

Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы

Дмитрий Олегович Хорт¹,
кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: dmitriyhort@mail.ru;
Алексей Игоревич Кутырев¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: alexeykutyrev@gmail.com;

Игорь Геннадьевич Смирнов¹,
доктор технических наук, заведующий отделом,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;
Георгий Викторович Моисеев²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: grg.moiseev@gmail.com;
Владимир Игоревич Соловьев^{3,4},
доктор экономических наук, профессор,
заведующий кафедрой, e-mail: vs@ciars.ai

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация;

³ООО «ЦИАРС», Москва, Российская Федерация;

⁴Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

Реферат. Предложили модель автономного движения роботизированной платформой адаптированной под условия промышленного плодового сада. (*Цель исследования*) Разработать систему управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути для позиционирования в плодовом саду, с автоматическим выполнением различных технологических операций, таких как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов. (*Материалы и методы*) Создали математическую модель для управления движением роботизированной платформы, учитывающую радиусы разворота трех типов, длину дуги выполняемой окружности, скорости движения в рядах садовых насаждений с использованием электронной карты сада. Использовали метод, который позволяет реализовать программу автоматического движения роботизированной платформы по типовому плодovому саду с применением минимального набора датчиков, существенно снижая нагрузку на процессор и память бортовых вычислителей. Разработали программное обеспечение на языке программирования *Python*, позволяющее строить маршрут движения роботизированной платформы, отображать траекторию движения с указанием точности позиционирования в каждой точке относительно деревьев в рядах садовых насаждений, скорости движения и угла поворота колес. (*Результаты и обсуждение*) Реализовали автономное выполнение роботизированной платформой заданных маршрутов, взаимодействие программы с аппаратной частью роботизированной платформы. Провели полевое тестирование разработанного программного обеспечения. (*Выводы*) Подтвердили заданную точность позиционирования роботизированной платформы в междурядьях садов интенсивного типа 3,5 метра, максимальное отклонение при движении по карте задания с использованием спутниковой навигации и инерциальной системы составило 164 миллиметра, что удовлетворяет агротехнические требования к механизированной уборке плодов.

Ключевые слова: автоматизация садоводства, роботизированная платформа, управление движением роботизированной платформы, построение маршрута, алгоритм управления, автономная навигация в садах.

■ **Для цитирования:** Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Моисеев Г.В., Соловьев В.И. Управление движением сельскохозяйственной автономной роботизированной платформы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №1. С. 25-34. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34. EDN UXTRFN.

Agricultural Autonomous Robotic Platform Motion Control

Dmitriy O. Khort¹,
Ph.D.(Agri.), leading researcher,
e-mail: dmitriyhort@mail.ru;
Aleksey I. Kutyrev¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: alexeykutyrev@gmail.com;

Igor G. Smirnov¹,
Dr.Sc.(Eng.), head of the department,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;
Georgiy V. Moiseev²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: grg.moiseev@gmail.com;
Vladimir I. Soloviev^{3,4},
Dr.Sc.(Econ.), professor, e-mail: vs@ciars.ai

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;

³CIARS ILC, Moscow, Russian Federation;

⁴Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation

Abstract. A model of the movement of a robotic platform adapted to the conditions of an industrial orchard is proposed. (*Research purpose*) Development of a motion control system for an autonomous robotic wheeled platform based on inertial and satellite navigation and traversed path calculation, which will allow it to move in an apple orchard and automatically perform various technological operations, such as fertilization, growth diseases control of, fruit harvesting. (*Materials and methods*) A mathematical model was developed to control the movement of a robotic platform, taking into account the turning radii of three types, the length of the arc of the performed circle, the speed of movement in the garden plantation rows using a garden electronic map. The method used allows implementing a program for the robotic platform automatic movement around a typical orchard using a minimum set of sensors, significantly reducing the load on the onboard computer processor and memory. Software, developed in the Python programming language, enables plotting the robotic platform route, displaying the movement trajectory, and indicating the positioning accuracy at each point in relation to the trees in the garden plantation rows, the movement speed and the wheel rotation angle. (*Results and discussion*) The robotic platform managed to autonomously pass the preset routes, while the interaction of the software and the robotic platform hardware was provided. A field testing of the developed software was performed. (*Conclusions*) The specified accuracy of the robotic platform positioning was confirmed for the 3.5-meter aisles of intensive orchards. The maximum deviation from the task map using satellite and inertial navigation system was 164 millimeters, which complies with the agrotechnical requirements for mechanized fruit harvesting.

Keywords: gardening automation, robotic platform, robotic platform motion control, route setting, control algorithm, autonomous navigation in gardens.

■ **For citation:** Khort D.O., Kuttyrev A.I., Smirnov I.G., Moiseev G.V., Soloviev V.I. Upravlenie dvizheniem sel'skokhozyaystvennoy avtonomnoy robotizirovannoy platformy [Agricultural autonomous robotic platform motion control]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N1. 25-34 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-1-25-34. EDN UXTRFN.

Механизация сельского хозяйства позволила значительно повысить производительность труда. Однако в некоторых направлениях по-прежнему велика доля ручного труда. Например, в садоводстве она может составлять до 50% затрат [1-3]. В связи с этим актуальна разработка роботизированных решений. Известны примеры коммерческого использования автоматизированного колесного тракторного оборудования при подготовке и проведении посевных работ, борьбе с сорной растительностью и вредителями, прогнозировании урожайности и уборке зерновых культур.

Несмотря на то, что такие роботизированные машины начали создавать в конце 1960-х годов, роботы в садоводстве до сих пор не доведены до коммерческого использования, хотя было разработано много прототипов [4, 5]. В частности, существуют прототипы колесных платформ для сбора плодов с помощью манипуляторов. При движении в рядах садовых насаждений маршрут обычно планируют заранее в соответствии с навигацией по проходам, а не по отдельным деревьям [6-9]. Например, платформа, движущаяся по предварительно спроектированной карте сада с коррекцией на основе лазерного сканирования, может перемещаться по проходу, избегать препятствия [10]. В другом варианте реализовано беспилотное передвижение по садам с использованием компьютер-

ного зрения и ультразвуковых датчиков [11]. Полевые испытания в персиковом саду длиной 27 м и шириной 6,4 м показали, что среднеквадратичная ошибка позиционирования (*RMSE*) составила 3,5 см. Аналогичная платформа, использующая 2D-лидарную обработку с использованием фильтра частиц (*PF*) и фильтра Калмана (*KF*), в полевых испытаниях показала ошибку позиционирования 5,5 см для *PF* и 8,8 см для *KF* [12]. Однако эти платформы не могут совершать повороты между проходами в автоматическом беспилотном режиме. Платформа для перемещения контейнеров по садам, на базе *GPS*, с четырьмя колесами и независимым управлением, продемонстрировала в ходе полевых испытаний *RMSE* 6,0 см [13]. Кроме того, при перемещении по проходу, а также из ряда в ряд, возможно позиционирование, основанное на лазерном сканировании [14-18]. При адаптации подхода *B-patterns* в качестве оптимального маршрута роботизированной платформы в садах выбирается тот, где наиболее полезный путь [19].

Теория автоматического управления колесных платформ начала развиваться с момента миниатюризации вычислительных средств, которые можно на нее установить. Важным этапом в этой сфере стали уравнения движения. В исследованиях российских ученых рассматривается многофакторная модель дифференциальных уравнений движения колесной тех-



ники по сложной криволинейной траектории, что делает ее настройку и применение для работы в саду достаточно трудоемкой и требующей квалифицированных специалистов [20-23].

Цель исследования – разработка системы управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути, что позволит ей перемещаться в плодовом саду и автоматически выполнять различные технологические операции, такие как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов.

Материалы и методы. Роботизированная платформа построена по модульному принципу с открытой архитектурой для индивидуального формирования конфигурации в соответствующей ценовой категории, с учетом потребностей пользователя и особенностей садовых насаждений (рис. 1).

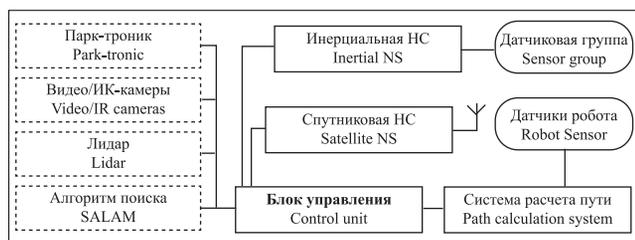


Рис. 1. Конфигурация навигационного и управляющего оборудования роботизированной платформы

Fig. 1. Configuration of the robotic platform navigation and control equipment

В наиболее простом варианте системы управления роботизированной платформы задействована навигация с помощью метода расчета преодолеваемого пути. Для этого используются низкоуровневые датчики, входящие в состав механизмов управления платформы (положения рулевой рейки, скорости вращения ведущих колес и др.). Применяя известные алгоритмы и зная угол поворота колес и количество их оборотов, можно рассчитать, в каком направлении и на какое расстояние сместится роботизированная платформа относительно начальной точки. Однако при таком способе происходит накопление ошибки вследствие неточности измерений, люфтов механических частей и неровности поверхности почвы.

Для повышения точности и коррекции вышеперечисленных ошибок следует использовать более точные навигационные системы, построенные на принципах инерциальной или спутниковой навигации. Современные спутниковые навигационные системы (СНС) с кинематической технологией реального времени имеют небольшую антенну, обеспечивают точность позиционирования не более 10 см. Высокой степени точности способствует сочетание с удаленной базовой станцией управления и коррекции, которая постоянно расположена на земле в пределах радио-

видимости и накапливает координаты местоположения робота. Недостаток СНС – его зависимость от стабильности спутникового сигнала.

Для защиты от его пропадания или искажения рекомендуется в паре с СНС использовать инерциальную навигационную систему (ИНС). Она работает по принципу расчета пути, но уже на специализированной группе датчиков. В состав таких датчиков могут входить акселерометры, электронные гироскоп и компас, которые позволяют определять угловое и пространственное положение роботизированной платформы с высокой точностью, путем расчета ускорений по каждой из осей. Такие системы в настоящее время используются на беспилотных воздушных судах. Однако датчики в такой системе чувствительны к резким толчкам при езде по неровной поверхности почвы.

В результате проведенного анализа предлагается в базовом варианте системы навигации и управления роботизированной платформой комбинировать СНС, ИНС и систему расчета пути для взаимной коррекции относительно друг друга, с резервированием на случай выхода из строя одной или нескольких из них. Для этого все вышеперечисленные системы поставляют первично обработанные данные в блок управления, где происходят фильтрация, комбинирование данных из разных каналов и формирование окончательных координат пространственного и углового положения роботизированной платформы в рядах насаждений. Если дополнительно оснастить платформу радиоинтерфейсом, то возможно взаимодействие с устройством оператора (ноутбуком, планшетом, смартфоном и т.д.) и установленным на него программным обеспечением (ПО). ПО обеспечивает загрузку и корректировку программы и маршрута движения в рядах садовых насаждений, помогает отслеживать статус выполненных технологических операций и работоспособность бортовых систем.

ПО роботизированной платформы в соответствии с архитектурой построено на модульной основе и состоит из нескольких основных элементов (рис. 2).

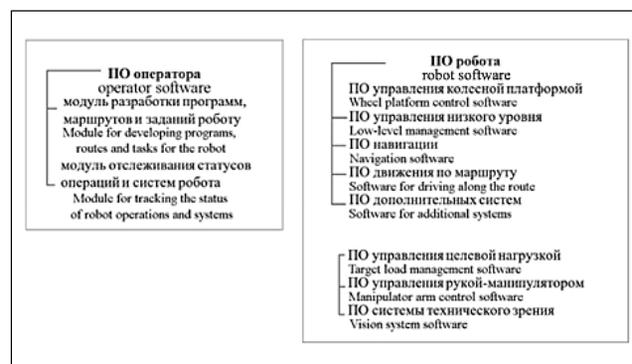


Рис. 2. Элементы программного обеспечения роботизированной платформы

Fig. 2. Elements of the robotic platform software

ПО состоит из операторской и бортовой частей. Первая содержит модуль, обеспечивающий построение маршрута движения и постановки задачи на выполнение технологических операций, а также модуль отслеживания и визуализации статуса выполняемых операций и состояния систем роботизированной платформы. Бортовая часть также делится на две составляющие: ПО управления колесной платформой и ПО управления рабочими органами (технологическими адаптерами).

В результате анализа существующих систем управления мы предложили адаптированную под условия промышленного плодового сада модель движения колесной роботизированной платформы. Известно, что в таком саду деревья расположены рядами с установленным интервалом посадки. Роботизированная платформа должна перемещаться в междурядье, делая развороты в конце ряда для заезда в следующее. Соответственно, маршрут движения роботизированной платформы можно описать типовыми траекториями, состоящими из участков прямых и дуг окружностей постоянного радиуса. Перемещение роботизированной платформы сводится к основным типовым траекториям (рис. 3).

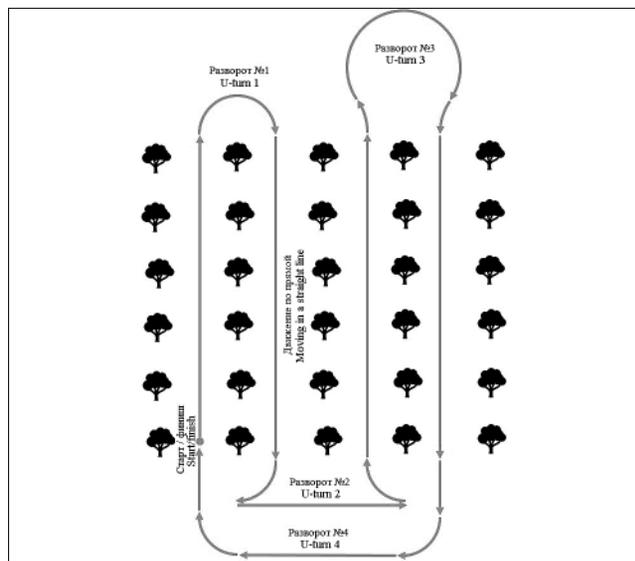


Рис. 3. Типичная траектория движения роботизированной платформы

Fig. 3. Typical trajectory of robotic platform movement

Предусмотрены 4 варианта возможных разворотов:

- № 1 – при заезде в соседний ряд;
- № 2 – при ограничении ширины поворотной полосы;
- № 3 – при недостаточном радиусе поворота роботизированной платформы для заезда в соседний ряд;
- № 4 – при переезде в конкретный ряд или завершении выполнения технологической операции.

Роботизированная платформа реализована на 4-колесном шасси, с двумя ведущими и двумя поворотными колесами. Чтобы реализовать указанные выше

маневры, необходимо построить математическую модель движения роботизированной платформы по ним. Для этого введены условные обозначения характеристик платформы и пространственно-угловых положений (рис. 4).

Наложим на обрабатываемый сад плоскую систему координат XOY . Ось OX направлена на север, а OY на запад. Величинами x и y обозначим координаты роботизированной платформы, привязанные к центру передней оси (геометрический центр поворотных колес), а величиной φ – курс или азимут (угол поворота роботизированной платформы относительно направления на север).

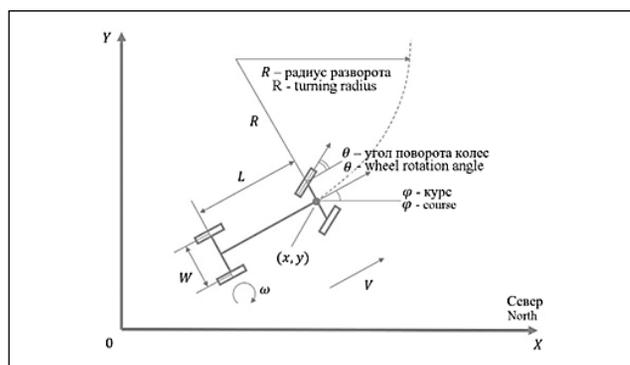


Рис. 4. Обозначения пространственно-углового положения роботизированной платформы: L – колесная база; W – ширина колеи; V – скорость движения робота; ω – угловая скорость вращения задних ведущих колес

Fig. 4. Designations of the spatial-angular position of the robotic platform: L – wheelbase; W – track width; V – speed of the robot movement; ω – angular rotation speed of the rear driving wheels

Управлениями высокого уровня считаются:

- радиус разворота R ;
- длина дуги выполняемой окружности $\Delta\varphi$;
- скорость движения V .

Длина дуги совпадает с изменением курса роботизированной платформы при повороте, поэтому обозначается той же величиной (рис. 5). Эти величины может задавать оператор при формировании маршрута объезда сада, либо их можно вычислить по нарисованной оператором траектории движения.

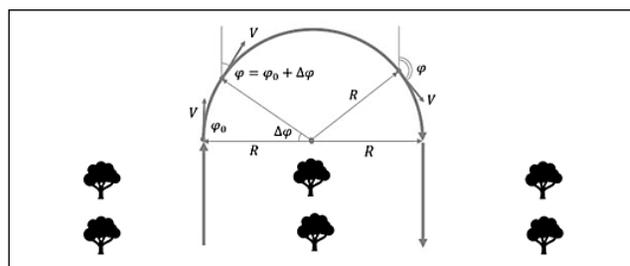


Рис. 5. Управление высокого уровня: V – скорость движения; φ – азимут; R – радиус разворота

Fig. 5. High-level controls: V – the speed of movement; φ – azimuth; R – turning radius

Для реализации заданного поворота необходимо ввести управления низкого уровня: угол поворота передних колес θ и угловую скорость вращения задних колес ω . Отрицательная скорость будет обозначать движение роботизированной платформы задним ходом.

Чтобы выполнить поворот необходимого радиуса, надо повернуть колеса на угол θ и вращать с угловой скоростью ω , которые рассчитываются формулам:

$$\theta = \pm a \sin L/R; \tag{1}$$

$$\omega = \pm V/r, \tag{2}$$

где r – радиус колес.

Знаки «±» здесь и далее обозначают разные направления движения.

Двигаться нужно до тех пор, пока азимут роботизированной платформы не изменится на угол $\Delta\varphi$:

$$\varphi = \varphi_0 \pm \Delta\varphi. \tag{3}$$

Используя параметрическую запись уравнения окружности в полярных координатах, находим, что роботизированная платформа переместится в точку:

$$x = x_0 \pm V \cos \Delta\varphi; \tag{4}$$

$$y = y_0 \pm V \sin \Delta\varphi. \tag{5}$$

Устремляя к минимальному пределу шаг разворота $\Delta\varphi$, получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих движение колесного робота по дуге окружности:

$$\dot{x} = V \cos \varphi; \tag{6}$$

$$\dot{y} = V \sin \varphi; \tag{7}$$

$$\dot{\varphi} = V/R^*. \tag{8}$$

Подставляя вместо V и R значения управлений θ и ω , получаем систему дифференциальных уравнений движения робота по дуге окружности:

$$\dot{\varphi} = \omega r \sin \theta / L; \tag{9}$$

$$\dot{x} = \omega r \cos \varphi; \tag{10}$$

$$\dot{y} = \omega r \sin \varphi. \tag{11}$$

Если предположить, что прямая – это дуга окружности бесконечного радиуса, то данная система подходит и для описания движения робота по участкам прямой:

$$\dot{\varphi} = 0; \tag{12}$$

$$\dot{x} = \omega r \cos \varphi; \tag{13}$$

$$\dot{y} = \omega r \sin \varphi. \tag{14}$$

Таким образом, с помощью предлагаемых дифференциальных уравнений движения колесной роботизированной платформы можно переводить нарисованные оператором сложные траектории движения в набор управлений ($V, R, \Delta\varphi$) (рис. 6).

Разработанной математической моделью можно пользоваться даже при наличии у роботизированной

платформы только базовой системы расчета пути (рис. 1). При установке СНС и/или ИНС измеренные текущие координаты робота (x, y, φ) сравниваются с плановыми значениями. При отклонениях управления низкого уровня (θ, ω) корректируются путем введения дополнительных слагаемых стабилизации движения по маршруту, выполняемому по определенному алгоритму (рис. 7).

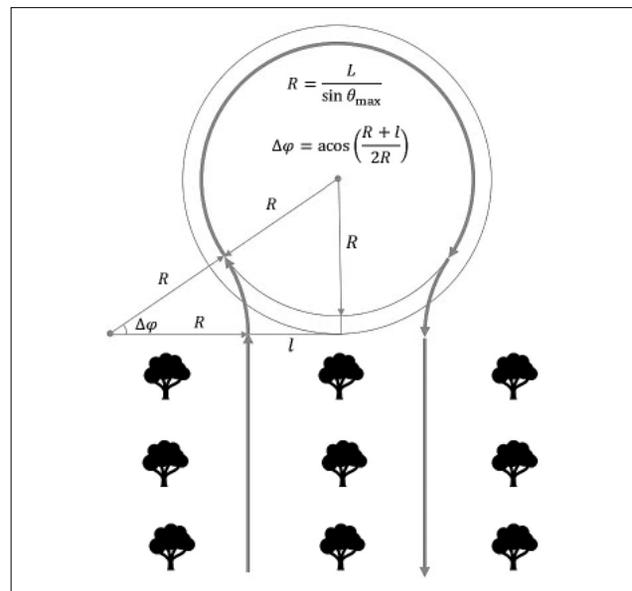


Рис. 6. Вычисление управлений на сложной траектории
Fig. 6. Calculation of complex trajectory control

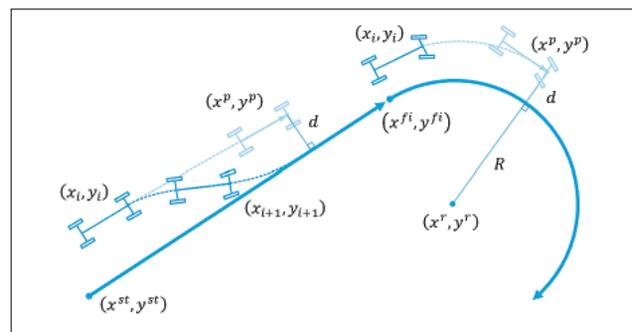


Рис. 7. Компенсация бокового отклонения
Fig. 7. Elimination of lateral deflection

В начальном положении мы имеем какие-то исходные значения управлений:

$$\theta = 0^\circ;$$

$$\omega = V/r.$$

На первом этапе дифференциальные уравнения движения робота интегрируем на n шагов вперед, чтобы получить прогнозируемое положение робота – точку (x^p, y^p) , в которую он придет через некоторое время, сохраняя текущие значения управлений (9)–(11).

Вторым шагом станет определение из прогнозной точки отклонения робота от линии заданного пути d . Так как маршрут разбит на участки прямых и дуг

окружностей, то это отклонение будет вычисляться по-разному.

Прямой участок задается координатами начала и конца отрезка (x^{st}, y^{st}) и (x^{fi}, y^{fi}) . Тогда отклонение рассчитывается по формуле расстояния от точки до прямой, заданной координатами двух точек:

$$d = \frac{(y^{fi} - y^{st})x^p - (x^{fi} - x^{st})y^p + x^{fi}y^{st} - y^{fi}x^{st}}{\sqrt{(y^{fi} - y^{st})^2 + (x^{fi} - x^{st})^2}}$$

Если участок поворота задается центром окружности (x^r, y^r) и радиусом дуги разворота R , то боковое отклонение робота вычисляется как разность расстояния до центра окружности и ее радиуса:

$$d = \sqrt{(x^p - x^r)^2 + (y^p - y^r)^2} - R.$$

На третьем этапе для компенсации бокового отклонения необходимо вычислить доворот передних колес $\Delta\theta$, позволяющий вернуться на заданную траекторию:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \tanh d,$$

где $\tanh(\dots)$ – гиперболический тангенс, позволяющий плавно компенсировать боковое отклонение;

$\Delta\theta_{\max}$ – максимальный диапазон подруливания колес.

Затем уточняем текущий угол поворота колес θ на величину $\Delta\theta$:

$$\theta^{\text{н}} = \theta + \Delta\theta.$$

Наконец, интегрируем основную систему дифференциальных уравнений. Тем самым определяем новое пространственно-угловое положение робота – точку, в которую он переместится, и новый курс:

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \dot{\varphi};$$

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x};$$

$$y_{i+1} = y_i + \dot{y}.$$

Повторяем алгоритм до тех пор, пока не будет достигнута некоторая окрестность ε конечной точки (x^{fi}, y^{fi}) :

$$\sqrt{(x_{i+1} - x^{fi})^2 + (y_{i+1} - y^{fi})^2} \leq \varepsilon.$$

Представленный метод позволяет реализовать программу автоматического движения роботизированной платформы по типовому плодовому саду с применением минимального набора датчиков, существенно снижая нагрузку на процессор и память бортовых вычислителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для построения маршрута движения роботизированной платформы разработали ПО, позволяющее отображать траекторию движения с указанием точности позиционирования в каждой точке относительно деревьев в рядах садовых насаждений, скорости движения и угла поворота колес.

С помощью программного модуля выдаются координаты X , Y , скорости и азимута движения, а также визуализируются перемещения платформы по заданным типовым траекториям разворота в интенсивном саду (рис. 8).

ПО разработано на языке программирования *Python*. Реализовано взаимодействие программы с аппаратной частью роботизированной платформы. Для этого настроена передача данных через последовательный порт (COM-порт) и разработана программа для проверки передачи данных, результатом которой стало перемещение роботизированной платформы в зависимости от данных, выдаваемых программой.

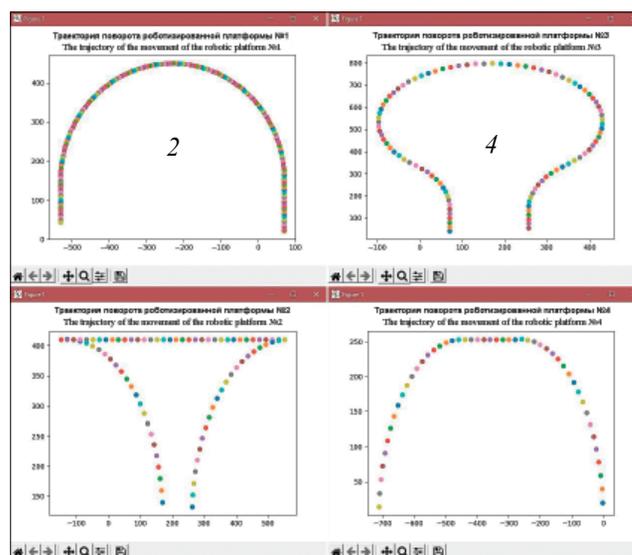


Рис. 8. Заданные типовые траектории разворота роботизированной платформы в интенсивном саду: № 1 – разворот через ряд; № 2 – разворот с помощью заднего хода; № 3 – разворот большого радиуса; № 4 – разворот с проездом по прямой
Fig. 8. The specified typical turn trajectories of a robotic platform in an intensive garden: № 1 – a turn through a row; № 2 – a reverse turn; № 3 – a large radius turn; № 4 – a turn with a straight line

Для создания маршрута в интерфейсе разработанного ПО возможно использование следующих команд:

1. Нажатие на левую кнопку мыши (ЛКМ) позволит построить маршрут выполнения технологической операции (красным обозначатся деревья, которые необходимо обработать).

2. Нажатие на правую кнопку мыши (ПКМ) – выделить пропуски в рядах деревьев, обработка которых не требуется (выделятся черным).

3. Нажатие на ЛКМ в свободном месте – отметить точки остановки роботизированной платформы (синим цветом).

После создания маршрута движения визуализируется траектория объезда точек остановки платформы. Роботизированная платформа начинает движение. При этом в левом верхнем углу отображаются время, угол поворота колес и скорость их вращения. При за-

крытии программы формируется файл *output.xlsx*, в котором сохраняется построенный маршрут движения (рис. 9).

После настройки передачи данных автоматически запускается выполнение маршрута, для которого требуются данные от аналогового датчика угла поворота рулевой части. Для обеспечения точности получаемых данных применен фильтр скользящего среднего.



Рис. 9. Интерфейс программного модуля для построения маршрута движения роботизированной платформы
Fig. 9. Interface of the software module for building the route of the robotic platform

Реализовано автономное выполнение роботизированной платформой заданных маршрутов (табл. 1). Проведено полевое тестирование разработанного ПО в составе роботизированной платформы (рис. 10).

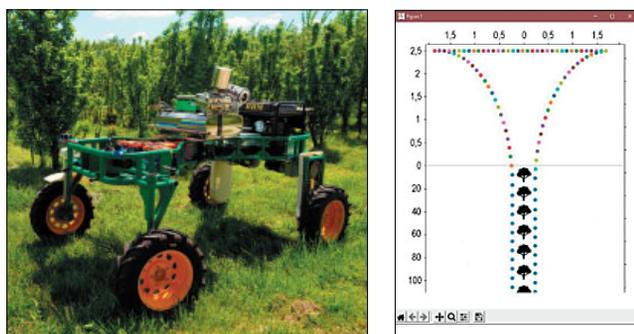


Рис. 10. Полевое тестирование разработанного ПО в составе роботизированной платформы
Fig. 10. Field testing of the software developed as part of a robotic platform

В результате анализа полученных экспериментальных данных подтверждена заданная точность позиционирования. После сопряжения и калибровки маяков погрешность местоположения, спроектированная с помощью разработанного ПО, не превышает 3 см.

Установлены максимальные и минимальные значения отклонения от оси междурядья при движении роботизированной платформы по карте задания с помощью разработанного ПО и при движении роботизированной платформы по карте задания с использо-

| Таблица 1 | | Table 1 |
|--|---|---------|
| ХРОНОЛОГИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАРШРУТА «СБОР УРОЖАЯ ПЛОДОВ ЯБЛОНИ С РАЗВОРОТОМ С ПОМОЩЬЮ ЗАДНЕГО ХОДА» CHRONOLOGY OF THE ROUTE «HARVESTING APPLE FRUITS WITH A REVERSE TURN» | | |
| № | Старт программы, начало движения, с Start of the program, start of movement, s | 0 |
| 1 | Установка скорости передвижения вдоль линии ряда, км/ч Setting the speed of movement along the row line, km/h | 5 |
| 2 | Движение вдоль линии ряда, с Movement along the row line, sec | 220 |
| 3 | Старт разворота с помощью заднего хода, с Starting a U-turn with the help of the reverse gear, sec | 5 |
| 4 | Установка скорости передвижения в повороте, км/ч Setting the movement speed for a turn, km/h | 1,5 |
| 5 | Начало поворота рулевой части налево, с The beginning of turning the steering part to the left, s | 0 |
| 6 | Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s | 24 |
| 7 | Поворот завершен, остановка, включение заднего хода, с The turn is completed, stop, starting the reverse gear, s | 14 |
| 8 | Движение задним ходом завершенно, остановка, поворот рулевой части налево, с The reverse movement is completed, stop, turning the steering part to the left, sec | 24 |
| 9 | Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s | 14 |
| 10 | Поворот завершен, движение прямо, вдоль линии ряда, с The turn is completed, the movement is straight, along the row line, s | 220 |
| 11 | Установка скорости передвижения вдоль линии ряда, км/ч Setting the speed of movement along the row line, km/h | 5 |
| 12 | Старт разворота с помощью заднего хода, с Starting a turn with the help of the reverse gear, s | 0 |
| 13 | Установка скорости передвижения в повороте, км/ч Setting the movement speed for a turn, km/h | 1,5 |
| 14 | Начало поворота рулевой части налево, с The beginning of turning the steering part to the left, s | 5 |
| 15 | Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s | 24 |
| 16 | Поворот завершен, остановка, включение заднего хода, с The turn is completed, stop, starting the reverse gear, s | 14 |
| 17 | Движение задним ходом завершенно, остановка, поворот рулевой части налево, с The reverse movement is completed, stop, turning the steering part to the left, s | 24 |
| 18 | Поворот завершен, угол $\approx 30^\circ$, выполнение поворота налево на 90° , с The turn is completed, the angle is $\approx 30^\circ$, performing a 90° left turn, s | 14 |
| 19 | Остановка платформы, с / Platform stop, s | 12 |
| 20 | Итого продолжительность выполнения маршрута, с Total, calculation of the route duration, s | 614 |

Таблица 2

Table 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / RESULTS OF THE FIELD EXPERIMENT

| Варианты движения Movement options | Отклонения, мм / Deviation, mm | | | Дисперсия по генеральной совокупности, мм ² Population variance, mm ² |
|--|--------------------------------|---------------------|--|--|
| | минимум minimum | максимум maximum | среднеквадратическое root mean square | |
| По карте задания According to the task map | -229 | 212 | 118 | 17659 |
| По карте задания с использованием спутниковой и инерциальной навигационных систем According to the task map using satellite and inertial navigation systems | -102 | 164 | 42 | 2828 |

ванием спутниковой и инерциальной навигационных систем (табл. 2, рис. 10).

Максимальные отклонения от осевой линии междурядья при движении по карте задания с использованием СНС и ИНС уменьшились на 22,6%, а среднеквадратическое отклонение – на 64,2% (рис. 11).

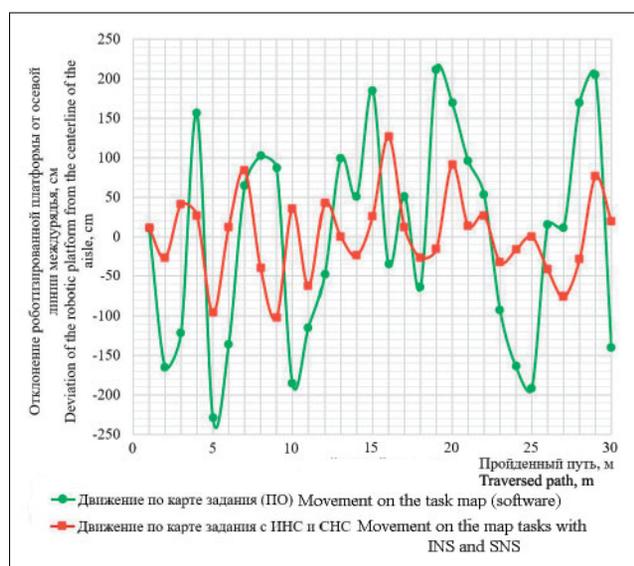


Рис. 11. Фрагмент графика зависимости пройденного пути от отклонения роботизированной платформы от осевой линии междурядья

Fig. 11. A fragment of the graph showing the dependence of the traversed path length on the deviation of the robotic platform from the aisle centerline

Выводы. Разработали систему управления движением автономной роботизированной колесной платформы на основе инерциальной и спутниковой навигации и расчета преодолеваемого пути. Разработанное ПО позволяет проектировать маршрут движения, обеспечивает перемещение в плодовом саду и автоматическое выполнение различных технологических операций, таких как внесение удобрений, контроль роста и болезней, уборка урожая плодов. Разработанная математическая модель для управления движением роботизированной платформы в рядах садовых насаждений с использованием карты сада позволяет осуществлять вычисление управлений на сложной траектории в режимах *online* и *offline*.

В результате проведения полевых исследований подтверждена заданная точность позиционирования роботизированной платформы в междурядьях садов интенсивного типа 3,5 м. Максимальное отклонение при движении по карте задания с использованием СНС и ИНС составило 164 мм, что удовлетворяет агротехнические требования к механизированной уборке плодов.

Хронология выполнения маршрута «Сбор урожая плодов яблони с разворотом с помощью заднего хода» выполнена за 614 с на длине ряда 740 м, при этом устойчивое движение платформы вдоль линии ряда осуществлялось в течение 440 секунд, на выполнение разворота с помощью заднего хода было затрачено 82,5 с, что не превышает 15% затрат времени на холостой разворот и соответствует требуемой производительности при эксплуатации машинных агрегатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Shafi, U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*. 2019. N9. 3796.
- Moysiadis V., Sarigiannidis P., Vitsas V., Khelifi A. Smart farming in Europe. *Computer Science Review*. 2021. N39. 100345.
- Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.
- Himesh S. Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CAB Reviews*. 2018. N13. 1-7.
- Zhang Y. The Role of Precision Agriculture. *Resource*. 2019. N19. 9.
- Khorth D.O., Kuttyrev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. N463. 149-159.
- Bochtis D., Griepentrog H.W., Vougioukas S., Busato P., Burruto R., Zhou K. Route planning for orchard operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.



puters and Electronics in Agriculture. 2015. N113. 51-60.

8. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences*. 2021. N262. 01024.
9. Andersen J.C., Ravn O., Andersen N.A. Autonomous rule-based robot navigation in orchards. Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy. 2010. Vol. 43(16). 43-48.
10. Radcliffe J., Cox J., Bulanon D.M. Machine vision for orchard navigation. *Computers in Industry*. 2018. N98. 165-171.
11. Harper N., McKerrow P. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. N34(2-3). 71-82.
12. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269.
13. Jones M.H., Bell J., Dredge D., Seabright M., Scarfe A., Duke M., MacDonald B. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards. *Biosystems Engineering*. 2019. N187. 129-146.
14. Park H., Kwon J., Hwang T., Kim D.A. Development of Effective Object Detection System Using Multi-Device LiDAR Sensor in Vehicle Driving Environment. *Journal of the KoreaInstitute of Electronic Communication Sciences*. 2018. Vol. 13(2). 313-320.
15. Kim M., Bae S., Kim H. Real-Time 3D-LiDAR Object Detection in Autonomous Vehicle Systems Using Cluster-Based Candidates and DeepLearning. *Journal of the institute of control robotics andsystems*. 2019. Vol. 25(9). 795-801.

16. Zong C.G., Ji Z.J., Yu Y., Shi H. Research on obstacle avoidance method for mobile robot based on multisensor information fusion. *Sensors and Materials*. 2020. N32. 1159-1170.
17. Teixid M., Pallej T., Font D., Tresanchez M., Moreno J., Palacn J. Two-Dimensional RadialLaser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking. *Sensors*. 2012. N12. 16482-16497.
18. Garrido M. Active optical sensors for tree stem detection and classification in nurseries. *Sensors*. 2014. N14(6). 10783-10803.
19. Luan P.G., Thinh N.T. Real-Time Hybrid Navigation System-Based Path Planning and Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *Applied Sciences*. 2020. N10. 3355.
20. Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. N3. С. 32-38.
21. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68.
22. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156.
23. Годжаев З.Д., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Ценч Ю.С., Зубина В.А. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229.

REFERENCES

1. Shafi, U., Mumtaz R., García-Nieto J., Hassan S.A., Zaidi S.A.R., Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*. 2019. N9. 3796 (In English).
2. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Vitsas V., Khelifi A. Smart farming in Europe. *Computer Science Review*. 2021. N39. 100345 (In English).
3. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English).
4. Himesh S. Digital revolution and Big Data: A new revolution in agriculture. *CAB Reviews*. 2018. N13. 1-7 (In English).
5. Zhang Y. The Role of Precision Agriculture. *Resource*. 2019. N19. 9 (In English).
6. Khort D.O., Kutuyev A.I., Smirnov I.G. Research into the Parameters of a Robotic Platform for Harvesting Apples. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. N463. 149-159 (In English).
7. Bochtis D., Griepentrog H.W., Vougioukas S., Busato P., Beruto R., Zhou K. Route planning for orchard operations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. N113. 51-60 (In English).
8. Khort D., Kutuyev A., Filippov R., Semichev S. Development control system robotic platform for horticulture. *E3S Web of Conferences*. 2021. N262. 01024 (In English).
9. Andersen J.C., Ravn O., Andersen N.A. Autonomous rule-based robot navigation in orchards. Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy. 2010. Vol. 43(16). 43-48 (In English).
10. Radcliffe J., Cox J., Bulanon D.M. Machine vision for orchard navigation. *Computers in Industry*. 2018. N98. 165-171 (In English).
11. Harper N., McKerrow P. Recognising plants with ultrasonic sensing for mobile robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. N34(2-3). 71-82 (In English).
12. Blok P., Boheemen K., van Evert F.K., IJsselmuiden J., Kim G.-H. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English).
13. Jones M.H., Bell J., Dredge D., Seabright M., Scarfe A., Duke M., MacDonald B. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards. *Biosystems Engineering*. 2019. N187. 129-146 (In English).

14. Park H., Kwon J., Hwang T., Kim D.A. Development of Effective Object Detection System Using Multi-Device LiDAR Sensor in Vehicle Driving Environment. *Journal of the KoreaInstitute of Electronic Communication Sciences*. 2018. Vol. 13(2). 313-320 (In English).
15. Kim M., Bae S., Kim H. Real-Time 3D-LiDAR Object Detection in Autonomous Vehicle Systems Using Cluster-Based Candidates and DeepLearning. *Journal of the institute of control robotics and systems*. 2019. Vol. 25(9). 795-801 (In English).
16. Zong C.G., Ji Z.J., Yu Y., Shi H. Research on obstacle avoidance method for mobile robot based on multisensor information fusion. *Sensors and Materials*. 2020. N32. 1159-1170 (In English).
17. Teixid M., Pallej T., Font D., Tresanchez M., Moreno J., Palacn J. Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking. *Sensors*. 2012. N12. 16482-16497 (In English).
18. Garrido M. Active optical sensors for tree stem detection and classification in nurseries. *Sensors*. 2014. N14(6). 10783-10803 (In English).
19. Luan P.G., Thinh N.T. Real-Time Hybrid Navigation System-Based Path Planning and Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *Applied Sciences*. 2020. N10. 3355 (In English).
20. Nenaydenko A.S., Poddubnyy V.I., Valekzhanin A.I. Modelirovanie upravleniya dvizheniem kolesnoy sel'skokhozyaystvennoy mashiny v rezhime real'nogo vremeni [Simulation of the movement control of a wheeled agricultural machine in real time]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018. N3. 32-38 (In Russian).
21. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.A.P., Tsench Yu.S., et al. O sinteze robotizirovannogo sel'skokhozyaystvennogo mobil'nogo agregata [About the synthesis of a robotic agricultural mobile unit]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2019. N4. 63-68 (In Russian).
22. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov S.I., Kynev N.G. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and machinery in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).
23. Godzhaev Z.D., Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Tsench Yu.S., Zubina V.A. Strategiya mashinno-tekhnologicheskoy modernizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii do 2030 goda (Prognoz) [Strategy of machine-technological modernization of agriculture in Russia until 2030 (Forecast)]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Хорт Д.О. – формулирование основных направлений исследований, составление алгоритма управления технологическими процессами, разработка объекта исследований, интерпретация общих выводов;

Кутырев А.И. – разработка теоретических предпосылок, проведение полевых исследований, составление хронологии выполнения маршрута, обработка результатов исследований, формирование общих выводов;

Смирнов И.Г. – научное руководство, обоснование актуальности исследования, постановка проблемы, составление плана экспериментальных исследований;

Моисеев Г.В. – литературный анализ, разработка программного кода ПО, визуализация интерфейса программного модуля;

Соловьев В.И. – формирование конфигурации навигационного и управляющего оборудования роботизированной платформы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Khort D.O. – formulating the research main directions, goals and objectives, developing an algorithm for controlling technological processes, interpretation of general conclusions, development of the research object;

Kutyrev A.I. – development of theoretical prerequisites, conducting field research, building a chronology of the route, processing research results, forming general conclusions;

Smirnov I.G. – scientific guidance, substantiation of the study relevance, problem statement, drawing up a plan for experimental research;

Moiseev G.V. – literature review, software code development, visualization of the interface of the software module;

Soloviev V.I. – formation of the configuration of navigation and control equipment of the robotic platform.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

14.09.2022

15.11.2022