

СЕКЦИЯ 2

«Инновации в проектировании и производстве машин и оборудования для АПК»

УДК 631.3-52:004.896

Кутырёв А.И., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
Хорт Д.О., доктор технических наук, главный научный сотрудник;
Смирнов И.Г., доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник
*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
г. Москва, Российская Федерация*

РАЗРАБОТКА ГУСЕНИЧНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ С СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА САДОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Аннотация. В статье представлена разработанная гусеничная роботизированная платформа для мониторинга садовых насаждений с системой компьютерного зрения на основе нейросетевых алгоритмов (YOLO) и высокоточным позиционированием РТК. Описаны конструктивные особенности платформы, методика автономного построения маршрутов и обработки видеоданных. Роботизированная платформа обеспечивает учёт цветков, завязей и плодов с пространственной привязкой данных к каждому дереву, инвентаризацию насаждений и формирование цифровых карт урожайности.

Abstract. The paper presents the developed tracked robotic platform for orchard monitoring with a computer vision system based on neural network algorithms (YOLO) and RTK high-precision positioning. The design features of the platform, the method of autonomous route planning and video data processing are described. The platform provides counting of flowers, ovaries and fruits with spatial reference to each tree, inventory of plants and generation of digital yield maps.

Ключевые слова: роботизированная платформа, гусеничное шасси, компьютерное зрение, нейросетевые алгоритмы, мониторинг садов, инвентаризация насаждений, прогнозирование урожайности.

Keywords: robotic platform, tracked chassis, computer vision, neural network algorithms, orchard monitoring, orchard inventory, yield prediction.

Своевременный и точный мониторинг промышленных садовых насаждений предполагает ранний учёт количества цветков, завязей и плодов, а также диагностику их состояния [1]. Современные нейросетевые алгоритмы компьютерного зрения, в частности свёрточные нейронные сети (CNN, Convolutional Neural Network), позволяют одновременно решать обе задачи: подсчитывать количество биологических объектов в кроне и классифицировать их состояние [2-4]. Это создаёт основу не только для оценки текущего состояния деревьев, но и для прогнозирования урожайности [5].

Однако на практике внедрение таких алгоритмов ограничено методами сбора первичных данных. Традиционный визуальный контроль агронома отличается высокой трудоёмкостью и субъективностью, а стационарные сенсорные сети, как правило, имеют низкую плотность размещения, что исключает мониторинг отдельных деревьев и не учитывает пространственную неоднородность показателей (различие состояния деревьев на разных участках сада) [6]. В связи с этим перспективным решением становится применение мобильных роботизированных систем, оснащённых компьютерным зрением и способных обеспечивать сбор данных на уровне каждого дерева.

Гусеничные роботизированные платформы обладают высокой проходимостью по междурядьям, позволяют нести полезную нагрузку (RGB и мультиспектральные камеры, сенсоры) и могут работать в автономном режиме [7-9]. Интеграция в такую платформу системы компьютерного зрения на основе нейросетевых алгоритмов обеспечивает распознавание биологических объектов (цветки, завязи, плоды, листья) в реальном времени без участия человека [1,2], а также выявление погибших деревьев для инвентаризации сада [10], с пространственной локализацией данных на уровне каждого дерева. Однако, несмотря на наличие отдельных коммерческих решений, задача создания гусеничной роботизированной платформы с системой компьютерного зрения для автоматизированного сбора данных и последующего прогноза урожая остаётся актуальной.

Целью исследований является разработка гусеничной роботизированной платформы с интегрированной системой высокоточного позиционирования и компьютерного зрения для автоматизированного мониторинга садовых насаждений. В статье представлены конструктивные особенности платформы, методика автономного построения маршрутов, алгоритмы стабилизации движения в условиях частичной потери навигационного сигнала, а также программно-аппаратный комплекс обработки видеоданных с пространственной привязкой.

В результате проведённых исследований в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ разработана гусеничная роботизированная платформа. Роботизированная платформа оснащена двумя синхронными электродвигателями на постоянных магнитах, каждый номинальной мощностью 750 Вт, со встроенными датчиками частоты вращения и направления движения. Управление двигателями осуществляется контроллерами FarDriver 72340, пиковая выходная мощность которых достигает 2000 Вт. Питание тяговых двигателей обеспечивается литиевой аккумуляторной батареей с номинальным напряжением 48 В и ёмкостью 40 А·ч. За работу АКБ отвечает система управления Daly Smart BMS 13S, реализующая защиту ячеек и балансировку заряда. Питание бортовой электроники, обо-

рудования и станции RTK осуществляется от двух свинцово-кислотных аккумуляторов напряжением 12 В с суммарной ёмкостью 80 А·ч. Зарядка АКБ выполняется двумя устройствами: источник для тяговой батареи 48 В обеспечивает ток заряда 5 А, а устройство для электроники и RTK 12 В выдаёт ток заряда 7 А. Расчётное время восстановления ёмкости тягового аккумулятора составляет 8 часов ($40 \text{ А} \cdot \text{ч} / 5 \text{ А}$), для вспомогательной батареи – 11 часов ($80 \text{ А} \cdot \text{ч} / 7 \text{ А}$). Полное время зарядки всей платформы составляет 11 часов. Для обеспечения резервного управления и отладки предусмотрено ручное дистанционное управление с помощью радиоканального пульта FlySky i6.

Общий вид разработанной гусеничной роботизированной платформы представлен на рисунке 1.

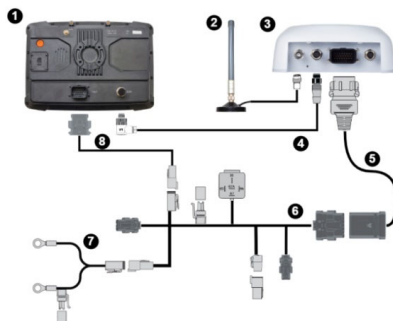


Рисунок 1 – Роботизированная гусеничная платформа для мониторинга садовых насаждений

Для обеспечения автоматического движения платформы в междурядьях используется система высокоточного позиционирования на базе RTK (Real Time Kinematic). В состав системы входят следующие компоненты. Навигационный контроллер КНК-01 представляет собой многочастотный ГНСС-приёмник, поддерживающий спутниковые сигналы: GPS (L1C/A, L2C, L2P(Y), L5), ГЛОНАСС (G1, G2), Galileo (E1, E5a, E5b, E6), BeiDou (B1I, B2I, B1c, B2a, B2b, B3) и QZSS. Контроллер обеспечивает приём поправок RTK в форматах RTCM 3.x, CMR/CMR+ через встроенный УКВ-приёмник с поддержкой протоколов TrimTalk, TrimMark3 и Transparent EOT. Отклонение от заданной линии в режиме RTK в условиях сада не превышает 2,5 см.

Для отображения навигационной информации и управления маршрутами используется терминал МО-101 – 10,1-дюймовый сенсорный дисплей (разрешение 1024×600 , яркость 600 кд/м^2) на базе Android с предус-

тановленным программным обеспечением «Итэлма АгроДрайв». Терминал обеспечивает интерфейс для создания маршрутов, контроля параметров движения и отображения навигационной информации. Он оснащён модулями 4G/LTE, Wi-Fi, Bluetooth, CAN и Ethernet (рисунок 2).



1 – терминал, 2 – антенна УКВ RTK с кабелем подключения,
3 – навигационный контроллер, 4 – кабель подключения терминала,
5 – кабель подключения к основному разъёму КНК-01,
6 – кабель управления и питания, 7 – кабель питания, 8 – кабель питания терминала
Рисунок 2 – Система высокоточного позиционирования на базе RTK

Приём поправок от базовой станции осуществляется через RTK-антенну MG-Q470, работающую в УКВ-диапазоне 410–470 МГц. В паре с УКВ-радиомодемом (2 Вт на платформе, 35 Вт на базе) антенна обеспечивает передачу поправок на расстоянии до 1,5 км. Базовая станция RTK разворачивается стационарно на штативе вблизи обследуемого участка (на удалении 1500–2000 м от крайних рядов). В её состав входят второй навигационный контроллер КНК-01, внешняя многочастотная ГНСС-антенна АТ360 и 35-ваттный УКВ-радиомодем с антенной, установленной на телескопической мачте высотой 4 м. Координаты базы задаются в режиме FIX после усреднения в течение 30 минут, что обеспечивает фиксированную опорную точку с ошибкой менее 1 см. Настройка базы выполняется через веб-интерфейс, где контролируется количество видимых спутников, качество сигнала и режим передачи поправок. Дополнительно система включает датчики обратной связи, включая энкодеры на колёсах, гироскоп и электронный компас (IMU), которые позволяют поддерживать курс и сглаживать кратковременные потери RTK-сигнала при проезде под плотной кроной деревьев.

Перед началом полевых учётов выполняется создание маршрута с использованием разработанного программного обеспечения «Навигация по RTK» с управлением Arduino. Методика предварительного картографирования предполагает перевод платформы в режим дистанционного управления, при котором оператор с помощью пульта ДУ последовательно фикси-

рует GPS-координаты начала и конца каждого ряда, исключая необходимость традиционного пешего обхода междурядий. Собранные пары точек формируют массив опорных координат, который после фильтрации обрабатывается алгоритмом генерации маршрута. Алгоритм автоматически строит челночную траекторию, соединяя попарно нижние и верхние точки рядов, добавляет плавные повороты (кривые Безье) и выделяет прямолинейные участки длиной не менее 10 м, на которых обеспечивается равномерная скорость движения платформы для качественной видеосъёмки (рисунок 3).

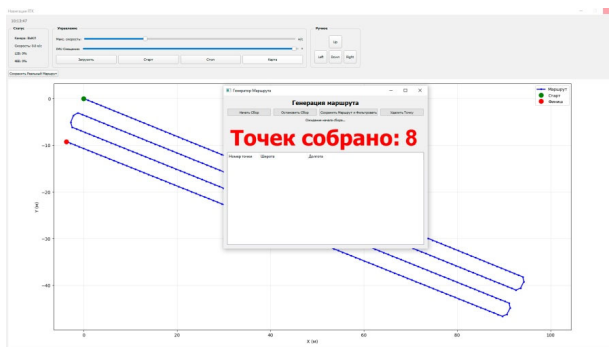


Рисунок 3 – Пример создания маршрута движения гусеничной роботизированной платформы с использованием разработанного программного обеспечения «Навигация по RTK»

Дополнительно генерируются два вспомогательных файла: маршрут_on_camera.txt и маршрут_off_camera.txt, содержащие координаты активации и деактивации видеозаписи. Точки включения/выключения камеры задаются на расстоянии 2 м от границ ряда, что обеспечивает непрерывность съёмки кроны при въезде и выезде из междурядья. Перед запуском автономного режима выполняется калибровка направления движения с помощью IMU. В интерфейсе программного обеспечения предусматривается ручная компенсация магнитного смещения (IMU Offset), позволяющая согласовать показания электронного компаса с фактическим курсом платформы и устранить влияние металлических элементов конструкции.

После загрузки маршрута на дисплее отображается траектория движения. Оператор задаёт максимальную скорость движения (диапазон 0,1-0,8 м/с; для учётов устанавливается 0,2 м/с) и инициирует режим автономной навигации. Платформа начинает движение по первому ряду. В реальном времени на дисплее отображаются текущее положение, направление, пройденный путь, а также параметры RTK-сигнала (количество спутников, HRMS/VRMS ошибки, качество связи с базой). При снижении качества навигационного сигнала ниже порогового значения система автоматически ограничивает скорость до 0,2 м/с, что обеспечивает устой-

чивость работы алгоритмов компьютерного зрения и предотвращает накопление ошибок позиционирования. На всём маршруте платформа движется без участия оператора, при этом сохранена возможность экстренного ручного вмешательства через пульт ДУ или панель управления. По завершении маршрута система автоматически останавливается, и оператор сохраняет пройденный путь в виде двух файлов: .txt с GPS-координатами и .txt с X-Y координатами в метрах от стартовой точки.

Видеосъёмка осуществляется с помощью экшн-камеры DJI Osmo Action 5 Pro, закреплённой на разработанной роботизированной гусеничной платформе. Камера крепится на штативе, жёстко закреплённом на платформе на высоте 1,2 м от земли, что обеспечивает съёмку всех ярусов кроны деревьев. Запись ведётся в режиме 1920×1080 при 60 кадрах/с, с углом обзора «линейный» (без искажений). Автоматизация видеозаписи реализована через синхронизацию навигационных координат с управляющим контроллером: при достижении точки включения, заданной в маршруте, камера активируется, ведёт запись на протяжении всего ряда и отключается после прохождения точки выключения. Для каждого ряда формируется отдельный видеофайл с метаданными даты, времени и номера ряда.

Обработка данных проводится с помощью разработанного программного обеспечения «Учёт урожайности». В программе используются предварительно обученные модели YOLO для распознавания цветков, завязей и плодов, а также алгоритмы трекинга [11] для сохранения идентификаторов объектов при движении камеры. Все распознанные объекты связываются с координатами RTK, полученными в момент фиксации кадра. Это позволяет формировать цифровые карты распределения биологических объектов с точностью до отдельного дерева и исключает дублирование подсчёта при частичном перекрытии кадров. На рисунке 4 приведены примеры распознавания и трекинга (отслеживание с присваиванием ID) плодов яблони на видеопотоке с использованием ПО «Учёт урожайности».

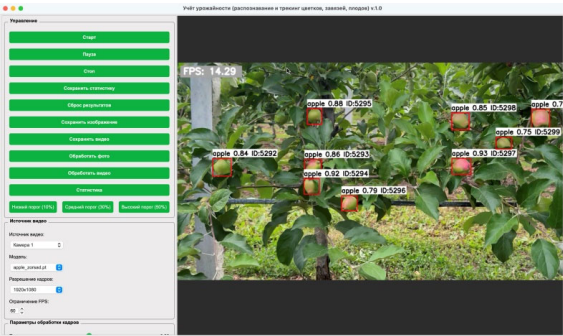


Рисунок 4 – Распознавание и трекинг плодов яблони в программном обеспечении «Учёт урожайности»

В результате проведённых исследований разработана гусеничная роботизированная платформа для мониторинга садовых насаждений. Платформа отличается автономной энергосистемой, достаточной для длительной работы, и интегрированной системой высокоточного позиционирования (РТК), обеспечивающей движение по заданной линии с сантиметровой точностью. Предложена и реализована методика автоматического построения челночных маршрутов с программным управлением видеосъёмкой, исключающим ручное вмешательство на краях рядов. Использование инерциальных датчиков и энкодеров устраняет влияние кратковременных потерь РТК-сигнала под плотной кроной деревьев. Бортовая система компьютерного зрения на базе нейросетевых моделей YOLO и алгоритмов трекинга позволяет в реальном времени распознавать цветки, завязи и плоды, одновременно выполняя их пространственную привязку к координатам РТК. Это даёт возможность формировать цифровые карты распределения урожайности с привязкой к каждому дереву. Создан аппаратно-программный комплекс, объединяющий автономную мобильную платформу, высокоточную навигацию и нейросетевое распознавание, что обеспечивает объективный, пространственно детализированный сбор данных для инвентаризации садов и прогнозирования урожайности. Разработанная платформа может использоваться в интенсивных садах для автоматизированного учёта биологических объектов, инвентаризации деревьев и принятия управленческих решений на основе геопривязанных данных.

Список использованной литературы

1. Кутырёв А.И., Филиппов Р.А. Применение свёрточной нейронной сети для учёта опадения плодов яблони // Таврический вестник аграрной науки. – 2024. – № 1(37). – С. 87–102.
2. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г., Андриянов Н.А. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей для распознавания плодов яблони на кроне дерева // Садоводство и виноградарство. – 2023. – № 5. – С. 56–63.
3. Khort D.O., Kutyrev A., Smirnov I., Andriyanov N., Filippov R., Chilikin A., Ashtashev M.E., Molkova E.A., Sarimov R.M., Matveeva T.A., Gudkov S. Enhancing sustainable automated fruit sorting: hyperspectral analysis and machine learning algorithms // Sustainability. – 2024. – Т. 16. – № 22. – С. 10084.
4. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г., Пряхина М.С., Семёнов А.В., Глушанков Р.Е. Нейросети как вспомогательный элемент фитосанитарного мониторинга плодовых культур на примере яблони // Садоводство и виноградарство. – 2024. – № 6. – С. 51–59.
5. Кутырёв А.И., Хорт Д.О., Федоренко В.Ф., Смирнов И.Г., Пупин Д.С. Разработка комплексной системы прогнозирования урожайности плодовых культур на основе мультимодальных данных и ансамбля моделей машинного обучения // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 10(340). – С. 2–8.

6. Bharti D., Faria L.N., Koenigkan L.V., Gebler L., de Rossi A., Santos T.T. Geo-Referenced Factor-Graph SLAM for Orchard-Scale 3D Apple Reconstruction and Yield Estimation // Agriculture. – 2026. – 16(7). – 764.

7. Almtireen N., Ryalat M. Robotics in Precision Agriculture: Task-, Platform-, and Evaluation-Oriented Review // Robotics. – 2026. – № 15(4). – 81.

8. Shalash O., Emad A., Fathy F., Alzogby A., Sallam M., Naser E., El-Sayed M., Khatab E. Fusion of Robotics, AI, and Thermal Imaging Technologies for Intelligent Precision Agriculture Systems // Sensors. – 2025. – № 25(22). 6844.

9. Кутырёв А.И., Андриянов Н.А. Навигация роботизированных платформ в промышленном садоводстве: сравнительный анализ трансформерных моделей семантической сегментации // Садоводство и виноградарство. – 2025. – № 4. – С. 51–59.

10. Кутырёв А.И. Применение алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения для инвентаризации деревьев в садах интенсивного типа // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2026. – Т. 56. – № 2 (327). – С. 90–100.

11. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г. Применение трансформерной архитектуры глубокого обучения (RF-DETR) для мониторинга деревьев-опылителей в рядах садовых насаждений // Аграрная наука. – 2026. – № 4. – С. 127-136.

Summary. A tracked robotic platform for orchard monitoring with YOLO-based computer vision and RTK high-precision positioning is developed. The platform provides automated counting of flowers, ovaries and fruits with spatial reference to each tree, as well as orchard inventory and digital yield mapping. The proposed hardware-software complex eliminates the limitations of traditional monitoring methods and enables data-driven yield prediction.

УДК 621:631.331

Романюк Н.Н.¹, кандидат технических наук, доцент;

Агейчик В.А.¹, кандидат технических наук, доцент;

Еднач В.Н.¹, кандидат технических наук, доцент

Тихонов А.А.², кандидат технических наук, доцент

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

² ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗАДЕЛКИ СЕМЯН СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ КОНСТРУКЦИИ ОДНОДИСКОВОГО СОШНИКА ЗЕРНОВОЙ СЕЯЛКИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы формирования семенного ложа однодисковым сошником зерновой сеялки. Предложена оригинальная конструкция однодискового сошника зерновой сеялки, использование которого позволит улучшить качество заделки семян и повысить урожайность зерновых культур.