

В. П. Селиванова, Д. И. Комлач, В. В. Голдыбан, М. И. Курилович

*РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: labpotato@mail.ru*

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ВНЕСЕНИЯ ГЕРБИЦИДОВ В УСЛОВИЯХ АВТОНОМНОГО ВОЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрена задача разработки требований к системе распознавания растений для прецизионного внесения гербицидов в условиях автономного вождения мобильной роботизированной платформы. Проанализированы особенности функционирования системы распознавания в составе автономного робототехнического комплекса, включая требования к быстродействию, энергопотреблению и интеграции с системой управления. Сформулирован комплекс функциональных, аппаратных, программных и интеграционных требований, обеспечивающих возможность автономной работы в полевых условиях. Полученные результаты могут быть использованы для анализа существующих аналогов и при проектировании систем прецизионного внесения средств химической защиты растений.

Ключевые слова: прецизионное земледелие, роботизированная платформа, распознавание растений, автономное вождение, машинное зрение.

V. P. Selivanova, D. I. Komlach, V. V. Holdyban, M. I. Kurylovich

*RUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization"
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: labpotato@mail.ru*

REQUIREMENTS FOR A PLANT RECOGNITION SYSTEM FOR PRECISION HERBICIDE APPLICATION IN AUTONOMOUS DRIVING CONDITIONS

Abstract. The paper addresses the problem of developing requirements for a plant recognition system intended for precision herbicide application under conditions of autonomous operation of a mobile robotic platform. The operational features of the recognition system as part of an autonomous robotic complex are analyzed, including requirements for processing speed, energy consumption, and integration with the control system. A set of functional, hardware, software, and integration requirements are formulated to ensure autonomous operation in field conditions. The obtained results can be used for the analysis of existing analogues and for the design of precision plant protection application systems.

Keywords: precision Agricultural, robotic platform, plant recognition, autonomous operation, machine vision.

Введение

Развитие технологий прецизионного земледелия является одним из ключевых направлений для повышения эффективности и экологической устойчивости сельскохозяйственного производства. Существенную роль в этом процессе играет снижение объемов применяемых средств химической защиты растений за счет повышения точности их внесения. Традиционные способы сплошной обработки посевов, как правило, приводят к перерасходу препаратов и увеличению пестицидной нагрузки на окружающую среду и человека [1, 2].

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является использование мобильных роботизированных платформ, способных выполнять технологические операции в автономном режиме. Оснащение таких платформ системами распознавания растений на основе машинного зрения позволяет реализовать точечное внесение гербицидов с учетом фактического размещения культурных и сорных растений. Однако эффективность подобных решений в значи-

тельной степени определяется корректностью выбора архитектуры и параметров системы распознавания [3].

Несмотря на наличие значительного числа исследований и практических разработок в области применения машинного зрения в сельском хозяйстве, требования к системам распознавания растений, функционирующим в составе автономных роботизированных платформ, остаются недостаточно формализованными. В большинстве работ [4–6] основное внимание уделяется алгоритмам обработки изображений и методам классификации, тогда как вопросы интеграции с системой управления, ограничения по энергопотреблению и условия эксплуатации в реальной полевой среде рассматриваются фрагментарно.

В связи с этим актуальной является задача разработки комплексных требований к системе распознавания растений, ориентированной на использование в условиях автономного вождения мобильной роботизированной платформы. Формализация таких требований позволит создать основу для объективной оценки существующих аналогов, а также для последующего проектирования и реализации систем прецизионного внесения средств химической защиты растений.

Основная часть

Для обеспечения корректной работы системы распознавания растений в составе автономной роботизированной платформы необходимо формализовать совокупность требований, определяющих ее функциональные возможности, аппаратную и программную реализацию, а также условия эксплуатации. Указанные требования должны учитывать специфику работы в полевых условиях, ограничения по вычислительным и энергетическим ресурсам, а также необходимость взаимодействия с системой управления платформой и исполнительными механизмами.

С целью систематизации требований и повышения наглядности они были сгруппированы по функциональному признаку и представлены в виде отдельных категорий.

Функциональные требования определяют задачи, которые система распознавания растений должна решать для обеспечения корректной работы автономной роботизированной платформы. Основной целью таких требований является формализация функций, необходимых для реализации точечного внесения гербицидов с минимальными потерями химических средств и соблюдением экологических стандартов. В частности, функциональные требования обеспечивают идентификацию культурных и сорных растений, определение их пространственного положения на поле, а также передачу информации в систему управления для активации исполнительных механизмов платформы в режиме реального времени.

При формулировании функциональных требований учитываются следующие ключевые аспекты: высокая точность распознавания объектов, минимальная задержка обработки данных, способность работать в динамически изменяющихся условиях освещенности и погодных факторов, а также возможность непрерывной работы в течение всего цикла технологической операции. Кроме того, функциональные требования задают условия для интеграции алгоритмов машинного зрения с системами навигации и контроля движения платформы, что позволяет реализовать согласованное взаимодействие всех подсистем. Основные функциональные требования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Функциональные требования

Требования	Обоснования
Обнаружение и классификация растений в реальном времени (≥ 10 FPS)	Обеспечение своевременной реакции исполнительных механизмов при движении
Поддержка базой данных системы как культурных, так и сорных растений	Необходимость различать объекты для избирательного внесения гербицидов
Формирование карты распознанных объектов с привязкой к координатам	Интеграция с системой навигации и точечное внесение препаратов
Выходной сигнал – бинарная маска/метка класса с координатами	Унификация для передачи в управляющую систему
Возможность непрерывной работы в полевых условиях ≥ 4 ч	Соответствие рабочим циклам агротехнологических операций

Технические требования к аппаратному обеспечению системы распознавания растений формируют основу для выбора сенсорных и вычислительных модулей, обеспечивающих стабильную и точную работу роботизированной платформы в полевых условиях. При их разработке учитываются физические, энергетические и эксплуатационные ограничения, включая габаритные размеры платформы, массу оборудования, энергопотребление, вибрационные и температурные воздействия, а также воздействие пыли и влаги, характерных для открытых агроценозов.

Ключевым аспектом является обеспечение достаточной производительности вычислительных модулей для обработки видеопотока с камер в режиме реального времени. Это необходимо для своевременного обнаружения и классификации объектов, передачи команд исполнительным механизмам и поддержания автономного функционирования платформы. Особое внимание уделяется подбору сенсоров и камер с высокой разрешающей способностью, широким динамическим диапазоном и устойчивостью к изменяющимся условиям освещенности, что позволяет минимизировать ошибки распознавания и обеспечить точное локализованное внесение гербицидов.

Также технические требования задают параметры совместимости оборудования с остальными подсистемами роботизированной платформы, включая систему управления и исполнительные органы, а также требования к защите от внешних воздействий (пыль, вода, вибрации). Это обеспечивает надежность и долговечность системы в полевых условиях, а также позволяет соблюдать баланс между производительностью и энергопотреблением, что критично для автономной работы в течение нескольких часов. Технические требования к аппаратному обеспечению представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические требования к аппаратному обеспечению

Требования	Обоснования
Использование камер высокого разрешения (не менее 2 МП)	Устранение артефактов при движении, повышение точности распознавания
Компактность и защищенность оборудования (IP65 и выше)	Работа в агрессивной среде: пыль, влага, вибрации
Наличие аппаратной платформы для обработки данных на борту (напр., Raspberry Pi 4)	Обеспечение автономной работы и минимизация задержек
Возможность установки мультиспектральных или гиперспектральных сенсоров	Повышение точности классификации по спектральным признакам
Интеграция с ЛИДАР/RTK-GNSS системой	Улучшение привязки объектов к координатам поля

Программные и интеграционные требования определяют архитектуру и принципы функционирования программного обеспечения системы распознавания растений, а также ее взаимодействие с другими подсистемами мобильной роботизированной платформы. Эти требования направлены на обеспечение корректной работы алгоритмов обнаружения и классификации растений в режиме реального времени, надежной передачи данных на систему управления и согласованного функционирования всех исполнительных механизмов.

Особое внимание при формировании программных требований уделяется обеспечению совместимости с существующей системой управления платформой и навигационными модулями. Программное обеспечение должно поддерживать стандартизированные интерфейсы для обмена данными с сенсорными и вычислительными блоками, обеспечивая согласованное взаимодействие подсистем в условиях автономного движения. Это позволяет платформе корректно реагировать на выявленные объекты, обеспечивая точечное внесение гербицидов и минимизацию ошибок при обработке посевов.

Программные требования также включают аспекты масштабируемости и адаптируемости: возможность обновления алгоритмов распознавания, добавления новых моделей машинного зрения и перенастройки под различные культурные растения и условия освещенности. Это особенно важно для долгосрочной эксплуатации платформы и ее применения в разных агроэкосистемах, где изменяются сорта растений, плотность засева и погодные условия.

Интеграционные требования задают параметры взаимодействия программного обеспечения с аппаратной частью и внешними системами: синхронизация обработки данных с движением платформы, корректное формирование управляющих сигналов для исполнительных органов, обеспечение надежной коммуникации и логирования событий для последующего анализа. Такие требования создают основу для построения модульной и устойчивой системы, которая может быть модернизирована или дополнена без значительного вмешательства в функционирующую платформу. Программные и интеграционные требования к системе распознавания растений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Программные и интеграционные требования

Требования	Обоснования
Поддержка обучения/дообучения модели	Адаптация под конкретные культуры и условия
Поддержка логирования результатов и диагностики	Анализ производительности и последующее улучшение
Возможность удаленной настройки и обновления	Удобство эксплуатации и тестирования
Совместимость с системой управления автономной роботизированной платформы	Возможность апробации на конкретном роботизированном агрегате
Энергопотребление ≤ 60 Вт	Совместимость с энергетическими возможностями платформы

Эксплуатационные требования определяют условия и ограничения, при которых система распознавания растений сохраняет свою работоспособность и заявленные характеристики. В рамках автономной мобильной роботизированной платформы такие требования играют ключевую роль, поскольку эффективность и надежность системы напрямую зависят от ее способности функционировать в реальной полевой среде на протяжении всего цикла технологической операции. Учитываются также требования к безопасности эксплуатации, включая защиту оператора и окружающей среды, от непредвиденных срабатываний исполнительных механизмов и ошибок системы распознавания.

Особое внимание уделяется поддержанию функциональности платформы при различных режимах работы и изменяющихся условиях окружающей среды. Это включает возможность корректной работы системы распознавания растений при разной интенсивности солнечного света, изменении состояния почвы и плотности растительных рядов, а также обеспечение стабильной работы на протяжении всего периода автономного функционирования. Кроме того, эксплуатационные требования предусматривают возможность быстрой замены или модернизации отдельных модулей системы без остановки работы платформы. Эксплуатационные и пользовательские требования к системе распознавания растений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Эксплуатационные и пользовательские требования

Требования	Обоснования
Интуитивно понятный интерфейс для настройки и отображения статуса	Упрощение ввода в эксплуатацию и контроля
Быстрая замена/обновление компонентов	Повышение ремонтпригодности и надежности
Работа в условиях освещенности от 5 000 до 100 000 лк	Обеспечение стабильности работы в различных погодных условиях
Температурный диапазон работы от -10 до $+45$ °C	Соответствие климатическим условиям

Сформированный комплекс функциональных, технических, программных и эксплуатационных требований обеспечивает системное описание разрабатываемой роботизированной платформы и отражает взаимосвязь между задачами мониторинга, автономного движения и точечного внесения средств химической защиты растений. Совокупность требований направлена на достижение устойчивой автономной работы в полевых условиях, повышение точности технологических операций и снижение негативного воздействия на окружающую среду, а также служит основой для последующей разработки архитектуры системы и реализации макетного образца.

Заключение

В рамках данной работы на основе анализа условий эксплуатации и задач, возлагаемых на систему, сформирован структурированный перечень требований, охватывающий функциональные возможности, аппаратное и программное обеспечение, а также эксплуатационные аспекты.

Разработанные требования позволяют обеспечить согласованность между подсистемами мониторинга, навигации и управления исполнительными механизмами, что является ключевым фактором для достижения высокой эффективности и надежности автономной работы в полевых условиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации роботизированных агротехнических комплексов, а также служат методической основой для дальнейших исследований, направленных на разработку алгоритмов распознавания растений и принятия решений в задачах точного земледелия.

Авторы статьи выражают благодарность за поддержку и финансирование данного исследования Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. Precision weeding in Agricultural: a comprehensive review of intelligent laser robots leveraging deep learning techniques / C. Wang, C. Song, T. Xu, R. Jiang // Agricultural. – 2025. – Vol. 15. – № 11. – Art. 1213.
2. Wang, W. A review of computer vision technologies in precision Agricultural / W. Wang, Y. Kang // Theoretical and Natural Science. – 2025. – Vol. 101. – P. 35–40.
3. Precise robotic weed spot-spraying for reduced herbicide usage and improved environmental outcomes: a real-world case study / A. Smith, M. R. Azghadi, A. Olsen [et al.]. – 2024.
4. Machine vision systems in precision Agricultural for crop farming / R. R. Shamshiri [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2023. – Vol. 16. – № 1. – P. 1–15.
5. Agricultural robot automatic plant detection integrating visual navigation and phenotype recognition / Y. Li, H. Zhang, Q. Chen [et al.] // Discover Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 6. – Art. 12.
6. Key technologies for machine vision for picking robots: review and benchmarking / J. Liu, Z. Wang, K. Zhao [et al.] // Machine Intelligence Research. – 2025. – Vol. 22. – № 2. – P. 145–162.