

4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.3: 631.348.6

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_2_90

EDN: JWXTIM

Разработка мобильной роботизированной системы для высокоточного лазерного уничтожения сорных растений с использованием нейросетевого анализа и гальванометрического сканирования

Артём Сергеевич Угловский^{1✉}, Александр Анатольевич Белов²

¹ Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

¹ a.uglovskii@yarcx.ru✉

Аннотация. Борьба с сорными растениями является одной из ключевых задач в современном сельском хозяйстве. Традиционные химические методы, несмотря на свою эффективность, наносят вред окружающей среде и могут приводить к развитию резистентности у сорных растений. Представлена архитектура мобильной роботизированной системы, предназначенной для высокоточного термического уничтожения сорняков путем лазерного воздействия на их апикальную меристему. Предложенная система объединяет автономную колесную платформу, мультиспектральную камеру (RGB+NIR) для сбора данных и анализа вегетационных индексов, а также нейросетевую модель YOLO-Agri для точного распознавания. Ключевым исполнительным элементом является мощный диодный лазер (40 Вт, 450 нм), сопряженный с высокоскоростной системой позиционирования луча на основе гальванометрического сканера. Для прецизионного управления зеркалами сканера разработана специализированная печатная плата с двойным H-мостом, которая является центральным элементом системы наведения. Приводится описание трехуровневой архитектуры управления на базе NVIDIA Jetson, Raspberry Pi и Arduino, отвечающей соответственно за зрение, планирование и низкоуровневое управление. Проведенные теоретический анализ и моделирование подтверждают высокий потенциал авторской конфигурации. Установлено, что использование гальванометрического сканера обеспечивает время наведения на цель менее 20 мс с точностью позиционирования до 1,5 мм. Выбранные параметры – мощность 40 Вт и диаметр пятна 5 мм – определены как сбалансированный компромисс, позволяющий достичь необходимого времени облучения одной цели (около 258 мс) для ее необратимого повреждения. Ожидаемые показатели эффективности комплекса включают точность обнаружения сорных растений свыше 97% и общую скорость обработки, достигающую четырех сорных растений в секунду, что значительно превосходит существующие системы с механическим наведением.

Ключевые слова: сорные растения, лазерная прополка, точное земледелие, робототехника, компьютерное зрение, H-мост, гальванометрический сканер

Для цитирования: Угловский А.С., Белов А.А. Разработка мобильной роботизированной системы для высокоточного лазерного уничтожения сорных растений с использованием нейросетевого анализа и гальванометрического сканирования // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 2(89). С. 90–101. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_90-101.

4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Development of a mobile robotic system for high-precision laser weed destroying using neural network analysis and galvanometric scanning

Artem S. Uglovskii^{1✉}, Aleksandr A. Belov²

¹ Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

¹ a.uglovskii@yarcx.ru✉

Abstract. Weed control is a key challenge in modern agriculture. Traditional chemical methods, while effective, are harmful to the environment and can lead to the occurrence of resistance in weeds. The authors present the architecture of a mobile robotic system designed for high-precision thermal weed control by laser beams on their apical meristems. The proposed system integrates an autonomous wheeled platform, a multispectral camera (RGB+NIR) for data collection and vegetation index analysis, and the YOLO-Agri neural network model for precise recognition. The key actuator is a powerful diode laser (40 W, 450 nm), coupled to a high-speed beam positioning system based on a galvanometric scanner. A specialized printed circuit board with a dual H-bridge, which serves as the central element of the guidance system, was developed for precise control of the scanner mirrors. The authors also describe a three-tier control architecture based on NVIDIA Jetson, Raspberry Pi, and Arduino, responsible for vision, planning, and low-level control, respectively. Theoretical analysis and simulation confirm the high potential of the proposed configuration. It was found that the use of a galvanometric scanner provides a target acquisition time of less than 20 ms with a positioning accuracy of up to 1.5 mm. The selected parameters, i.e. 40 W power and a spot diameter of 5 mm, were determined to be a balanced compromise, achieving the required target exposure time (approximately 258 ms) for irreversible lesion. The expected performance indicators of the system include weed detection accuracy of over 97% and an overall processing speed of up to four weeds per second, significantly exceeding existing systems with mechanical guidance.

Keywords: weed vegetation, laser hoeing of weeds, precision agriculture, robotics, computer vision, H-bridge, galvanometric scanner

For citation: Uglovskii A.S., Belov A.A. Development of a mobile robotic system for high-precision laser weed destroying using neural network analysis and galvanometric scanning. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(2):90-101. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_90-101.

Введение
Необходимым условием для удовлетворения продовольственной потребности населения России в современных условиях является интенсификация сельского хозяйства. Однако ускоренное и расширенное развитие аграрного производства может стать и катастрофическим по своим последствиям процессом для мировой экосистемы, что связано с нехваткой водных ресурсов, потерей посевных площадей из-за эрозии почвы, снижением общего плодородия сельскохозяйственных угодий, а также с угрозой биологическому разнообразию видов вследствие постоянного применения удобрений и химических средств защиты растений.

Одной из главных причин снижения урожайности и качества растениеводческой продукции является засоренность полей. Увеличение плотности размещения сорного компонента на единице площади влечет за собой сокращение площади питания полевых культур, конкуренцию за факторы жизни, что в комплексе снижает уровень культуры земледелия и продуктивность посевов. Применение химических средств, являющееся доминирующим методом борьбы, связано с рядом недостатков (загрязнение почвы и грунтовых вод, вред для биоразнообразия и рост числа устойчивых к гербицидам видов сорных растений) [2].

Альтернативой выступают физические методы борьбы, среди которых лазерная прополка выделяется своей высокой точностью и экологичностью. Принцип метода заключается в точечном термическом воздействии на апикальную меристему (точку роста) сорного растения, что приводит к его необратимому повреждению и гибели, не затрагивая при этом культурные растения и не нарушая структуру почвы.

Созданию как стационарных, так и мобильных систем лазерной прополки посвящен ряд исследований. Например, в работе Y. Wang с соавт. [12] предложена статическая система на основе улучшенной модели YOLOv8 и слияния изображений видимого и инфракрасного спектров для повышения точности обнаружения [15]. В свою очередь, С. Mwitta с соавт. [8] разработали автономный мобильный робот, использу-

ющий глубокое облучение и визуальное сервоуправление, предназначенный для работ на полях при выращивании хлопка.

Помимо академических исследований, активно ведутся работы по практической реализации коммерческих решений. Так, компания Laudando & Associates LLC представила модульную систему L&Aser [7], которая использует собственные ИИ-алгоритмы AgSeption для отслеживания целей и управления лазером. Разработчики заявляют о сверхнизком времени воздействия (порядка 100 мс) и мультимодальном подходе, сочетающем тепловое и фотохимическое (световое) повреждение сорных растений.

Несмотря на достигнутые успехи, остаются нерешенными задачи повышения скорости работы, точности наведения в динамических условиях и надежности системы в целом. Цель представленных исследований заключалась в разработке архитектуры мобильного роботизированного комплекса, который решает эти проблемы за счет синергии передовой нейросетевой детекции и высокоскоростной системы наведения лазера на основе гальванометра, управляемого специализированной электронной схемой.

Материалы и методы

Для проведения теоретических расчетов, анализа зависимостей и построения графиков, иллюстрирующих производительность системы, использовалась среда численного моделирования MATLAB.

Предлагаемый роботизированный комплекс состоит из трех основных подсистем, интегрированных на мобильной колесной платформе (рис. 1).

Подсистема восприятия и сенсорики включает мультиспектральную камеру и бортовой вычислитель для анализа изображений.

Исполнительная лазерная подсистема состоит из диодного лазера, гальванометрического сканера для наведения луча и драйвера сканера.

Бортовой вычислительный кластер объединяет платы NVIDIA Jetson и Raspberry Pi и плату Arduino для управления всеми компонентами.

Верхний уровень (NVIDIA Jetson) представляет собой высокопроизводительный модуль, получающий поток изображений от камеры, единственной задачей которого является высокоуровневая обработка поступающей информации с помощью нейросетевых моделей (CV). Он анализирует изображения, обнаруживает сорные растения и передает их точные координаты $[x, y, class]$ на следующий уровень.

Средний уровень (Raspberry Pi) получает координаты целей от Jetson и навигационные данные от сенсоров. Его функция – логика и планирование. На этом уровне решается, в какой последовательности следует уничтожать цели, формируются общие команды управления (цель, движение) и отправляются на нижний уровень, а также напрямую подается простой сигнал активации лазера.

Нижний уровень (Arduino) получает команды от Raspberry Pi и преобразует их в низкоуровневые физические сигналы, которые могут понять исполнительные механизмы. На этом уровне генерируются точные аналоговые/ШИМ-сигналы для управления зеркалами гальванометра и ШИМ-сигналы для управления скоростью вращения двигателей шасси.

Подсистема мобильности обеспечивает перемещение по полю, в то время как система зрения непрерывно сканирует поверхность почвы, обнаруживая сорные растения. После обнаружения цели ее координаты передаются в систему управления, которая наводит лазер и производит кратковременное облучение.

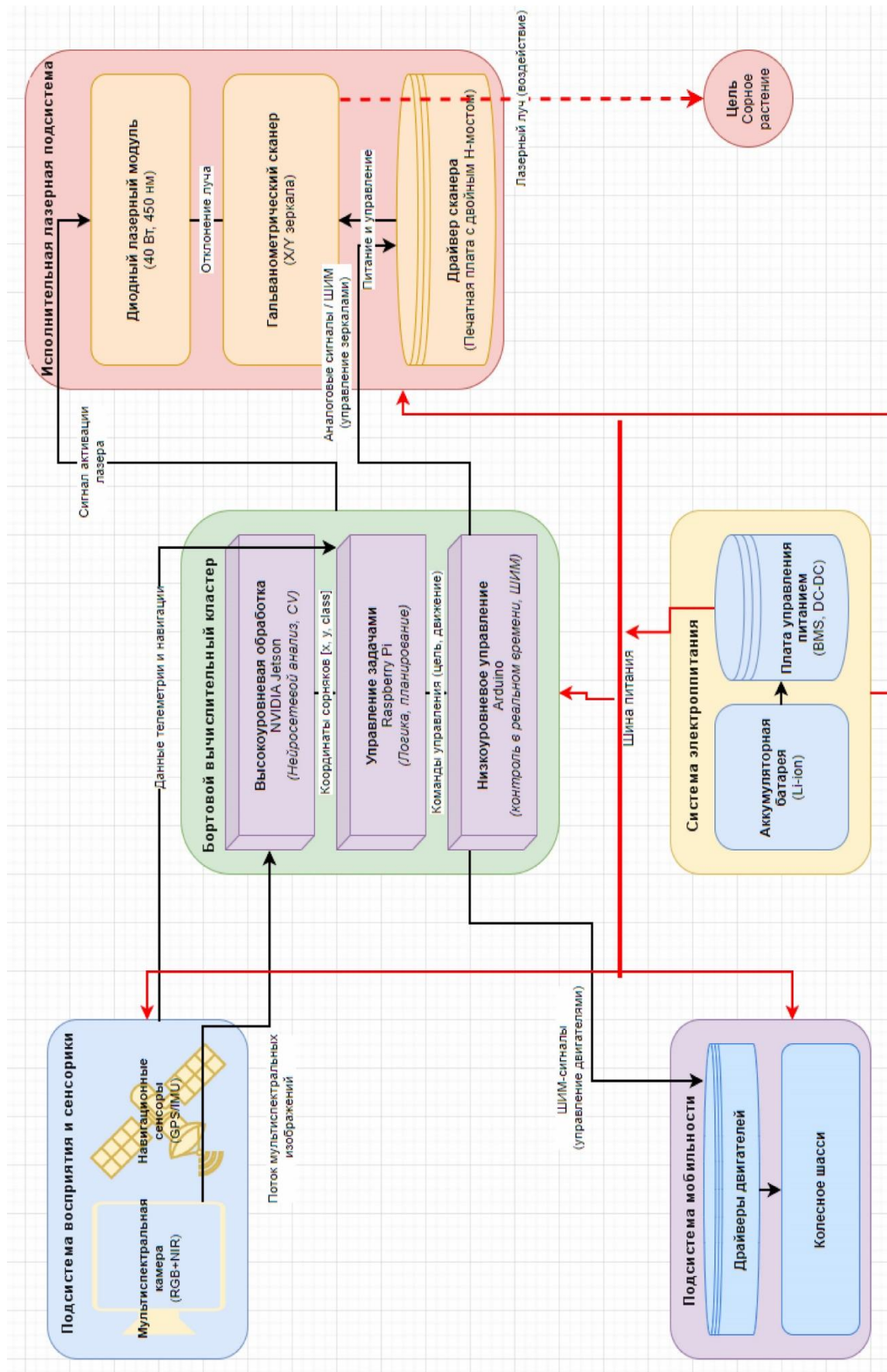


Рис. 1. Блок-схема архитектуры роботизированной системы

Подсистема восприятия и сенсорики

Для надежного распознавания сорных растений в различных условиях освещенности и на разных стадиях вегетации предлагается использовать мультиспектральную камеру, регистрирующую изображения в видимом (RGB) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, с помощью которой анализируют не только форму, но и вегетационный индекс (например, NDVI), что значительно повышает контрастность между культурными растениями и сорными растениями [1, 3, 4, 11].

В качестве модели детекции предлагается использовать архитектуру YOLO-Agri, основанную на принципах YOLOv9, но с добавлением внимания для обработки мультиспектральных данных. Обучение модели планируется проводить на собственном наборе данных, включающем не менее 50 000 изображений сорных растений, произрастающих в различных агроклиматических зонах.

Навигационные сенсоры (GPS/IMU) отвечают за позиционирование и ориентацию робота в пространстве. GPS предоставляет глобальные координаты, а инерциальный измерительный модуль (IMU) отслеживает перемещения и повороты [5].

Исполнительная лазерная подсистема

Основным элементом, определяющим скорость и точность работы, является исполнительный механизм, который включает диодный лазерный модуль и гальванометрический сканер.

Промышленный диодный лазер имеет мощность 40 Вт и длину волны 450 нм (синий свет). Данная длина волны эффективно поглощается хлорофиллом и другими растительными пигментами, обеспечивая быстрый локальный нагрев тканей.

Двухосевой гальванометрический сканер состоит из двух миниатюрных зеркал, каждое из которых приводится в движение высокоточным двигателем. Изменяя угол наклона зеркал, можно практически мгновенно направить лазерный луч в любую точку рабочей области (например, 50 × 50 см).

Электрическая схема управления гальванометрическим сканером

Для управления двигателями гальванометрического сканера была разработана принципиальная электрическая схема (рис. 2), основанная на двойной H-мостовой схеме. В качестве проектирования электрической схемы была выбрана среда проектирования KiCad.

H-мост – электронная схема, которая изменяет полярность напряжения, подаваемого на нагрузку, в данном случае – на обмотки двигателей гальванометров.

Разработанная плата содержит два независимых H-моста, по одному для каждого двигателя (оси X и Y).

Компонент U3 (сдвоенный операционный усилитель TL072CDT) выполняет ключевую функцию в цепи управления гальванометрами и работает как двойной активный фильтр нижних частот (ФНЧ). На его входы поступают управляющие ШИМ-сигналы (PWM1 и PWM2) с цифровых выходов микроконтроллера (U1).

Для реализации замкнутого контура управления используются сигналы обратной связи от датчиков положения гальванометров. Аналоговые сигналы с этих датчиков (на рисунке 2 обозначены как ENC_A и ENC_B на разъеме J5) поступают напрямую на аналоговые входы A0 и A1 модуля Arduino (на рисунке 2 обозначен как U1). Подавая ШИМ-сигнал на соответствующие входы H-моста, Arduino регулирует среднее напряжение на двигателе и, как следствие, скорость и угол его поворота. Комбинация сигналов на входах H-моста определяет направление вращения.

Для агрегата с шириной захвата 2 метра требуется 4 лазерных модуля (каждый включает лазер, гальванометрический сканер), установленных в ряд, чтобы покрыть всю ширину по мере движения платформы.

Данная система достигает высокой скорости (рад/с) и точности (мрад) позиционирования зеркал, что обеспечивает наведение лазерного луча на цель за время, не превышающее 10–20 мс.

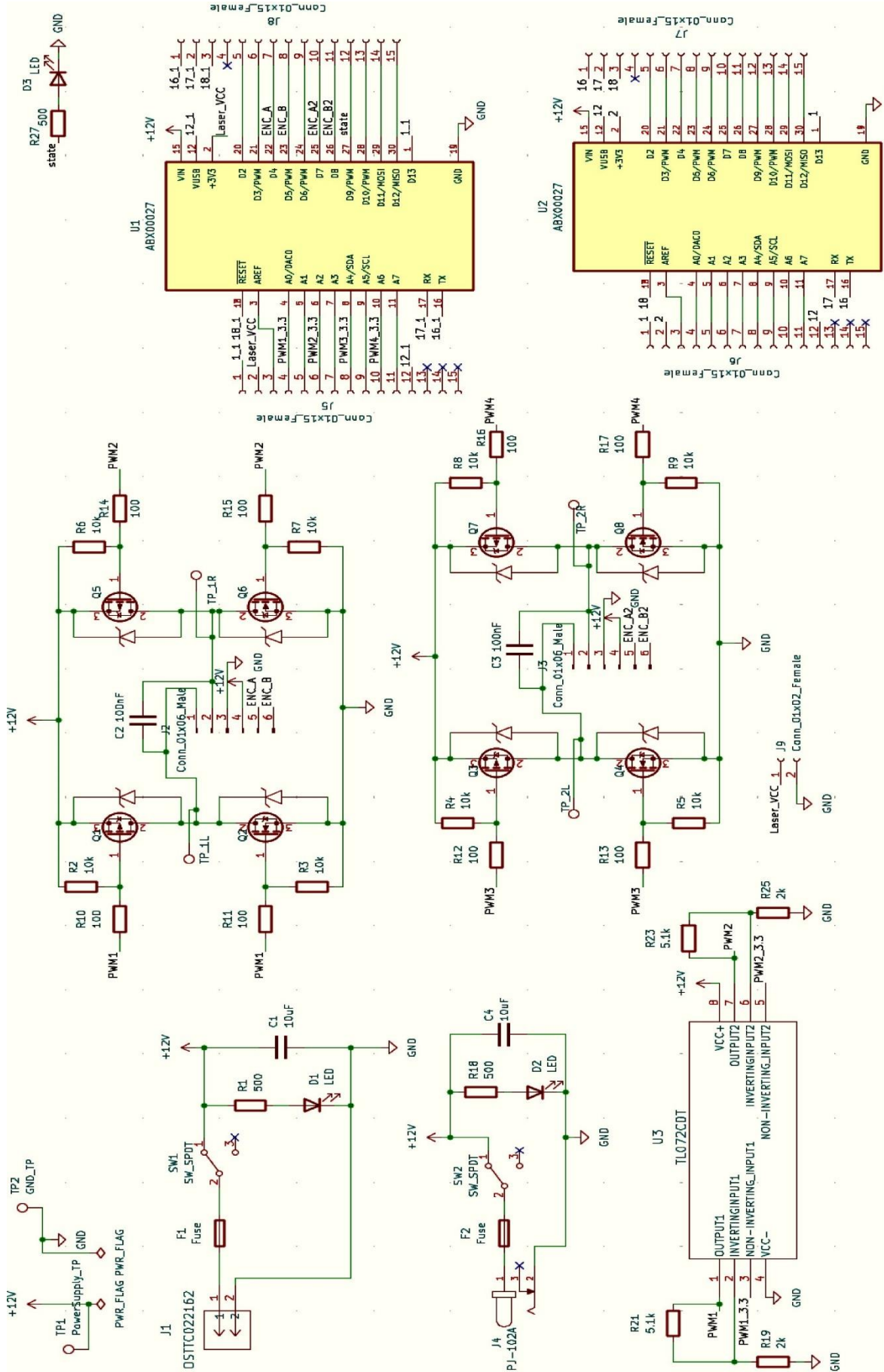


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема платы управления на основе двойного H-моста

Учитывая, что основным параметром является пороговая (или губительная) плотность энергии E_d (Дж/м²), которую необходимо доставить к апикальной меристеме сорного растения для его необратимого повреждения [6, 14], а основным поглотителем энергии в растительной ткани является вода, для оценки можно использовать уравнение теплового баланса, ориентируясь на нагрев воды в ткани до температуры денатурации белков ($T_{кр} \approx 60\text{--}80$ °С). Данная формула определяет минимальную энергию на единицу площади, необходимую для достижения губительного действия:

$$E_d = c \cdot \rho \cdot h \cdot (T_{кр} - T_{нач}) \cdot \frac{1}{\alpha(\lambda)}, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость растительной ткани, которую можно принять близкой к теплоемкости воды, ≈ 4200 Дж/(кг·°С);

ρ – плотность ткани (≈ 1000 кг/м³);

h – эффективная глубина проникновения тепла, необходимая для разрушения меристемы, м; зависит от вида и возраста сорного растения (0,001–0,003 м);

$T_{кр}$ – критическая температура, при которой происходит необратимое повреждение клеток, °С;

$T_{нач}$ – начальная температура окружающей среды и ткани, °С;

$\alpha(\lambda)$ – безразмерный коэффициент поглощения излучения тканью, который зависит от длины волны лазера λ ; для синего лазера (450 нм), хорошо поглощаемого хлорофиллом, коэффициент будет находиться в диапазоне 0,7–0,9.

1. Связь мощности лазера, времени облучения и размера пятна

Плотность энергии напрямую связана с мощностью лазера (P), временем облучения (t) и площадью лазерного пятна (A_s).

Время облучения

$$t = \frac{E_d \cdot A_s}{P} = \frac{E_d \cdot A_s}{P} = \frac{E_d \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2}{P}, \quad (2)$$

где P – мощность лазера, Вт;

t – необходимое время облучения, с;

A_s – площадь лазерного пятна, м²;

d_s – диаметр лазерного пятна, м.

Данная зависимость показывает, что для уменьшения времени обработки (увеличения производительности) при заданной губительной дозе энергии необходимо либо увеличивать мощность лазера, либо уменьшать диаметр пятна. Однако слишком малый диаметр усложняет наведение, поэтому здесь важен компромисс.

2. Эффективная площадь поражения с учетом гауссова распределения

Лазерный луч редко имеет равномерное распределение энергии. Чаще всего оно близко к гауссову, и означает, что плотность энергии максимальна в центре пятна и спадает к краям. Таким образом, губительная доза E_d будет достигнута не по всей площади пятна, а только в его центральной части.

Радиус эффективной зоны поражения

$$r_{эфф} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{E_{пик}}{E_d} \right)}, \quad (3)$$

где $r_{эфф}$ – радиус эффективной зоны, где плотность энергии превышает пороговую E_d , м;

ω_0 – радиус лазерного луча на уровне $1/e^2$ от максимальной интенсивности (параметр гауссова пучка);

$E_{пик}$ – пиковая плотность энергии в центре лазерного пятна, Дж/м².

Пиковая плотность энергии рассчитывается как

$$E_{\text{пик}} = \frac{2 \cdot P \cdot t}{\pi \cdot \omega_0^2}. \quad (4)$$

Данная формула важна для точного прицеливания. Система должна навести центр луча на меристему сорного растения так, чтобы точка роста гарантированно попала в радиус $r_{\text{эфф}}$.

3. Комплексный показатель производительности системы

Общую производительность системы (Q) можно определить по формуле (5), которая учитывает как время на уничтожение одного сорного растения, так и время на наведение и распознавание. Производительность роботизированной системы

$$Q = \frac{1}{t_{\text{обн}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{обл}}}, \quad (5)$$

где Q – производительность системы, сорных растений в секунду;

$t_{\text{обн}}$ – время, необходимое системе компьютерного зрения для обнаружения сорного растения и расчета его координат, с;

$t_{\text{пер}}$ – время, затрачиваемое гальванометрическим сканером на перемещение зеркал для наведения луча на цель, с;

$t_{\text{обл}}$ – время облучения лазером, рассчитанное по формуле (2), с.

Чтобы повысить производительность (Q), нужно не только использовать мощный лазер для сокращения $t_{\text{обл}}$, но и применять быстрые алгоритмы распознавания ($t_{\text{обн}}$) и высокоскоростную механику наведения ($t_{\text{пер}}$). Предложенная система с гальванометрическим сканером и платой на Н-мостах нацелена на минимизацию $t_{\text{пер}}$.

В таблице представлены основные параметры аппаратных компонентов, составляющих основу предлагаемого роботизированного комплекса.

Расчетные технические характеристики роботизированной системы

Компонент	Параметр	Предлагаемое значение	Обоснование
Лазерный модуль	Тип лазера	Диодный (Blue Laser Diode)	Высокий КПД, компактность, эффективное поглощение хлорофиллом
	Мощность (P)	40 Вт	Оптимальное соотношение скорости воздействия и энергопотребления
	Длина волны (λ)	450 нм	Пик поглощения растительными пигментами, высокая эффективность
Система наведения	Тип	Двухосевой гальванометрический сканер	Сверхвысокая скорость наведения по сравнению с механическим перемещением
	Управление	Двойной Н-мост с ШИМ-управлением	Обеспечивает точное и быстрое позиционирование зеркал
	Время наведения ($t_{\text{пер}}$)	< 20 мс	Позволяет минимизировать задержки между обработкой сорных растений
Система зрения	Камера	Мультиспектральная (RGB + NIR)	Повышение точности распознавания за счет анализа NDVI
	Алгоритм детекции	YOLO-Agri (кастомизированный YOLOv9)	Высокая скорость и точность обнаружения объектов
	Вычислитель	NVIDIA Jetson AGX Orin	Аппаратное ускорение для работы нейросети в реальном времени
Мобильная платформа	Тип шасси	Колесное	Высокая проходимость и устойчивость на различных типах почв
	Скорость движения	0,5 м/с	Соответствует скорости сканирования и обработки
	Время облучения	258 мс	

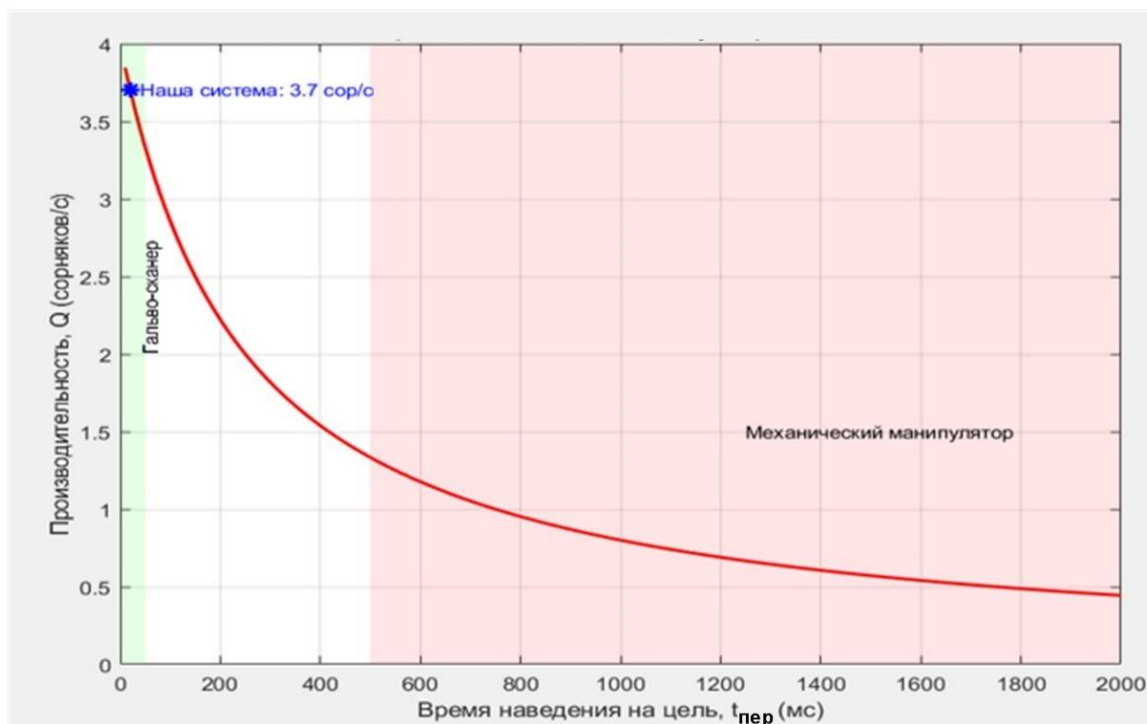
Результаты и их обсуждение

Применение предложенной архитектуры позволит создать высокоэффективный роботизированный комплекс для автономной прополки. Ожидаемые ключевые показатели производительности:

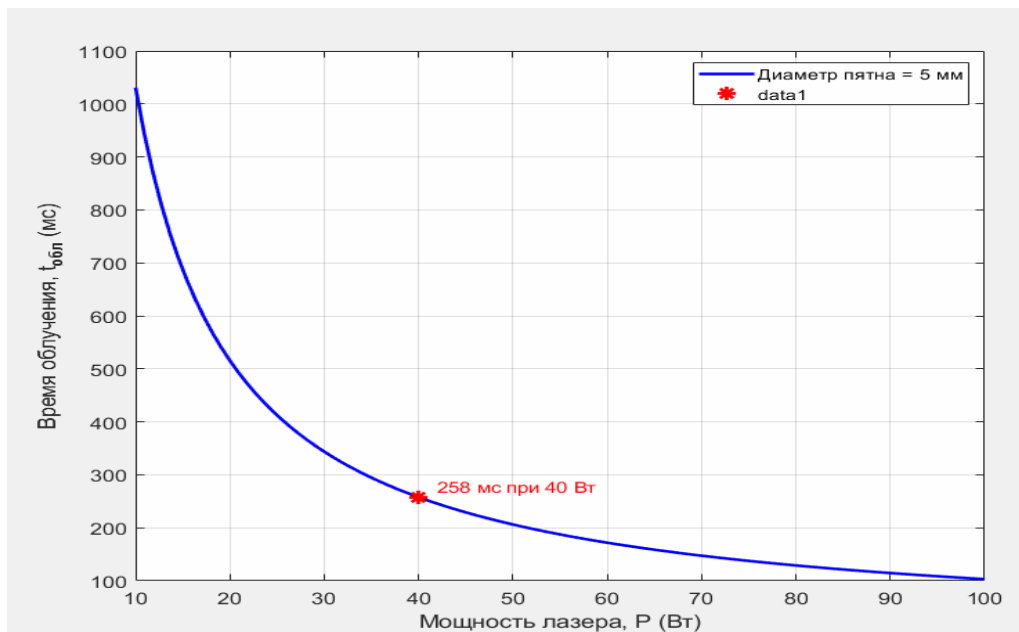
- точность обнаружения сорных растений составляет не менее 97% благодаря использованию мультиспектральных данных и современной нейросетевой архитектуры;
- точность наведения лазера. Отклонение от центра цели не более 1,5 мм, что обеспечивается прецизионным гальванометрическим сканером;
- скорость работы. Обработка до 3–5 сорных растений в секунду, что значительно превосходит системы с механическим перемещением лазерной головки;
- эффективность уничтожения. Гибель более 95% обработанных сорных растений на ранних стадиях вегетации (2–4 листа) при времени облучения 100–250 мс.

По сравнению с системами, описанными в [9, 10, 13], предложенное решение имеет два ключевых преимущества. Во-первых, гальванометрический сканер позволяет работать намного быстрее, ему не нужно перемещать всю роботизированную руку или платформу для прицеливания, так как он просто наводит луч с помощью зеркал, что занимает доли секунды. Во-вторых, мультиспектральная система зрения повышает надежность обнаружения сорных растений в сложных полевых условиях, снижая риск ложных срабатываний и пропусков.

График на рисунке 3 разделен на несколько областей. Зеленая область демонстрирует высокую производительность, достигаемую при использовании гальванометрического сканера с малым временем наведения (< 20 мс). Красная область иллюстрирует резкое падение производительности, характерное для систем с медленным механическим наведением (например, роботизированный манипулятор). Звездочкой отмечена расчетная производительность предлагаемой системы.



а



б

Рис. 3. Зависимость производительности системы от основных параметров:
 а – влияние скорости наведения на общую производительность;
 б – зависимость времени облучения от мощности лазера

На рисунке 4 показана гиперболическая зависимость необходимого времени облучения ($t_{обл}$) от мощности лазера (P) при фиксированном диаметре пятна 5 мм. С увеличением мощности время, требуемое для необратимого повреждения сорного растения, значительно сокращается. Звездочкой отмечена рабочая точка проектируемой системы, у которой время облучения для достижения губительного действия составляет около 258 мс при мощности 40 Вт.

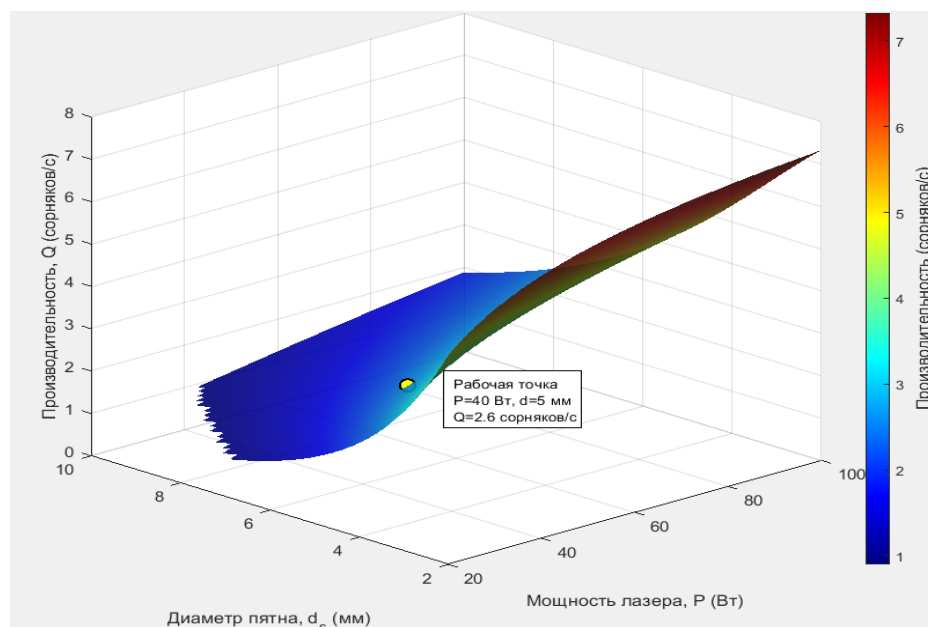


Рис. 4. Зависимость производительности системы (Q) от параметров лазера

Анализ поверхности показывает, что максимальная производительность достигается в области высоких мощностей и малых диаметров пятна. Однако слишком малый диаметр (< 3 мм) может быть непрактичным из-за высоких требований к точности наведения. С другой стороны, увеличение диаметра пятна ($> 7-8$ мм) резко снижает

плотность энергии, что приводит к экспоненциальному росту времени облучения и падению производительности до неприемлемых значений.

Выбранная рабочая точка (40 Вт, 5 мм) представляет собой сбалансированный компромисс: она обеспечивает высокую производительность (около четырех сорных растений/с), находясь при этом на безопасном удалении от «обрыва неэффективности» и не предъявляя чрезмерных требований к мощности лазера.

Выводы

Описано устройство мобильного робота для лазерной прополки. Особенность предложенной системы заключается в совместной работе автономной платформы, нейросети для анализа мультиспектральных изображений и высокоскоростного гальванометрического сканера для наведения лазера.

Отдельное внимание уделено системе управления сканером. Для нее была разработана оригинальная электронная схема на базе двойного Н-моста, которая и обеспечивает необходимую скорость и точность позиционирования луча. Проведенный теоретический анализ и моделирование показывают высокий потенциал предложенной системы. Основным преимуществом является использование гальванометрического сканера, который обеспечивает время наведения на цель менее 20 мс и достигает расчетной производительности до четырех сорных растений в секунду, что гораздо быстрее, чем традиционные системы с механическим перемещением. Выбранные параметры лазерного модуля – мощность 40 Вт и диаметр пятна 5 мм – представляют собой сбалансированный компромисс, позволяющий добиться времени облучения одной цели около 258 мс при сохранении высокой общей производительности системы.

Предложенный комплекс поможет бороться с сорными растениями эффективнее. Дальнейшие исследования будут направлены на создание физического прототипа, проведение полевых испытаний и оптимизацию параметров лазерного воздействия для различных видов сорных растений.

Список источников

1. Кафиев И.Р., Романов П.С., Романова И.П. Комплексная методика выбора наилучшего варианта робота для прополки сорняков по совокупности его характеристик // Вестник НГИЭИ. 2023. № 1(140). С. 7–22. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-1-7-22.
2. Махмудова В.Х. Оценка потенциальных возможностей цветового различения сельскохозяйственной продукции от сорняка на фоне почвы // Вестник ИРГСХА. 2024. Т. 3, № 122. С. 32–38. DOI: 10.51215/1999-3765-2024-122-32-38.
3. Рыбаков А.В., Выборнов Н.А., Рыбаков И.А. Анализ методов компьютерного зрения, перспективных для применения в агропромышленном комплексе // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 1(57). С. 128–138.
4. Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Классификация болезней растений с использованием алгоритма глубокого обучения // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78, № 8. С. 343–349. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-8-343-349.
5. Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 3–18. DOI: 10.25728/ru.2019.5.1.
6. Fatima H.S., ul Hassan I., Hasan S. et al. Formation of a Lightweight, Deep Learning-Based Weed Detection System for a Commercial Autonomous Laser Weeding Robot // Applied Sciences. 2023. Vol. 13(7). Article No. 3997. DOI: 10.3390/app13073997.
7. L&A's Patent-Pending L&Aser™ Module. A laser weeder for all farmers, big & small // L&Aser. URL: <https://www.laudando.com/world-s-first-laser-weeder-trimmer>.
8. Mwitta C., Rains G.C., Prosko E. Evaluation of Diode Laser Treatments to Manage Weeds in Row Crops // Agronomy. 2022. Vol. 12(11). Article No. 2681. DOI: 10.3390/agronomy12112681.
9. Rakhmatulin I., Andreasen C. A Concept of a Compact and Inexpensive Device for Controlling Weeds with Laser Beams // Agronomy. 2020. Vol. 10(10). Article No. 1616. DOI: 10.3390/agronomy10101616.
10. Rakhmatulin I., Kamilaris A., Andreasen C. Deep Neural Networks to Detect Weeds from Crops in Agricultural Environments in Real-Time: A Review // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(21). Article No. 4486. DOI: 10.3390/rs13214486.
11. Sun J., Yang K., He X. et al. Beet seedling and weed recognition based on a convolutional neural network and multi-modality images // Multimedia Tools and Applications. 2022. Vol. 81. Pp. 5239–5258. DOI: 10.1007/s11042-021-11802-w.

12. Wang Y., Zhang X., Ma G. et al. Recognition of weeds at asparagus fields using multi-feature fusion and backpropagation neural network // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. Vol. 14(2). Pp. 190–198. DOI: 10.25165/ij.ijabe.20211402.6105.
13. Xiong Y., Ge Y., Liang Y. et al. Development of a Prototype Robot and Fast Path-Planning Algorithm for Static Laser Weeding // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 142. Pp. 494–503. DOI: 10.1016/j.compag.2017.09.027.
14. Yaseen M.U., Long J.M. Laser Weeding Technology in Cropping Systems: A Comprehensive Review // *Agronomy*. 2024. Vol. 14(10). Article No. 2253. DOI: 10.3390/agronomy14102253.
15. Zhu H., Zhang Y., Mu D. et al. YOLOX-Based Blue Laser Weeding Robot in Corn Field // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article No. 1017803. DOI: 10.3389/fpls.2022.1017803.

References

1. Kafiev I.R., Romanov P.S., Romanova I.P. A comprehensive method of choosing the best work option for weeding weeds according to the totality of its characteristics. *Bulletin NGIEI*. 2023;1(140):7-22. DOI: 10.24412/2227-9407-2023-1-7-22. (In Russ.).
2. Makhmudova V.Kh. Assessment of the potential for color differentiation of agricultural produce from weeds against the soil background. *Vestnik IrGSHA*. 2024;3(122):32-38. DOI: 10.51215/1999-3765-2024-122-32-38. (In Russ.).
3. Rybakov A.V., Vybornov N.A., Rybakov I.A. Analysis of computer vision methods promising for use in the Agro-Industrial Complex. *Caspian Journal: Control and High Technologies*. 2022;1(57):128-138. (In Russ.).
4. Uglovskii A.S., Semerenko N.Yu. Classification of plant diseases using a deep learning algorithm. *Automation. Modern technologies*. 2024;78(8):343-349. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-8-343-349. (In Russ.).
5. Shevchenko A.V., Meshcheryakov R.V., Migachev A.N. Review of the world market of agriculture robotics. Part 1. Unmanned Vehicles for Agriculture. *Control Sciences*. 2019;5:3-18. DOI: 10.25728/ps.2019.5.1 (In Russ.).
6. Fatima H.S., ul Hassan I., Hasan S. et al. Formation of a Lightweight, Deep Learning-Based Weed Detection System for a Commercial Autonomous Laser Weeding Robot. *Applied Sciences*. 2023;13(7):3997. DOI: 10.3390/app13073997.
7. L&A's Patent-Pending L&Aser™ Module. A laser weeder for all farmers, big & small. L&Aser Website. URL: <https://www.laudando.com/world-s-first-laser-weeder-trimmer>.
8. Mwitwa C., Rains G.C., Prostko E. Evaluation of Diode Laser Treatments to Manage Weeds in Row Crops. *Agronomy*. 2022;12(11):2681. DOI: 10.3390/agronomy12112681.
9. Rakhmatulin I., Andreassen C. A Concept of a Compact and Inexpensive Device for Controlling Weeds with Laser Beams. *Agronomy*. 2020;10(10):1616. DOI: 10.3390/agronomy10101616.
10. Rakhmatulin I., Kamilaris A., Andreassen C. Deep Neural Networks to Detect Weeds from Crops in Agricultural Environments in Real-Time: A Review. *Remote Sensing*. 2021;13(21):4486. DOI: 10.3390/rs13214486.
11. Sun J., Yang K., He X. et al. Beet seedling and weed recognition based on a convolutional neural network and multi-modality images. *Multimedia Tools and Applications*. 2022;81:5239-5258. DOI: 10.1007/s11042-021-11802-w.
12. Wang Y., Zhang X., Ma G. et al. Recognition of weeds in asparagus fields using multi-feature fusion and backpropagation neural network. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021;14(2):190-198. DOI: 10.25165/ij.ijabe.20211402.6105.
13. Xiong Y., Ge Y., Liang Y. et al. Development of a Prototype Robot and Fast Path-Planning Algorithm for Static Laser Weeding. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017;142:494-503. DOI: 10.1016/j.compag.2017.09.027.
14. Yaseen M.U., Long J.M. Laser Weeding Technology in Cropping Systems: A Comprehensive Review. *Agronomy*. 2024;14(10):2253. DOI: 10.3390/agronomy14102253.
15. Zhu H., Zhang Y., Mu D. et al. YOLOX-Based Blue Laser Weeding Robot in Corn Field. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1017803. DOI: 10.3389/fpls.2022.1017803.

Информация об авторах

А.С. Угловский – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», a.uglovskii@yarcx.ru.

А.А. Белов – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», sofronich.bel@mail.ru.

Information about the authors

A.S. Uglovskii, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrification, Yaroslavl State Agrarian University, a.uglovskii@yarcx.ru.

A.A. Belov, Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Electrophysical Action on Agricultural Objects and Materials, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, sofronich.bel@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; одобрена после рецензирования 03.03.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted 25.01.2026; approved after reviewing 03.03.2026; accepted for publication 20.03.2026.

© Угловский А.С., Белов А.А., 2026