https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449

УДК 629.7

Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона

Асп. Гу Пэнхао[1], инж. В. Н. Рыльков[2], докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый[1]

[1]Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),
[2]Китайско-Белорусское ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» (Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень», Республика Беларусь)

Реферат. Рассматривается задача экспериментального исследования параметров винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата (агродрона). Проведен анализ работ, выполняемых агродронами в сельском хозяйстве, а также популярных серийных образцов агродронов, выпускаемых известными мировыми компаниями, в том числе и в Республике Беларусь. Приведено описание устройства экспериментального стенда, специально разработанного для проведения испытаний работы силовой установки агродрона в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, в которых приходится функционировать агродрону. Описаны основные конструктивные элементы испытательного стенда и измерительные приборы, которые используются для проведения экспериментальных исследований работы воздушного винта и его электропривода. Приводятся результаты проведенных исследований в виде количественных значений параметров вибраций винтомоторной группы агродрона при заданных значениях входных параметров системы управления электроприводом с учетом влияния внешних факторов. Показано, что величины параметров, характеризующих вибрации винтомоторной группы агродрона, могут быть различными в зависимости от режимов работы двигателей и изменения внешних условий. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что при формулировании математической постановки задачи моделирования необходимо учитывать влияние на систему управления агродрона случайных факторов, в том числе и вибраций, обусловленных работой его двигателей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, агродрон, винтомоторная группа, параметры вибраций

Для цитирования: Пэнхао, Гу. Экспериментальное исследование вибраций винтомоторной группы агродрона / Гу Пэнхао, В. Н. Рыльков, А. А. Лобатый // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 445–449. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449

Experimental Study of Vibrations of Agrodrone Propeller-Motor Group

Gu Penghao[1], V. N. Rilkov[2], A. A. Lobaty[1]

[1]Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),
[2]Chinese-Belarusian CJSC “Aviation Technologies and Complexes” (China-Belarus Great Stone Industrial Park, Republic of Belarus)

Abstract. The problem of experimental research of the parameters of the propeller-motor group of an unmanned aerial vehicle (agrodrone) is considered. An analysis of the work performed by agrodrones in agriculture, as well as popular serial models

Адрес для переписки
Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/11,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

Address for correspondence
Lobaty Alexander A.
Belarusian National Technical University
65/11, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

of agrodrones produced by well-known global companies, including in the Republic of Belarus, has been carried out. A description of the design of the experimental stand, specially designed for testing the operation of the agrodrone power plant under conditions as close as possible to the real operating conditions in which the agrodrone has to operate, is given. The main structural elements of the test bench and measuring instruments that are used to conduct experimental studies of the operation of the propeller and its electric drive are described. The results of the research are presented in the form of quantitative values of the vibration parameters of the propeller-motor group of the agrodrone at given values of the input parameters of the electric drive control system, taking into account the influence of external factors. It is shown that the values of the parameters characterizing the vibrations of the propeller-motor group of the agrodrone can be different depending on the operating modes of the engines and changes in external conditions. Based on the results obtained, it was concluded that when formulating the mathematical formulation of the modeling problem, it is necessary to take into account the influence of random factors on the control system of the agrodrone, including vibrations caused by the operation of the agrodrone engines.

Keywords: unmanned aerial vehicle, agrodrone, propeller-motor group, vibration parameters

For citation: Penghao Gu, Rilkov V. N., Lobaty A. A. (2023) Experimental Study of Vibrations of Agrodrone Propeller-Motor Group. *Science and Technique*. 22 (6). 445–449. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-445-449 (in Russian)

Введение

Научные и технологические достижения в развитии техники привели к появлению принципиально новых направлений в создании технических систем и устройств. Одно из таких перспективных направлений – разработка и производство беспилотных летательных аппаратов (БЛА), применение которых охватывает различные сферы человеческой деятельности. Одной из областей применения БЛА является сельское хозяйство, где БЛА (агродроны) существенно дополняют, а иногда и вытесняют традиционные формы и методы обработки почвы и сельскохозяйственных культур [1].

Высокотехнологичные агродроны с распылителем позволяют оптимизировать вложения и увеличить итоговую урожайность за счет автоматизации процесса внесения удобрений и выполнения ряда других работ, необходимых для успешного ведения сельского хозяйства. Применение современных сельскохозяйственных БЛА (агродронов) дает возможность с минимальными трудозатратами повысить продуктивность производственного процесса, из-за чего их все чаще применяют в фермерских хозяйствах в России, Китае, США, Бразилии и странах Европы. Агродроны для сельского хозяйства представляют собой высокотехнологичное оборудование с простой конструкцией и принципом работы. Это мультироторное устройство с четырьмя и более винтами, половина из которых вращается по часовой стрелке, а вторая половина – в противоположную сторону [2].

Устройство систем управления агродронами основано на тех же основных принципах, что и других БЛА, и включает различное наземное и бортовое оборудование, в том числе бесплатформенные инерциальные и спутниковые навигационные системы, позволяющие выполнять полетное задание как при непосредственном управлении человеком – оператором, так и автономно в соответствии с предварительно заданной программой полета [3–5].

Среди известных моделей агродронов можно отметить, в первую очередь, БЛА для сельского хозяйства серии QFTP-32 китайской компании Chufang. Агродрон QFTP-32 имеет универсальную систему управления полетом, 4-ядерный процессор с высокой производительностью, резервирование отдельных подсистем (в случае поломки одного оборудования агродрон все еще может работать), двойную амортизирующую структуру с улучшенной износостойкостью [6]. Его масса 69 кг, а бак объемом 32 л. Опрыскивание осуществляется на высоте 1–3 м с производительностью от 5 до 7 га/ч.

Компания Guardian Agriculture производит для аграриев автономный электрический агродрон Guardian SC1, представляющий собой полностью автономный и электрический агрегат с аккумуляторной батареей, способный нести полезную нагрузку до 180 л рабочего раствора. Беспилотник за день покрывает участок площадью около 18–20 га.

Компания Skymec (ООО «Небесная Механика») выпускает в продажу мультиспектральный БЛА для аграриев и экологов Mavic 3M, который способен выполнять картографические работы с высоким разрешением изображений, мониторить состояние полей, садов и лесов, других объектов. Данный БЛА помогает отслеживать развитие сельскохозяйственных культур на поле или в саду, определяет, в каких зонах следует вносить больше удобрений и где требуется больший полив, а также находит участки с низким количеством саженцев или обилием сорняков [6].

Все более популярными становятся беспилотные летательные аппараты белорусского производства, среди которых необходимо выделить агродрон А60-Х, выпускаемый ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» – комплекс внесения средств защиты растений методом ультрамалообъемного опрыскивания (УМО) на базе беспилотного летательного аппарата собственной разработки [7] (рис. 1).

Рис. 1. Агродрон А60-Х
Fig. 1. Agrodrone A60-X

Агродрон А60-Х предназначен для распыления удобрений, опрыскивания урожая, полива насаждений на ограниченных участках, выполнения других задач в интересах сельского хозяйства. Интеллектуальный сельскохозяйственный комплекс А60-Х – это инновационная система, разработанная для использования в «умном земледелии» в помощь классическим методам внедрения средств защиты растений. Ключевое преимущество комплекса – его экономическая эффективность, которая заключается в повышенной скорости обработки полей, высокой точности обработки с использованием технологии УМО при максимальной автономности.

Особенностью комплекса А60-Х является автоматическое построение полетного задания. Сохранение маршрутов, быстрая зарядка батареи (не более 20 мин) и встроенное программное обеспечение позволяют создавать и настраивать полетные задания прямо на экране пульта управления без использования персонального компьютера. Для большей эффективности работы функции ровера (робота-курьера) выполняет пульт управления, что существенно упрощает работу по определению границ поля, обходу препятствий и зон неполива с возможностью загрузки готовых цифровых карт местности в универсальном формате KML [7].

Испытательный стенд для исследования вибраций

В процессе эксплуатации агродрона его конструкция и установленная на нем аппаратура испытывают воздействие вибраций, которые могут оказывать отрицательное влияние на функционирование всего комплекса. Причиной вибраций являются различные факторы, в первую очередь, работа двигателей, установленных на агродроне.

Для проведения экспериментальных исследований на предприятии ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» (Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень») был разработан и изготовлен испытательный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 2.

Рис. 2. Испытательный стенд
Fig. 2. Test bench

Стенд предназначен для проверки характеристик и отладки режимов работы силовой установки БЛА-электролета (агродрона); проведения испытаний, проверок, экспериментов, исследования свойств и характеристик винтомоторных групп из состава силовой установки агродрона в производственно-технологическом процессе. Стенд предоставляет возможность разработчикам, производителям и пользователям агродрона измерять и оценивать параметры силовой установки и отдельных ее элементов, проверять надежность силовой установки на различных режимах работы, а также определять ресурсные и надежностные характеристики силовой установки. Кроме того, испытательный стенд позволяет проводить теоретическое и практическое обучение, а также переподготовку авиационного персонала.

За защитным ограждением (рис. 2) на неподвижной станине установлен воздушный винт

агродрона, приводимый в движение бесколлекторным электродвигателем. Для проведения исследований работы винтомоторной группы установлены измерительные приборы, среди которых следует отметить измеритель вибраций (виброметр) пьезоэлектрического типа. Кроме того, в состав измерительного оборудования входят: весы напольные для измерения силы тяги, регулятор оборотов, тахометр, ваттметр, тепловизор, светодиодный фонарь.

Кроме аппаратуры, перечисленной выше и изображенной на рис. 2, на отдельном рабочем столе размещены источник электропитания, индикаторы выходных сигналов и другое оборудование, необходимое для проведения исследований в соответствии с поставленными задачами. Данная конструкция экспериментальной установки позволяет проводить исследования основных параметров, характеризующих работу винтомоторной группы агродрона.

Испытательный стенд представляет собой объединенный программно-аппаратный комплекс испытательного оборудования. Наличие такого стенда в производственной или эксплуатирующей организации обеспечивает качественное производство и безаварийную эксплуатацию силовых установок БЛА-электролетов.

Результаты экспериментальных исследований

В табл. 1 приведены некоторые результаты проведенных испытаний работы винтомоторной группы агродрона А60-Х.

Испытания проходил воздушный винт марки 36190CF. Для управления скоростью вращения винта использовался широтно-модулированный (ШИМ) импульсный сигнал напряжения электропитания 50 В.

Анализ полученных результатов показал, что при одних и тех же значениях входных параметров системы выходные параметры, характеризующие вибрации винтомоторной группы агродрона, несколько отличаются, хотя экспериментальные исследования проводились в течение одного дня. Это связано с тем, что эксперимент проводился в помещении, в котором функционировало различное оборудование, работали люди. Все это оказывало отрицательное влияние на чистоту проведения эксперимента.

Таблица 1

Результаты исследований

Research results

Направление вращения	ШИМ, мкс	Тяга, Н	Потребляемый ток, А	Скорость вращения, об/мин	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с^2	Виброперемещение, мм	Температура, °С
CCW	1200	10,9	1,42	1180	0,7	1,5	0,029	22,9
	1500	71,3	14,50	2170	3,1	2,9	0,039	27,5
	1800	193,0	64,50	3540	19,4	15,0	0,157	41,9
CCW	1200	10,8	1,39	1170	0,6	1,7	0,032	22,8
	1500	71,5	14,55	2180	2,9	3,3	0,039	27,7
	1800	191,0	64,50	3570	19,0	15,2	0,150	42,5
CW	1200	10,7	1,42	1170	0,6	2,1	0,052	22,9
	1500	68,6	14,20	2190	3,3	9,4	0,115	27,7
	1800	182,5	62,60	3610	15,6	15,0	0,175	41,7
CW	1200	10,9	1,39	1170	0,6	2,0	0,052	21,9
	1500	68,8	14,30	2180	3,4	9,5	0,120	27,5
	1800	183,0	62,20	3650	15,2	15,3	0,179	41,5

Примечания: CW – направление вращения винта производится по часовой стрелке; CCW – то же против часовой стрелки.

Аналогичные исследования, проведенные через десять дней, показали дополнительные отличия результатов исследований, что свидетельствует о влиянии на работу экспериментальной установки других внешних факторов, таких как температура и влажность окружающей среды и прочего.

ВЫВОДЫ

1. Применение беспилотных летательных аппаратов (агродронов) в сельском хозяйстве является одним из перспективных направлений развития интеллектуального земледелия. Агродрон белорусского производства А60-Х позволяет решать широкий спектр задач обеспечения высокопроизводительного земледелия.

2. Экспериментальное исследование винтомоторной группы агродрона А60-Х показало, что величины параметров, характеризующих вибрации конструктивных элементов агродрона, не выходят за пределы допусков, определяющих границы работоспособности оборудования, установленного на агродроне.

3. Разработка и производство агродронов, как и любых БЛА другого предназначения, в значительной степени основаны на математическом моделировании всех процессов, описывающих их функционирование [8–10]. При формулировании математической постановки

задачи моделирования работы агродрона необходимо учитывать влияние на систему управления агродрона случайных факторов, в том числе и вибраций, обусловленных работой двигателей БЛА. При этом, как видно из экспериментально полученных результатов исследований, величины параметров, характеризующих вибрации, могут быть различными в зависимости от режимов работы двигателей и внешних условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобатый, А. А. Мультикоптер для защиты растений / А. А. Лобатый, Гу Пэнхао // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2023. С. 44–45.
2. Агродроны // Геомир. 2020. Режим доступа: https://www.geomir.ru/publikatsii/agrodrony/?sphrase_id=38033.
3. Моисеев, В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. 768 с.
4. Лобатый, А. А. Математическое моделирование движения летательных аппаратов мультироторного типа / А. А. Лобатый, Гу Пэнхао // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 1. С. 10–15. https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15.
5. Гу Пэнхао. Форсированное управление квадрокоптером / Гу Пэнхао, Ю. А. Леоновец, А. А. Лобатый // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 91–95. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-91-95.
6. Беспилотники в АПК: новые и самые необычные модели дронов. Режим доступа: https://dzen.ru/a/Y-Uazw17UW3pX-Ye.
7. Агродрон А60-Х. Режим доступа: https://agrodrone.by/.
8. Савелов, П. И. Особенности моделирования операторного управления беспилотным летательным аппаратом и его целевой нагрузкой / П. И. Савелов, Гу Пэнхао, А. А. Лобатый // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 4. С. 24–28. 10.21122/2309-4923-2022-4-23-28.
9. Лобатый, А. А. Аналитические методы исследования систем управления беспилотных летательных аппаратов / А. А. Лобатый // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2023. С. 92–93.
10. Mathematical Model of Mobile Robot Orientation According to a Set Route / A. A. Lobaty [и др.] // Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в агропродовольственном секторе: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф., Ташкент, 20–21 апреля 2023 г. Ташкент: ТашГТУ, 2023. С. 187–188.

Поступила 08.08.2023
Подписана в печать 10.10.2023
Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

1. Lobaty A. A., Gu Penghao (2023) Multicopter for Plant Protection. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy XI Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 44–45 (in Russian).
2. Agrodrones (2023). *Geodrony*. Available at: https://www.geomir.ru/publikatsii/agrodrony/?sphrase_id=38033 (in Russian).
3. Moiseev V. S. (2013) *Applied Theory of Control of Unmanned Aerial Vehicles*. Kazan, State Budgetary Institution – Republican Center for Monitoring the Quality of Education, 768 (in Russian).
4. Lobaty A. A., Gu Penghao (2023) Mathematical Modeling of the Movement of Multi-Rotor Aircraft. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (1), 10–15 (in Russian). https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-1-10-15.
5. Gu Penghao, Leonovets Yu. A., Lobaty A. A. (2023) Forced Quadrocopter Control. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (2), 91–95 (in Russian). https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-91-95.
6. *Drones in the Agro-Industrial Complex: New and Most Unusual Drone Models*. Available at: https://dzen.ru/a/Y-Uazw17UW3pX-Ye (in Russian).
7. *Agrodrone A60-X*. Available at: https://agrodrone.by/ (in Russian).
8. Savelov P. I., Lobaty A. A., Gu Penghao (2022) Features of Modeling Operator Control of an Unmanned Aerial Vehicle and its Target Load. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (4), 24–28 (in Russian). https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-4-23-28.
9. Lobaty A. A. (2023) Analytical Methods for Studying Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles. *Innovatsionnye Tekhnologii, Avtomatizatsiya i Mekhatronika v Mashino- i Priborostroenii: Materialy XI Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical and Instrument Engineering. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 92–93 (in Russian).
10. Lobaty A. A. [et al.] (2023) Mathematical Model of Mobile Robot Orientation According to a Set Route. *Problemy i Perspektivy Innovatsionnoi Tekhniki i Tekhnologii v Agroprodovol'stvennom Sektore: Sbornik Nauchnykh Trudov III Mezhdunarodnoi Konferentsii Nauch.-Prakt. Konferentsii, Tashkent, 20–21 aprelya 2023 g.* [Problems and Prospects of Innovative Technology and Technologies in the Agro-Food Sector: Collection of Scientific Papers of the 3rd International Conference of Scientific and Practical Conference, Tashkent, April 20–21, 2023]. Tashkent, Tashkent State Technical University] Publishing House, 187–188 (in Russian).

Received: 08.08.2023
Accepted: 10.10.2023
Published online: 30.11.2023