

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.37

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

Складной роликовый конвейер для автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов

В.П. Дашевский¹, М.М. Бизин², Ю.В. Галыкин³, А.Л. Ронжин⁴

^{1,2,3,4} Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; г. Санкт-Петербург, Россия

¹ dashevskiy.v@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>

² maxim.bizin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>

³ yuri.galykin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>

⁴ ronzhin@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

Аннотация. Эксплуатация агродронов сдерживается отсутствием мобильных решений для их обслуживания в полевых условиях. Сервисное обслуживание сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) вблизи обрабатываемого поля обуславливает использование автономной сервисной платформы (дропоорта). Исследования проведены с целью изучения подходов к автоматизации наземной инфраструктуры воздушных БЛА сельскохозяйственного назначения и создания складного роликового конвейера автономной сервисной платформы (модульного дропоорта конвейерного типа). Предложили конструктивно-технологическую схему мобильной сервисной платформы, осуществляющей перемещение агродрона с помощью складного конвейерного модуля. Разработали складной роликовый конвейер с последовательным зубчато-ременным приводом от шагового двигателя NEMA23/NEMA24 с током фазы около 5 А и планетарным редуктором 1:20. Натурные испытания прототипа конвейерного модуля габаритами 1,88 × 0,90 м в диапазоне скоростей 0,05...0,15 м/с проводили в лабораторных условиях на горизонтальной поверхности и на поверхности с уклоном в 3 и 6 град. с использованием агродрона EFT G630 массой 70 кг и груза весом 100 кг для имитации предельных условий. Потребляемая мощность привода конвейера при транспортировке груза составила до 30 Вт, в том числе при перемещении по поверхности с уклоном 6 град. Конструкция продемонстрировала отказоустойчивость: выход из строя отдельных роликов не нарушал работу системы. Результаты экспериментов подтвердили практическую реализуемость, энергоэффективность и надежность разработанного складного конвейерного модуля и перспективность создания мобильной автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: эксплуатация агродронов; агродрон; БЛА; сервисное обслуживание сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов; складной роликовый конвейер; дропоорт

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFZF-2025-0012 «Теоретические основы и новые технические решения бесшовного управления группой БЛА в недетерминированных средах при выполнении сельскохозяйственных задач»).

Для цитирования: Дашевский В.П., Бизин М.М., Галыкин Ю.В., Ронжин А.Л. Складной роликовый конвейер для автоматизированной системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 2. С. 15-27. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

ORIGINAL ARTICLE

Folding roller conveyor for an automated servicing system of agricultural unmanned aerial vehicles

V.P. Dashevsky¹, M.M. Bizin², Yu.V. Galykin³, A.L. Ronzhin⁴✉

^{1,2,3,4} St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹ dashevskiy.v@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>

² maxim.bizin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>

³ yuri.galykin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>

⁴ ronzhin@iias.spb.su; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

Abstract. The operational efficiency of agricultural drones is currently constrained by the lack of mobile, field-based service solutions. To address this, the use of autonomous service platforms, or “droneports,” is required. This study investigates approaches for automating ground-based support for agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) through the development of a folding, modular conveyor-type droneport. The proposed design features a mobile service platform that utilizes a folding roller conveyor to transport heavy-duty drones. The conveyor is driven by a sequential toothed belt system powered by a NEMA23/NEMA24 stepper motor (5 A phase current) coupled with a 1:20 planetary gearbox. Full-scale laboratory testing was conducted on a 1.88 × 0.90 m prototype at speeds of 0.05 to 0.15 m/s across horizontal and inclined (3° and 6°) surfaces. An EFT G630 agri-drone, weighing 70 kg with a 100 kg payload capacity, was used to simulate extreme operational loads. Results showed that power consumption during transport remained below 30 W, even at a 6° incline. The system demonstrated high fault tolerance; the failure of individual rollers did not disrupt overall operation. The experimental findings confirmed the feasibility, energy efficiency, and reliability of the folding conveyor module, highlighting its potential as a mobile servicing infrastructure for agricultural UAVs.

Keywords: agrodrome operation; agrodrome; unmanned aerial vehicle (UAV); UAV maintenance in agriculture; folding roller conveyor; droneport

Funding. The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. FFZF-2025-0012, “Theoretical Foundations and New Technical Solutions for Seamless Multi-UAV System Control in Non-Deterministic Environments for Agricultural Tasks”).

For citation: Dashevsky V.P., Bizin M.M., Galykin Yu.V., Ronzhin A.L. Folding roller conveyor for an automated servicing system of agricultural unmanned aerial vehicles. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):15-27 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-15-27>

Введение

Интенсификация сельскохозяйственного производства и реализация концепции точного земледелия стимулируют активное внедрение цифровых и роботизированных технологий. Среди них особое место занимает применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) сельскохозяйственного назначения – агродронов для мониторинга и обработки растений и почвы [1, 2]. Преимуществами агродронов являются возможность работы на труднодоступных участках со сложным рельефом без необходимости создания масштабной наземной инфраструктуры, а также низкая стоимость и гибкость при проведении работ [3, 4, 5]. В отличие от прочих видов БЛА агродроны мультикоптерного типа выполняют задачи в специфическом маловысотном режиме с малой скоростью, необходимым для равномерного распыления жидких реагентов. Этот режим полета характеризуется низким аэродинамическим качеством и высоким энергопотреблением, что приводит к необходимости

частой дозаправки рабочего раствора и замены аккумуляторов. Таким образом, эффективная эксплуатация агродронов требует создания специализированной наземной инфраструктуры. Необходимо упростить и автоматизировать процессы подготовки и обслуживания группы воздушных дронов, сократив простой между вылетами в течение рабочей смены.

Существенным фактором, ограничивающим применение агродронов, является удаленность полей от баз их технического обслуживания. Выезд на позицию и возвращение с нее могут занимать несколько часов, что делает нерациональным проведение с помощью агродронов кратковременных работ. Таким образом, эффективная эксплуатация агродронов требует обеспечения длительной автономной работы непосредственно в границах обрабатываемых площадей.

Автоматизированное обслуживание БЛА основывается на концепции общей статической взлетно-посадочной площадки с различной степенью ее автоматизации: от простой платформы с системой

позиционирования до сложного комплекса с манипулятором для замены аккумулятора [6, 7]. Отметим общий недостаток: площадка блокируется на весь цикл обслуживания одного аппарата. Такой подход не учитывает требований к высокой пропускной способности при групповом использовании агродронов. Более того, эти решения не масштабируются для работы с большими объемами жидкостей. Например, при типичной для агродрона скорости распыления 3 л/мин расход раствора достигает нескольких сотен литров за смену. Существующие прототипы дронопортов или не предусматривают наличия вместительных резервуаров для воды в сочетании с системами автоматической подготовки и заправки растворов, или оснащаются полуавтоматическими системами смешения растворов с ручной заправкой их в бак агродрона [8], что небезопасно для человека, и поэтому непригодно для реальной продолжительной работы в поле.

Мобильный дронопорт должен обеспечивать полностью автоматизированное обслуживание БЛА [9, 10, 11], в том числе посадку, обслуживание и взлет, и учитывать требования к полной автономности бортовых систем дронопорта.

Для повышения надежности посадки платформа оснащается вспомогательными системами локальной навигации по оптическим и радиоканалам [12, 13], интегрирующим сенсорные данные для компенсации возмущающих воздействий: ветровых нагрузок, изменения аэродинамических характеристик БЛА ввиду уменьшения массы по мере расходования топлива, неблагоприятных условий освещенности.

Автоматизации наземных систем сервисного обслуживания БЛА сельскохозяйственного назначения посвящен ряд исследований. Разработан прототип подвижной транспортной платформы, предназначенной для обслуживания дронов-опрыскивателей, оснащенной средствами для хранения и передачи носителей энергии, приготовления, хранения и передачи химических материалов, площадками для хранения и транспортировки, взлета и посадки БЛА [14]. Предложена концепция построения дронопорта и представлены результаты имитационного моделирования в компьютерной среде Gazebo по взаимодействию БЛА и дронопорта на разных стадиях сервисного обслуживания [15]. Для мониторинга территорий БЛА разработаны зарядные платформы с открытыми контактными площадками, обеспечивающие зарядку аккумуляторов БЛА разных размеров и допускающие отклонение при посадке [16, 17]. Проведен анализ существующих зарядных станций для БЛА и технических требований к перспективной защитно-зарядной станции обслуживания БЛА, осуществляющих мониторинг и диагностику воздушных линий электропередач [18].

Проблема позиционирования и автоматической посадки БЛА на платформу с помощью методов технического зрения и последующей механической коррекции для точных манипуляций с аккумулятором БЛА рассмотрена в работе [19]. Алгоритмы автоматической посадки БЛА с использованием фрактальных маркеров, обеспечивающих повышение точности позиционирования на разных высотах, и алгоритм перемещения аккумуляторной батареи при обслуживании робота предлагаются в работах [20, 21].

Задача энергообеспечения группы БЛА за счет использования распределенной системы модулей подзарядки и замены аккумуляторов БЛА решается в работе [22]. Концепция компоновки наземной сервисной станции, обеспечивающей взлет/посадку БЛА, замену аккумуляторной батареи и дозаправку бака рабочим раствором, описана в работе [23].

Таким образом, основное внимание исследователей уделяется вопросам посадки и обслуживания энергетической системы БЛА. Вопросы комплексного обслуживания БЛА включая дозаправку рабочим раствором пока остаются нерешенными. Поэтому разработка мобильной сервисной платформы, обеспечивающей автоматизированный автономный непрерывный цикл работы группы агродронов, является весьма актуальной. В качестве способа решения обозначенной задачи предлагается концепция модуля складной посадочной платформы конвейерного типа, перемещаемой на прицепе. Концепция призвана кардинально повысить безопасность, производительность и общий уровень автономности применения БЛА в реальных условиях современного точного земледелия.

Цель исследований: разработка складного роликового конвейера автономной сервисной платформы обслуживания БЛА сельскохозяйственного назначения.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований служил роликовый конвейер мобильной сервисной платформы для обслуживания сельскохозяйственных БЛА. Предметом исследований являлись конструктивные и режимные параметры роликового конвейера мобильной сервисной платформы для обслуживания сельскохозяйственных БЛА.

Требованием к складному конвейеру высокой пропускной способности являлось обеспечение синхронизации процессов выравнивания после посадки, перемещения и выполнения сервисных операций. В предлагаемом дронопорте функции посадки, обслуживания и взлета пространственно разнесены и соединены конвейерной линией (рис. 1).

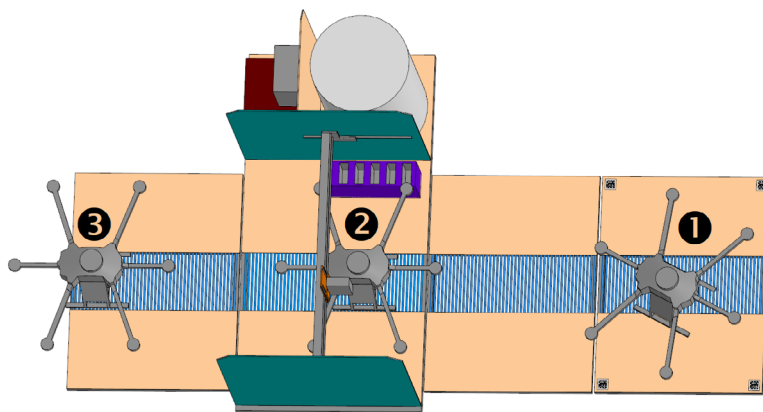


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема мобильной платформы, осуществляющей перемещение агродрона с помощью роликового конвейера:

1 – зона посадки; 2 – зона обслуживания; 3 – зона взлета

Fig. 1. Design and process diagram of the mobile platform moving agrodrones via a roller conveyor:

1 – landing zone; 2 – service zone; 3 – take-off zone

Размах винтов агродронов может превышать 3 м, что больше ширины стандартного автотранспорта, поэтому платформа должна компактно складываться или трансформироваться в случае передислокации между полями и в то же время обеспечивать стабильность в развернутом рабочем состоянии для безопасного приема и выпуска тяжелых БЛА.

Экспериментальный образец роликового конвейера с последовательным зубчато-ременным приводом имеет длину 1,88 м, общее количество роликов – 20, шаг роликов – 0,096 м. Шкивы и ролики изготовлены методом 3D-печати из PETG-пластика для обеспечения оперативности ремонта. В дальнейших исследованиях и серийном производстве для изготовления роликов будет выбран более подходящий материал или будет наноситься покрытие с высокими фрикционными свойствами.

Методика проведения испытаний конвейера включала в себя два этапа: проверка базовой работоспособности на горизонтали и исследование надежности в отягчающих условиях (движение на подъем, работа с частично удаленными роликами).

Натурные испытания конвейерного модуля при тестовых нагрузках проводили в лабораторных условиях на горизонтальной поверхности и на поверхности с уклоном в 3 и 6 град. с использованием снаряженного агродрона EFT G630 массой 70 кг и груза весом 100 кг для имитации предельных условий.

Результаты и их обсуждение

При создании прототипа складного роликового конвейера рассмотрены ленточный и роликовый варианты реализации. Недостатками ленточного конвейера являются большая масса, сложность замены/ремонта ленты в поле, необходимость точной юстировки, высокое энергопотребление по причине

трения скольжения по всей площади и др. Несмотря на достоинства ленточного конвейера (непрерывная опорная поверхность и плавность хода), его проектирование и эксплуатация на мобильной платформе затруднительны. Предпочтение было отдано роликовому конвейеру, для которого характерны модульность (возможность замены одного ролика без разборки всей секции), низкое энергопотребление за счет трения качения, ремонтпригодность в полевых условиях (демонтаж вышедшего из строя узла без специального инструмента).

Изготовленный роликовый конвейер разместили в створке платформы, смонтированной на стальной раме (рис. 2). Опорные направляющие 1 и распорки 7 выполнены из конструкционного алюминиевого профиля. Длина распорок подобрана в соответствии с шириной конвейера и требуемой длиной ролика. Выполненные из листового алюминия опорные панели 11 опорного подшипника 2 закреплены на опорных направляющих. Ролики конвейера включают внешнюю оболочку 5. При изготовлении роликов экспериментального образца использовали полипропиленовую трубу, внутрь которой продевали алюминиевую анодированную трубу, являющуюся одновременно и валом 3, концы которого опираются на подшипники 2, и усилителем жесткости внешней трубы от чрезмерного прогиба под весом дрона. В торцы трубы вмонтированы опорные вставки 4, выполненные методом 3D-печати, на одной из которых сформирован шкив под ремень. Шкив ролика имеет диаметр 0,04 м, количество зубов – 14. Чтобы адаптировать количество роликов к длине секции конвейера, шаг роликов может варьироваться в диапазоне 0,09...0,12 м. Опорные ролики ремня 10 обеспечивают плотное сцепление ремня со шкивами

роликов, чтобы при протягивании ремня он не мог проскальзывать вокруг зубьев шкива. Количество опорных роликов ремня соответствует числу основных конвейерных роликов. Фиксирующая планка опорных подшипников роликов 2 (рис. 3) позволяет зафиксировать опорные подшипники роликов в лотках опорной панели.

Выбран армированный зубчатый ремень 5 (рис. 4) шириной 20 мм, толщиной 3 мм, с шагом зубьев 8 мм. Ведущий шкив ремня рассчитан и получен методом 3D-печати. Внешний диаметр шкива 56 мм имеет 22 зуба.

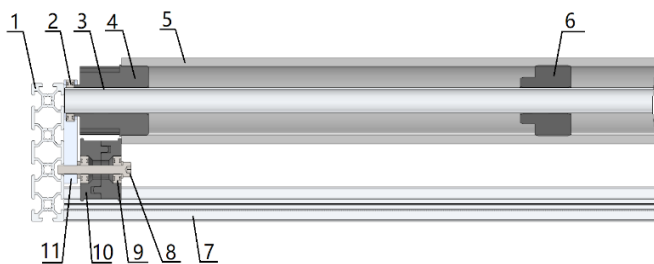


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема роликов и их установка на опоры (в разрезе):

- 1 – опорная направляющая;
- 2 – опорный подшипник основного ролика;
- 3 – вал основного ролика;
- 4 – шкив основного ролика; 5 – внешняя оболочка ролика;
- 6 – усилитель основного ролика;
- 7 – распорка опорных направляющих;
- 8 – винт крепления опорного ролика и опорной панели;
- 9 – подшипник опорного ролика ремня;
- 10 – опорный ролик ремня (из двух половинок);
- 11 – опорная панель подшипников

Fig. 2. Design and process diagram of the rollers and their installation on the supports (section):

- 1 – support guide; 2 – main roller support bearing;
- 3 – main roller shaft; 4 – main roller pulley;
- 5 – outer shell of roller; 6 – main roller reinforcement;
- 7 – support guide spacer;
- 8 – support roller and support panel fastening screw;
- 9 – belt support roller bearing;
- 10 – belt support roller (consisting of two halves);
- 11 – bearing support panel

Привод конвейера включает в себя шаговый двигатель NEMA23 в сборе с планетарным редуктором, который устанавливается на опорной панели (рис. 5). На выходном валу редуктора закреплена муфта ведущего шкива.

Верификацию работоспособности и определение эксплуатационных характеристик провели на собранном опытном образце секции конвейера (рис. 6).

Управление приводом осуществлялось автономным контроллером шагового двигателя, подключенным к драйверу шагового двигателя (DM556). Контроллер позволял задавать ключевые параметры: частоту шаговых импульсов (линейная скорость от 0,0 до 0,2 м/с), направление вращения и профили плавного разгона/торможения. Электропитание системы (24...25 В) обеспечивалось лабораторным источником постоянного тока.

Первостепенной задачей первого этапа испытаний был подбор оптимальной силовой установки, обеспечивающей стабильную работу в заданном диапазоне скоростей (0,05...0,15 м/с) при нагрузке 70...100 кг, а также измерение и анализ энергопотребления. Сначала устанавливали груз в центр конвейера, включали плавный запуск на низкой скорости (~0,02...0,03 м/с) с последующим ее увеличением до номинальных

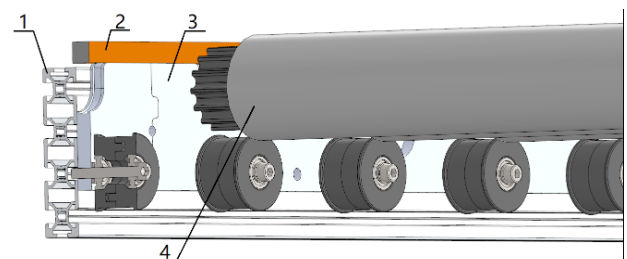


Рис. 3. Фиксация опорных подшипников основных роликов:

- 1 – опорная направляющая; 2 – фиксирующая планка;
- 3 – опорная панель; 4 – основной ролик в сборе

Fig. 3. Fixing the support bearings of the main rollers:

- 1 – support guide; 2 – fixing strip; 3 – support panel;
- 4 – main roller assembly

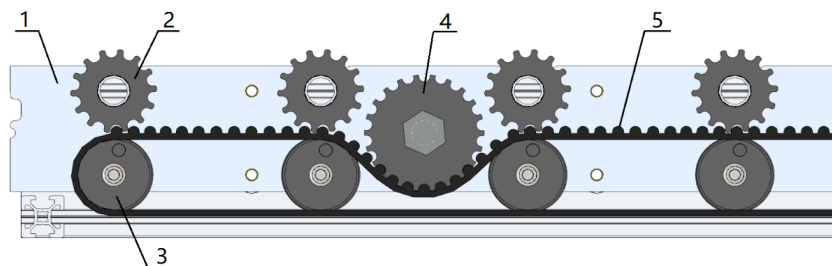


Рис. 4. Фрагмент ременной передачи рядом с ведущим шкивом (в разрезе):

- 1 – опорная панель подшипников; 2 – шкив основного ролика; 3 – опорный ролик ремня;
- 4 – ведущий шкив двигателя; 5 – ремень

Fig. 4. Sectional view of the belt drive near the drive pulley:

- 1 – bearing support panel; 2 – main pulley; 3 – belt support roller; 4 – engine drive pulley; 5 – belt

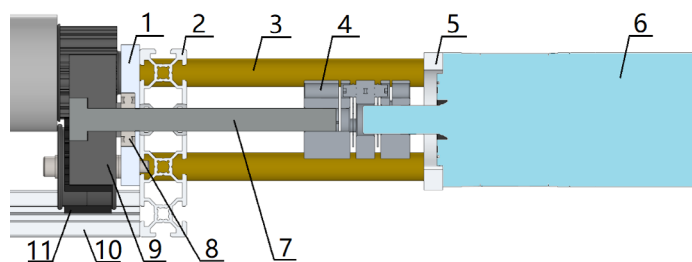


Рис. 5. Подключение двигателя к ременному приводу роликов (в разрезе):

- 1 – опорная панель; 2 – опорная направляющая; 3 – соединительная втулка сервопривода;
4 – муфта сервопривод-ведущий шкив; 5 – пластина крепления сервопривода;
6 – двигатель NEMA23 в сборе с редуктором (сервопривод); 7 – вал ведущего шкива;
8 – опорный подшипник ведущего шкива; 9 – ведущий шкив; 10 – распорка; 11 – ремень

Fig. 5. Connecting the motor to the roller belt drive (section):

- 1 – support panel; 2 – support guide; 3 – servo motor coupling sleeve; 4 – servo motor-drive pulley coupling;
5 – motor mounting plate; 6 – NEMA23 motor assembled with gearbox (servo motor); 7 – drive pulley shaft;
8 – drive pulley support bearing; 9 – drive pulley; 10 – spacer; 11 – belt



Рис. 6. Секция роликового конвейера для автономной сервисной платформы обслуживания сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов

Fig. 6. Roller conveyor section for the agricultural UAV service platform

и максимальных значений (0,05; 0,1; 0,15 м/с). Груз перемещался по всей длине конвейера до достижения крайнего положения, после чего направление движения менялось, и цикл повторялся. Повторность испытаний на каждом режиме составляла 3...5 раз. В ходе испытаний основным количественным показателем была потребляемая электрическая мощность, измеряемая ваттметром источника питания. Фиксировали установившуюся мощность при равномерном движении на каждой скорости, пиковую мощность в момент старта и динамику ее изменения в течение цикла. Линейную скорость определяли путем замера времени прохождения калиброванного участка длиной 1 м с использованием секундомера, а также анализа видеозаписи. Дополнительно определяли максимальную достижимую скорость без срыва управления и оптимальные параметры старта под полной нагрузкой. Испытание проводили последовательно

с тремя различными комбинациями шаговых двигателей и редукторов.

Первоначальная конфигурация с двигателем JK57HS56-2804 (NEMA23, ток фазы 2,8 А) и редуктором 1:10, несмотря на теоретически достаточную паспортную мощность, показала свою несостоятельность для работы с протяженной ременной передачей. Ее момента оказалось недостаточно для уверенного старта и движения на скоростях выше 0,05 м/с – наблюдались регулярные срывы управления.

Для решения проблемы применили более мощные двигатели 57AM23 (NEMA23) и 60HB-87F5AB (NEMA24) с увеличенным током фазы (5 А), объединенные с редуктором, имеющим передаточное число 1:20. Наблюдали кардинальное улучшение характеристик: двигатели уверенно стартовали под полной нагрузкой и обеспечивали стабильную работу на всем требуемом диапазоне скоростей.

При проведении эксперимента использовали лабораторный источник питания INSTЕК PSP-405 с интерфейсом RS-232, позволяющий снимать показания напряжения, тока и мощности с частотой 5 раз в секунду. Для ввода данных написана программа на языке Python, осуществляющая первичную регистрацию мгновенной мощности с источника питания.

Запуск конвейера с агродроном массой 70 кг осуществляли вручную путем включения генератора импульсов в блоке управления драйвером шагового двигателя. Частота импульсов генератора была постоянной и подстраивалась под скорость передвижения груза на конвейере. Скорость вычисляли как отношение фиксированного пути длиной 1 м ко времени его преодоления, регистрируемого с помощью секундомера с точностью 0,1 с. Остановка конвейера производилась вручную после того, как груз преодолел расстояние в 1 м, поэтому графики (рис. 7)

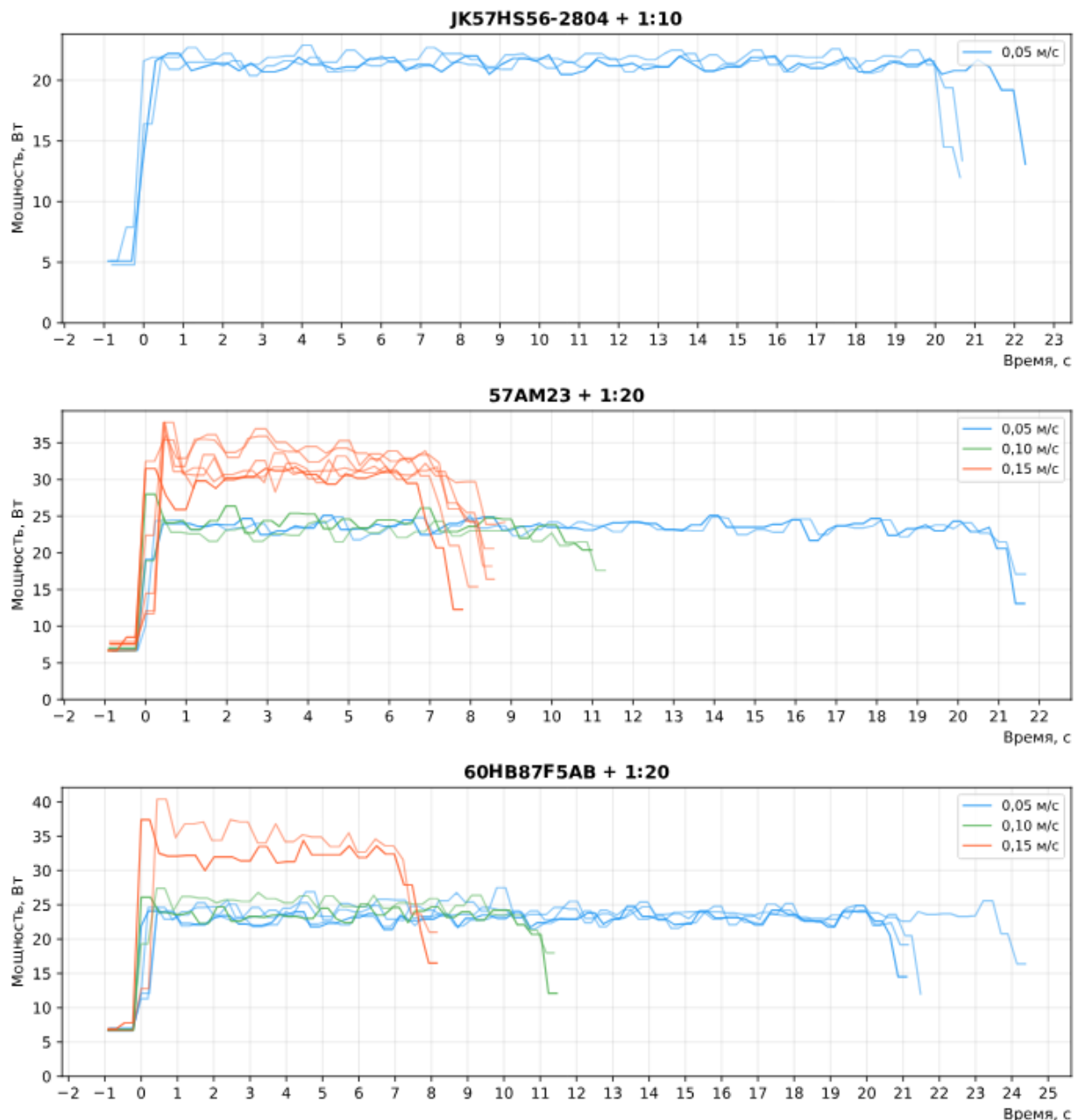


Рис. 7. Потребляемая мощность приводов конвейера на трех скоростях

Fig. 7. Power consumption of conveyor drives at three speeds

имеют несколько больший интервал (примерно на 0,5-1,5 с) времени, чем требовалось для прохождения данного расстояния. Это связано с задержкой в реакции ассистента на команду остановки, и в дальнейшем, при обработке данных, были использованы данные графиков, соответствующие времени прохождения 1 м пути.

На рисунке 7 представлена зависимость мощности, потребляемой каждым приводом, от времени при движении по конвейеру на расстояние 1 м. Отметим, что при скорости 0,05 м/с все три привода стабильно потребляют 21...24 Вт с минимальными колебаниями. С ростом скорости до 0,10 и 0,15 м/с характер потребления меняется: появляются выраженные

пусковые пики и увеличиваются колебания мощности в установившемся режиме (стандартное отклонение растет с ~1 Вт до 4...5 Вт). Привод JK57HS56-2804 с редуктором 1:10 представлен только при 0,05 м/с. При более высоких скоростях происходил срыв управления по причине меньшего передаточного числа редуктора и более низкого тока двигателя (3,2 А против 4,9 А у двух других).

На рисунке 8 представлены исходные данные трех приводов, сгруппированные по одинаковым скоростям. При скорости 0,05 м/с привод JK57HS56-2804 демонстрирует несколько меньшее потребление, но при более высокой скорости ему не хватает момента на валу, чтобы передвигать груз.

Приводы на основе 57АМ23 и 60НВ87F5АВ демонстрируют схожие профили мощности на всех скоростях. Они обладают большим моментом и могут осуществлять старт конвейера с грузом на скорости 0,15 м/с без предварительного разгона. При этом у двигателя 60НВ87F5АВ наблюдаются несколько более высокие пусковые значения мощности (до 40 Вт), тогда как у 57АМ23 пики достигают ~38 Вт. Длительность проходов уменьшается пропорционально скорости: ~21 с при 5 см/с; ~11 с при 10 см/с; ~8 с при 15 см/с.

На рисунке 9 представлены результаты статистической обработки графиков мощности, показаны средние значения мощности каждого привода

в процессе перемещения груза на расстояние в 1 м. Планки погрешности соответствуют стандартному отклонению. Все приводы имеют значительную потребляемую мощность около 20 Вт, которая потребляется всей системой привода независимо от скорости движения груза. При этом заметный рост мощности виден только для скорости 0,15 м/с. Для скорости 0,1 м/с рост мощности, затрачиваемой на передвижение груза, по-видимому, компенсируется снижением потерь на управление шаговым двигателем, так что в итоге общая мощность практически не отличается от мощности для скорости 0,05 м/с.

На рисунке 10 представлена интегральная характеристика мощности привода за время прохождения

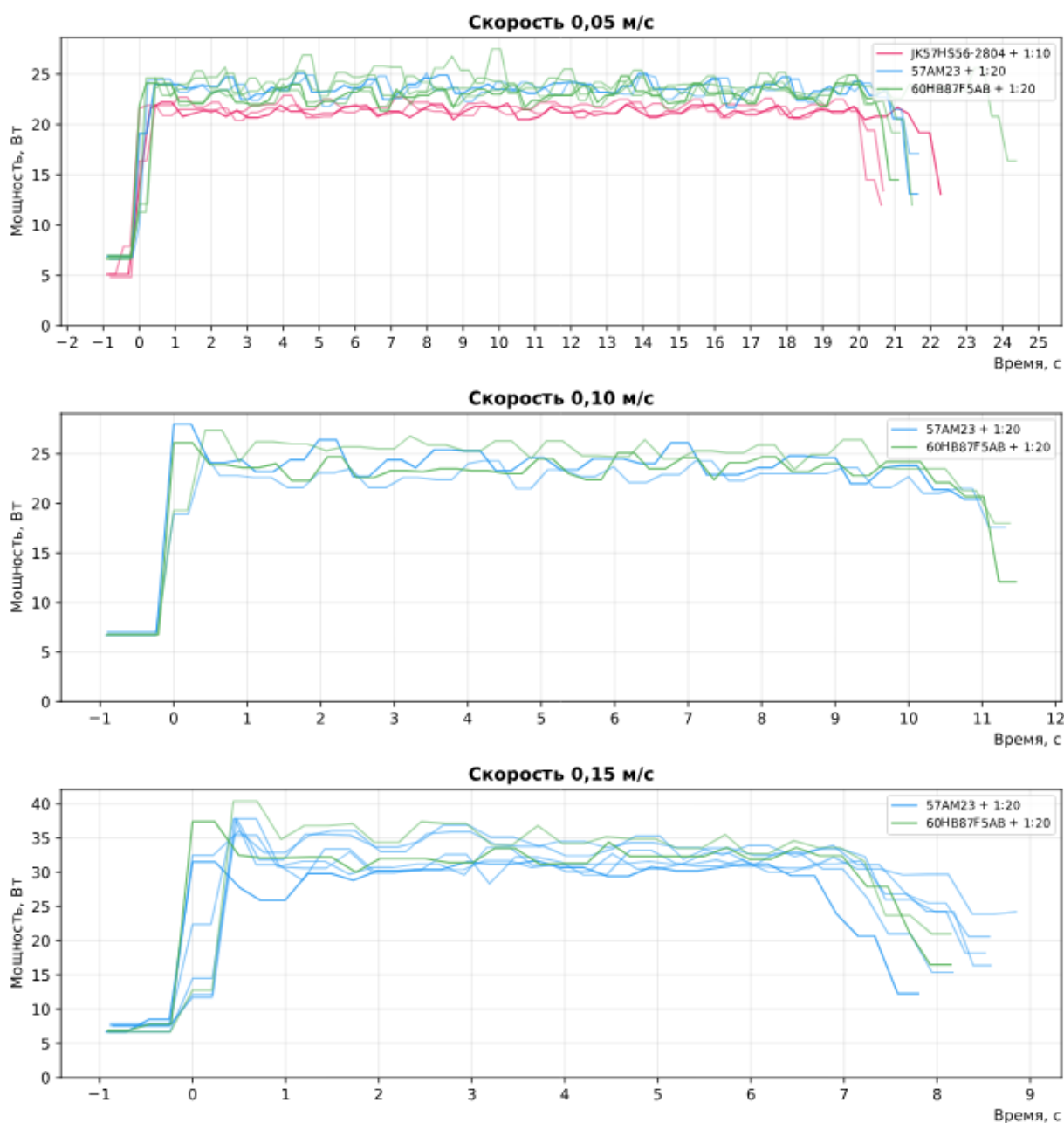


Рис. 8. Мощность приводов в зависимости от скорости конвейера

Fig. 8. Drive power depending on the conveyor speed

груза весом 70 кг расстояния 1 м, которая отражает количество энергии от источника питания, потраченное на перемещение груза. Планки погрешности соответствуют стандартному отклонению. Для низкой скорости КПД привода ниже, и расход энергии зависит от потерь в приводе. При больших скоростях расход энергии стабилизируется (около 220...240 Дж) и определяется в большей степени потерями на трение в самом конвейере. Таким образом, перемещение груза на больших скоростях является более эффективным, а расчетная скорость 0,1 м/с – оптимальной. Для нее одновременно наблюдаются и низкая мощность, потребляемая от источника, и механическая работа.

В ходе экспериментов был выявлен феномен флуктуаций мгновенной мощности в процессе движения груза при постоянной скорости. Это явление обусловлено переменным трением в протяженной ременной передаче, динамическим изменением нагрузки на подшипники роликов и особенностями работы шагового привода. Основная доля потребляемой мощности, около 20 Вт, связана со статическими потерями в шаговом двигателе на омическое сопротивление обмоток. Динамическая добавка, связанная с кинетической энергией груза, относительно невелика. Переход на более мощные приводы с большим запасом вращающего момента

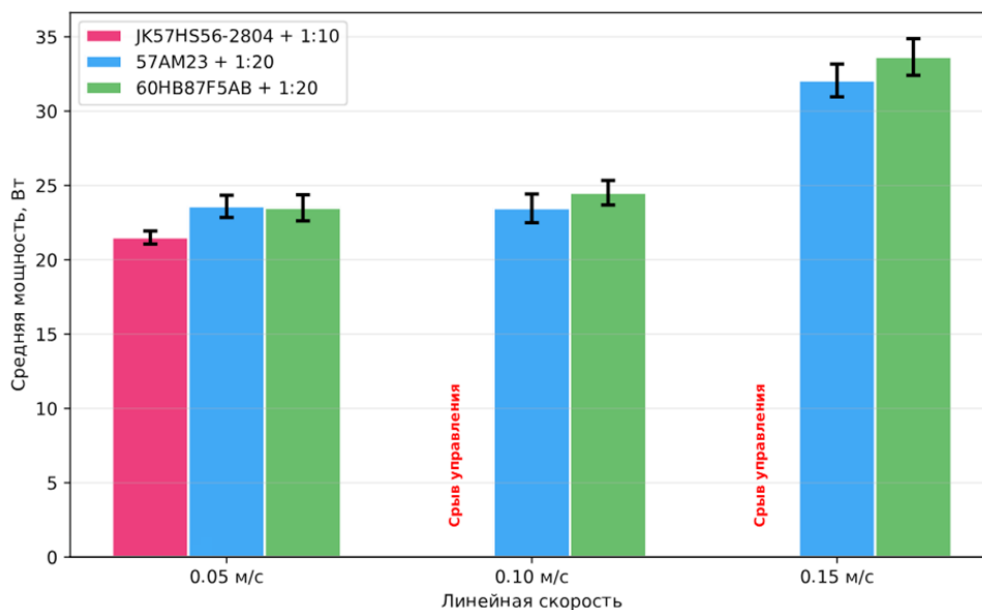


Рис. 9. Сравнение мощности приводов при разных скоростях

Fig. 9. Comparison of drive power at different speeds

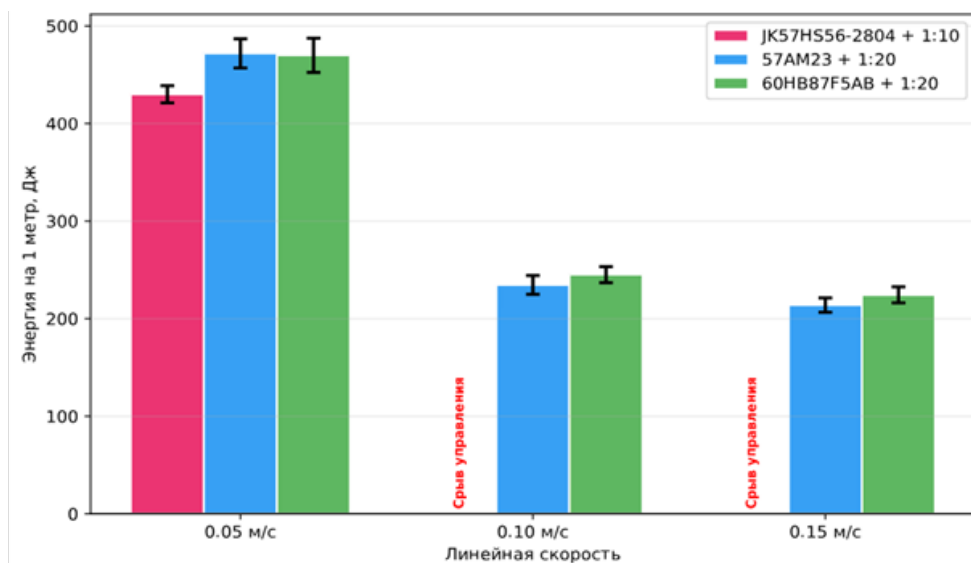


Рис. 10. Сравнение работы приводов на перемещение груза на расстояние 1 м в зависимости от скорости конвейера

Fig. 10. Comparison of drive performance for 1 m cargo displacement relative to the conveyor speed

не увеличил, а в некоторых режимах даже снизил общее энергопотребление, так как двигатели перестали работать в режиме перегрузки, что повысило их КПД.

Для экспериментальной проверки принципа отказоустойчивости и моделирования условий работы на стыке секций были проведены испытания с искусственным удалением одного, а затем двух соседних роликов из центральной части конвейера, что создавало провал длиной 140 и 240 мм (рис. 11).

В обоих случаях конвейер сохранил способность перемещать груз массой 70 кг. Нагрузка успешно перераспределялась на соседние ролики. При наезде на провал наблюдались легкая вибрация и незначительное снижение скорости, однако по мере перекачивания на следующий ролик движение стабилизировалось. Срывов управления или проскальзывания ремня не происходило.

Результаты подтвердили высокую отказоустойчивость и ремонтпригодность конструкции, а также обосновали возможность проектирования стыков секций платформы с увеличенным шагом роликов без потери функциональности.

На следующем этапе исследовали наличие запаса крутящего момента силовой установки и сохранения работоспособности роликового конвейера в условиях неточной установки платформы в горизонтальной плоскости. Испытания проводили с оптимальной конфигурацией привода (NEMA23/24 с редуктором 1:20) при уклоне около 6 град. (0,2 м перепада на длине 2 м).

При испытании агродрона весом 70 кг зафиксировано явление пробуксовки по причине недостаточного сцепления мягких демфирующих чехлов опорных лыж, сделанных из вспененного полиэтилена для теплоизоляции труб, с полипропиленовыми роликами на столь крутом подъеме. При уклоне 3 град. (0,1 м на 2 м) сцепления было достаточно для движения.

При испытании агродрона с контрольным грузом весом 100 кг, размещенном на доске для лучшего сцепления с роликами, система продемонстрировала полную работоспособность. Груз уверенно перемещался вверх по уклону 6 град. со скоростью 0,05...0,1 м/с без срывов управления.

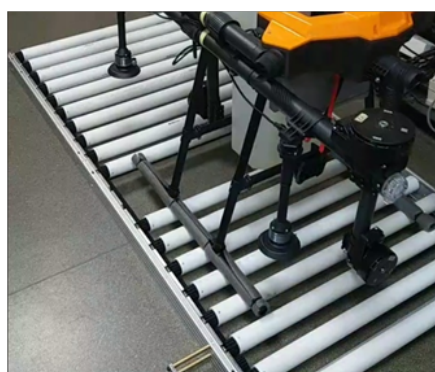
По результатам испытаний можно заключить: практическим ограничением на уклоне является не производительность конвейера, а обеспечение гарантированного сцепления опор агродрона с поверхностью роликов. Возможность работы конвейера на уклоне позволяет существенно снизить требования к точности установки платформы в полевых условиях.

Перспективы дальнейших исследований видятся в таких направлениях, как:

- создание полнофункционального прототипа складной платформы с отработкой кинематики складывания секций;
- разработка и интеграция системы автоматического управления конвейером с системами позиционирования и обслуживания агродрона;
- проведение длительных ресурсных испытаний в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.



а)



б)

Рис. 11. Проверка отказоустойчивости конвейера:

а) без одного ролика; б) без двух роликов

Fig. 11. Conveyor fault tolerance test:

а) without one roller, б) without two rollers

Выводы

Проведенные исследования и экспериментальные испытания подтвердили практическую реализуемость и эффективность разработанной конструкции складного роликового конвейера для мобильных

автономных платформ обслуживания тяжелых сельскохозяйственных БЛА (агродронов):

1. Разработанная конструкция модульного роликового конвейера с групповым ременным приводом обеспечивает надежное перемещение груза массой

до 100 кг как по горизонтали, так и на подъем с уклоном до 6 град.

2. Использование шаговых двигателей NEMA23/NEMA24 с током фазы около 5 А и планетарным редуктором 1:20 обеспечивает стабильную работу во всем требуемом диапазоне скоростей (0,05...0,15 м/с) и достаточный запас момента для преодоления пиковых нагрузок, характерных для протяженной ременной передачи.

3. Фактическое энергопотребление при транспортировке груза 70...100 кг составляет 20...25 Вт на номинальной скорости 0,1 м/с, что обеспечивает возможность автономной работы от полевых

источников энергии. Наблюдаемая нелинейная зависимость мощности от скорости со значительной статической мощностью указывает на значительный вклад электромеханических потерь привода и сухого трения покоя.

4. Конструкция обладает высокой отказоустойчивостью, сохраняя работоспособность при выходе из строя или демонтаже отдельных роликов.

5. Существенный запас по моменту позволяет эксплуатировать конвейер при значительных отклонениях от горизонтали, снижая требования к точности установки платформы в поле.

Список источников

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манокхина А.А. и др. Применение микроэлементов при выращивании картофеля – предпосылки использования дронов // *Агроинженерия*. 2021. № 4 (104). С. 14-20. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-14-20>
2. Степанов А.С., Фомина Е.А., Илларионова Л.В. и др. Аппроксимация временных рядов индексов вегетации (NDVI и EVI) для мониторинга сельхозкультур (посевов) Хабаровского края // *Информатика и автоматизация*. 2023. № 22 (6). С. 1473-1498. <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.8>
3. Ronzhin A., Figurek A., Surovtsev V., Dibirova K. Digital transformation and precision farming as catalysts of rural development. *Land*. 2025;14:1464. <https://doi.org/10.3390/land14071464> EDN: NAHRUS
4. Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 3. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Горный В.И., Балун О.В., Киселев А.В. и др. Алгоритм применения материалов спутниковых съемок для выбора перспективных участков при интродукции теплолюбивых сельскохозяйственных культур (на примере Новгородской области) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22, № 3. С. 64-80. EDN: OLUOBV
6. Astapova M., Saveliev A., Ryabinov A. Application of unmanned aerial vehicles for precision spraying of chemicals in agronomic operations: A case study of potato desiccation. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2024;397:71-81. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7_6
7. Юсупов Р.Х., Колесник Л.В. Система аварийной посадки беспилотного летательного аппарата сельскохозяйственного назначения // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. № 3 (85). С. 59-64. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-59-64>
8. Jindo K., Teklu M.G., van Boheeman K. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for detection and prediction of damage caused by potato cyst nematode *G. pallida* on selected potato cultivars. *Remote Sensing*. 2023;15:1429. <https://doi.org/10.3390/rs15051429>
9. Kong J., Xie M., Wang H. Integrating autonomous vehicles and drones for last-mile delivery: A routing problem with two types of drones and multiple visits. *Drones*. 2025;9(4):280. <https://doi.org/10.3390/drones9040280>

References

1. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Shabanov N.T., Chayka V.A. Application of trace elements in potato cultivation – prerequisites for the use of drones. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;4:14-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-14-20>
2. Stepanov A.S., Fomina E.A., Illarionova L.V. et al. Vegetation indices (NDVI and EVI) time series approximation for monitoring crops of Khabarovsk Territory. *Informatics and Automation*. 2023;22:1473-1498. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.8>
3. Ronzhin A., Figurek A., Surovtsev V., Dibirova K. Digital transformation and precision farming as catalysts of rural development. *Land*. 2025;14:1464. <https://doi.org/10.3390/land14071464>
4. Starostin I.A., Davydova S.A., Eshchin A.V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):49-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>
5. Gornyy V.I., Balun O.V., Kiselev A.V. et al. Algorithm for using satellite imagery to identify promising areas for introduction of heat-loving agricultural crops: A case study of Novgorod Region. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025;22(3):64-80. (In Russ.)
6. Astapova M., Saveliev A., Ryabinov A. Application of unmanned aerial vehicles for precision spraying of chemicals in agronomic operations: A case study of potato desiccation. *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2024;397:71-81. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4410-7_6
7. Yusupov R.Kh., Kolesnik L.V. Emergency landing of an unmanned aerial vehicle for agricultural purpose. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2018;(3):59-64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-59-64>
8. Jindo K., Teklu M.G., van Boheeman K. et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for detection and prediction of damage caused by potato cyst nematode *G. pallida* on selected potato cultivars. *Remote Sensing*. 2023;15:1429. <https://doi.org/10.3390/rs15051429>
9. Kong J., Xie M., Wang H. Integrating autonomous vehicles and drones for last-mile delivery: A routing problem with two types of drones and multiple visits. *Drones*. 2025;9(4):280. <https://doi.org/10.3390/drones9040280>
10. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A. Planning UAV flight trajectories for monitoring large areas. *Informatics and Automation*. 2025;24(3):791-827. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.3>

10. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А. Планирование траектории полета БЛА при мониторинге большой области // Информатика и автоматизация. 2025. № 3 (24) С. 791-827. <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.3>
11. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. С. 11. EDN: ZHNXYH <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
12. Антипов А.С., Кокуньо Ю.Г., Вольф Д.А., Широков А.С. Синтез комбинированного управления ориентацией и высотой квадрокоптера на основе блочного подхода с сигмовидными обратными связями // Информатика и автоматизация. 2025. Т. 24, № 3. С. 745-790. <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.2>
13. Кулешов С.В., Кваснов А.В., Зайцева А.А., Ронжин А.Л. Комплексный подход к визуальной навигации по естественным ориентирам для БЛА, работающих в условиях недоступности ГНСС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2. С. 269-278. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-269-278>
14. Загазежева О.З., Бжихатлов К.Ч., Бароков Х.А., Кантiev З.Ю. Переход к роботизированным технологиям в сельских территориях на примере создания опытного района для разработки и внедрения беспилотных интеллектуальных робототехнических систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (110). С. 186-193. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193>
15. Bouček Z., Neduchal P., Flidr M. DronePort: smart drone battery management system. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2021). Lecture Notes in Computer Science. 2021;12998:14-26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_2
16. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р. Сравнительная характеристика автоматических зарядных и обменно-зарядных станций для обслуживания малых электрических беспилотных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 2. С. 3-10. EDN: YWLMNF
17. Овчинников А.В., Новикова К.О., Фетисов В.С. Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 2. С. 80-89. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>
18. Воденников Д.А., Жилкина Ю.В. Сравнительно-оценочный анализ зарядно-защитных станций для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17, № 1 (65). С. 51-70. EDN: GFYWQK
19. Нгуа Ндонг Авеле Ж.Б., Горяинов В.С. Док-станция для БЛА: исследование построения автономной взлетно-посадочной платформы для беспилотных летательных аппаратов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2023. Т. 16, № 9. С. 38-48. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48>
20. Kozyr P., Vasunina Y., Saveliev A. Algorithm for replacing the battery of a robotic tool using servicing mobile robots on inhomogeneous surfaces. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2022). Lecture Notes in Computer Science. 2022;13719:296-283. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_24
21. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2023). Lecture Notes in Computer Science. 2023;14214:357-368. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32
22. Костюков В.А., Бутенко М.Ю., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д. Исследование распределенной системы станций подзарядки для энергообеспечения группы БЛА мультикоптерного
11. Ngo Q.T., Solenaya O.Y., Ronzhin A.L. Analysis of mobile robotic platforms used to batteries service of unmanned aerial vehicles in autonomous missions. *Trudy MAI*. 2017;95:11. (In Russ.) <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
12. Antipov A., Kokunko J., Wolf D., Shirokov A. Synthesis of combined quadcopter attitude and altitude control based on block approach with sigmoidal feedbacks. *Informatika and Automation*. 2025;24(3):745-790. (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/ia.24.3.2>
13. Kuleshov S.V., Kvasnov A.V., Zaytseva A.A., Ronzhin A.L. Multipurpose approach to visual navigation based on landscapes for UAVs operating in GNSS-unavailable conditions. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2025;2:269-278. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-269-278>
14. Zagazezheva O.Z., Bzhikhatlov K.Ch., Barokov Kh.A., Kantiev Z.Yu. Transition to robotic technologies in rural areas on the example of creating a pilot area for the development and implementation of unmanned intelligent robotic systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):186-193. (In Russ.) <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-186-193>
15. Bouček Z., Neduchal P., Flidr M. DronePort: smart drone battery management system. In: Interactive Collaborative Robotics (ICR2021). *Lecture Notes in Computer Science*. 2021;12998:14-26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87725-5_2
16. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R. Comparative estimation of automatic charging and exchange-charging stations for maintenance of small electric unmanned aerial vehicles. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2019;2:3-10. (In Russ.)
17. Ovchinnikov A.V., Novikova K.O., Fetisov V.S. Recharge of VTOL UAVs on landing platforms with adaptable contact band width. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023;19(2):80-89. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-80-89>
18. Vodennikov D.A., Zhilkina Yu.V. Comparative and evaluative analysis of charging and protective stations for unmanned aerial vehicles. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2025;17(1):51-70. (In Russ.)
19. Ngoua Ndong Avele J.B., Goryainov V.S. UAV Docking station: Study on building an autonomous takeoff and landing platform for unmanned aerial vehicles. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2023;16(9):38-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-9-38-48>
20. Kozyr P., Vasunina Y., Saveliev A. Algorithm for replacing the battery of a robotic tool using servicing mobile robots on inhomogeneous surfaces. In: *Interactive Collaborative Robotics (ICR2022)*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2022;13719:296-283. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_24
21. Anikin D., Ryabinov A., Saveliev A., Semenov A. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker. In: *Interactive Collaborative Robotics (ICR2023)*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2023;14214:357-368. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32
22. Kostyukov V.A., Butenko M.Yu., Gistsov V.G., Evdokimov I.D. Investigation of a distributed system of charging stations for the power supply of a group of multicopter-type UAVs. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;6:138-150. (In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-138-150>
23. Kuzmenkov M., Tatur M., Guzband I. System design methodology and preliminary design of a robotic service system for agricultural drones. In: Ronzhin A., Kundius V., Survotsev V. (eds) *Robotics in Agriculture. ADOP 2025. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2026. vol 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2_10

типа // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 6 (236). С. 138-150. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-6-138-150>

23. Kuzmenkov M., Tatur M., Guzband I. System design methodology and preliminary design of a robotic service system for agricultural drones. In: Ronzhin A., Kundius V., Survtsev V. (eds) Robotics in Agriculture. ADOP 2025. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2026. vol 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-07171-2_10

Информация об авторах

- ¹ **Дашевский Владимир Павлович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; vladimir.dashevsky@gmail.com; SPIN-код: 7675-2463; <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>
- ² **Бизин Максим Михайлович**, ведущий инженер; maxim.bizin@strategic-it.ru; SPIN-код: 5499-4214; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>
- ³ **Галькин Юрий Валерьевич**, инженер-конструктор; yuri.galykin@strategic-it.ru; SPIN-код: 8448-3285; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>
- ⁴ **Ронжин Андрей Леонидович**, д-р техн. наук, профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник; ronzhin@iias.spb.su; SPIN-код: 5579-4815; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>
- ^{1,2,3,4} Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; 199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Вклад авторов

В.П. Дашевский – методология, проведение расчетов, аналитический обзор;
 М.М. Бизин – исследование и описание конструктивно-технологических схем, изготовление и сборка опытного образца;
 Ю.В. Галькин – разработка моделей опытного образца, сборка образца и доработка конструкции, проведение экспериментов;
 А.Л. Ронжин – формулирование основной концепции исследований, аналитический обзор.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 24.10.2025, после рецензирования и доработки 05.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

Author Information

- Vladimir P. Dashevsky**¹, CSc (Eng), Senior Research Engineer, vladimir.dashevsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2285-1936>
- Maksim M. Bizin**², Lead Engineer; maxim.bizin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2314-9715>
- Yuri V. Galykin**³, Design Engineer; yuri.galykin@strategic-it.ru; <https://orcid.org/0009-0000-1274-9754>
- Andrey L. Ronzhin**⁴, DSc (Eng), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Research Engineer; ronzhin@iias.spb.su; Researcher ID: A-2930-2012; Scopus Author ID: 16643978200; <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>
- ^{1,2,3,4} St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 14th Line of Vasilievsky Island, 39, Russia, 199178

Author Contributions

V.P. Dashevsky – research methodology; data curation; literature review;
 M.M. Bizin – investigation; formal analysis; resources;
 Yu.V. Galykin – investigation; resources; validation;
 A.L. Ronzhin – conceptualization; literature review; data curation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 24.10.2025; Revised 05.03.2025; Accepted 26.03.2026