Novosibirsk: SSUGT, 174 p. [in Russian].
13. Ardupilot. Simulation (2023). Retrieved from <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html> (accessed November 28, 2023).
14. PX4. PX4 User Guide main (2023). Retrieved from <https://docs.px4.io/main/en/simulation/> (accessed November 30, 2023).
15. GitHub. bbl2kml (2023). Retrieved from <https://github.com/stronnag/bbl2kml/wiki/fl2sitl> (accessed November 11, 2023).
16. Educational Technologies for Tomorrow's Workforce. Aidex (2023). Retrieved from <https://aidex.com/minds-i/uav-drone-gimbal> (accessed November 30, 2023).
17. Uğur Yüzgeç1, İrfan Ökten, Hakan Üçgün, Ali Rıza Gün, Telat Türkyılmaz, Metin Kesler, Cihan Karakuzu, Gökhan Uçar (2016). Development of the Test Platform for Rotary Wing Unmanned Air Vehicle *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 3, No. 2, ISSN 2458-7575.
18. S Jatsun, O Emelyanova, & A S Martinez Leon (2020). Design of an Experimental Test Bench for a UAV Type Convertiplane // 2019 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 714, 012009, DOI 10.1088/1757-899X/714/1/012009.
19. Saad M. S. Mukras, & Hanafy M. Omar (2021). Development of a 6-DOF Testing Platform for Multirotor Flying Vehicles with Suspended Loads // *Aerospace* 8, 355. DOI 10.3390/aerospace8110355, EDN PGVLJM.
20. Trenicop. TRENİKOP complex (2023). Retrieved from <https://trenicop.ru> (accessed December 01, 2023).
21. Grabcad Community. Drone test rig (2023). Retrieved from <https://grabcad.com/library/drone-test-rig-1> (accessed November 30, 2023).

### Author details

*Vyacheslav N. Nikitin* – Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

*Vasily D. Volk* – Ph. D. Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing.

Received 22.12.2023

© *V. N.Nikitin, V. D.Volk, 2025*