

# Алгоритм управления движением мобильной роботизированной платформы с изменяемым уровнем автономности

О.Г. Локтионова, Е.В. Савельева, Е.Н. Политов

**Аннотация**—Создание и внедрение в производство роботизированных транспортных устройств является актуальной задачей для развития различных отраслей промышленности. В силу начальной сложности производственных условий, а так же различных эксплуатационных модернизаций отдельных участков, зачастую полностью исключить участие человека при выполнении технологической операции не представляется возможным. Снизить трудоемкость работ для человека помогают роботизированные системы с заданным уровнем автономности. Объектом исследования выбрана мобильная роботизированная трехколесная платформа (МРП) для локальной доставки грузов, обладающая высокой маневренностью.

Целью данной работы является разработка системы автоматического управления мобильной роботизированной колесной платформой с изменяемым уровнем автономности, а так же оценка эффективности перехода инициативы управления между человеком и роботом при выполнении различных подзадач.

В исследовании используются методы структурного анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами. Рассмотрена структурная схема системы автоматического управления (САУ), схема и характер организации обратной связи в процессе человеко- машинного взаимодействия. Рассмотрен критерий эффективности управления МРП, основанный на минимизации времени реакции оператора на возмущающий сигнал, поступающий с ЧМИ.

Применение управления с изменяемым уровнем автономности позволит ускорить роботизацию промышленности, снизить трудоемкость работ на производстве, понизить класс опасности труда для человека, а так же минимизировать риски возникновения нештатных и аварийных ситуаций при выполнении заданных технологических операций.

**Ключевые слова**— Мобильная роботизированная платформа (МРП), система автоматического управления (САУ), человеко- машинный интерфейс (ЧМИ), телеуправление, изменяемый уровень автономности.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С учетом современных возможностей робототехнических средств на них возлагаются задачи инспекции и наблюдения, логистические задачи, в том числе на объектах критической инфраструктуры. Широкое применение транспортно- манипуляционные роботизированные средства находят на высокотехнологичных производствах, при строительстве, разборе завалов после ЧС, расчистке территории, демонтаже аварийных объектов и многих других сферах [1-3]. Для таких роботов характерно преимущественное использование режима телеуправления. Однако в последнее время наблюдается тенденция к повышению уровней автономности даже тех типов роботов, которые работали исключительно в режиме прямого телеуправления [4-6].

В связи с тем, что телеуправление без контроля за состоянием объекта затруднено, в ряде случаев управление объектами ведётся с изменяемым уровнем автономности системы. При этом в функции оператора входят выбор нужной программы и своевременный пуск системы, что существенно облегчает его работу. Грамотно разработанный интерфейс телеуправления повышает ситуационную осведомлённость и производительность оператора и облегчает его работу, при этом, однако, не освобождает его от нагрузки постоянного управления и не реализует дополнительные возможности робота для самостоятельного выполнения некоторых подзадач.

В этой связи целью данной работы стала разработка системы автоматического управления МРП с изменяемым уровнем автономности, а так же исследование взаимодействия оператора с мобильной роботизированной платформой (МРП) с применением человеко- машинного интерфейса.

Статья получена 7 марта 2023 г.

Работа подготовлена при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека».

The paper was prepared with the support of the Strategic Project «Priority-2030. Creation of robotic tools to expand the functionality of a person».

О.Г. Локтионова, д.т.н., проф, кафедры ММиР, Юго- Западный государственный университет, г. Курск, Россия (e-mail: log7.9@mfil.ru).

Е.В. Савельева, м.н.с. кафедры ММиР, Юго- Западный государственный университет, г. Курск, Россия (e-mail: katusavelkursk@yandex.ru).

Е.Н. Политов, доцент кафедры ММиР, Юго- Западный государственный университет, г. Курск, Россия (e-mail: politovyevgeny@rambler.ru).

## II. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА И ОПИСАНИЕ МРП

На рисунке 1 представлена кинематическая схема МРП с двумя ведущими колесами соосными по вертикали и одним роульным колесом.

Ведущая колесная пара имеет общую вертикальную стойку, из которой исходят две независимо вращающиеся в горизонтальной плоскости полуоси, на которых установлены колеса. На вертикальной стойке размещены два поворотных электропривода и два редуктора для каждого ведущего колеса соответственно, вращающие соответствующие полуоси независимо друг от друга в горизонтальной плоскости. Так же имеются электроприводы, установленные на полуосях вращающие каждое ведущее колесо соответственно.

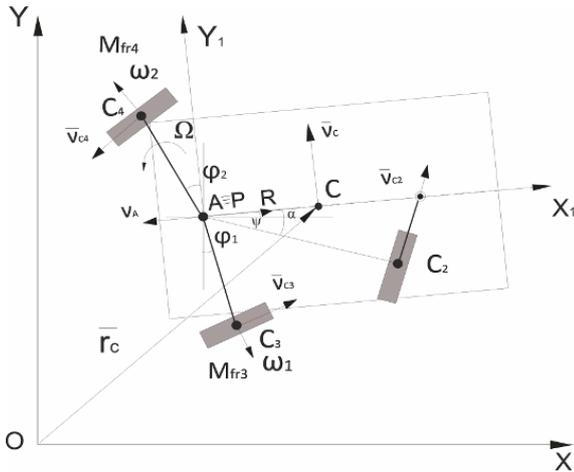


Рис. 1. Схема мобильной трехколесной платформы с двумя управляемыми колесами и одним роульным колесом; 1- корпус МРП, 2- роульное колесо, 3,4- управляемые колеса при выполнении поворота на месте вокруг точки А

При реализации такой кинематической схемы в момент осуществления поворота, МЦС находится в пределах опорной плоскости платформы, - осуществляется ее поворот на месте. Предложенная кинематическая схема прототипа позволяет реализовать точное маневрирование и позиционирование робота относительно заданного объекта, в том числе объекта с криволинейной поверхностью. Разворот на  $360^\circ$  может быть осуществлен на площади, не превышающей габаритные размеры устройства. Отсутствие ограничений в повороте ведущих колес вокруг вертикальной оси позволяет осуществлять движение МРП параллельно препятствию в случае отсутствия возможности разворота, что делает возможным решение многих практических задач в стесненных условиях [7-12].

Для повышения маневренности используется четырехканальная схема управления колесами робота. При реализации данной схемы ведущие колеса оснащены двумя двигателями каждое, вращающими их относительно общей вертикальной оси и независимых горизонтальных. Третье колесо обладает подвижностью относительно горизонтальной и вертикальной осей. Оно предполагает движение без проскальзывания и изменение угла  $\alpha$  при осуществлении этого движения.

Управляемыми параметрами здесь являются скорость МРП  $\bar{v}_A = (v_x, v_y)^T$  и угловая скорость поворота платформы  $\Omega$ . Управляющие воздействия на приводы системы  $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)$  оказывают влияние на переменные состояния, формируя вектор переменных состояния  $\bar{X} = (\varphi_1, \varphi_2, \omega_1, \omega_2)^T$ .

Положение МРП в системе координат  $Oxyz$  определяется вектором обобщенных координат  $\mathbf{q}_1 = [x \ y \ \psi \ \varphi_1 \ \varphi_2]^T$ , где  $x, y$  — координаты точки А (полноса робота) — точки, в которой сходятся полуоси ведущих колес 3, 4;  $\psi$  — угол поворота вокруг вертикали платформы 1, отсчитываемый от оси  $Ox$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы поворота ведущих колес (с центрами в точках  $C_3$  и  $C_4$  соответственно) относительно корпуса.

Угловая скорость платформы определяется следующим образом:

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где вектор  $\Omega$  задан проекциями на оси  $Axyz$ .

Угловые скорости ведущих колес определяются соотношениями:

$$\omega_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}, \omega_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  заданы проекциями на оси  $Ax_1y_1z_1$ .

Так как движение ведущих колес происходит без проскальзывания, то проецирование уравнений (2) на оси  $Ax_1y_1z_1$  позволяет получить три независимых уравнения неинтегрируемых (неголомомных) связей:

$$\begin{cases} V_{C_3y_1} = V_{P_3y_1} = -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi = 0, \\ V_{C_3x_1} = \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi + l\dot{\psi} - r\dot{\varphi}_1 = 0, \\ V_{C_4x_1} = \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi - l\dot{\psi} - r\dot{\varphi}_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $l = AC_3 = AC_4$  — длины полуосей ведущих колес;  $r = C_3P_3 = C_4P_4$  — радиус ведущих колес,  $P_3, P_4$  — точки контакта ведущих колес с поверхностью.

Динамические уравнения движения робота рассмотрены для двух характерных этапов:

1. Прямолинейное движение, при котором  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$

$$\begin{cases} m\dot{V} = \frac{nc}{r}(i_1 + i_2) - \mu_n V + \frac{1}{r}(M_{f_1} + M_{f_2}) + m a \omega^2, \\ J\dot{\Omega} = \frac{nc l}{r}(i_1 - i_2) - \mu_s \omega + \frac{l}{r}(M_{f_1} - M_{f_2}) - m a V \omega, \\ L_i \frac{di_1}{dt} + R i_1 + \frac{nc}{r}(V + l\omega) = U_1, \\ L_i \frac{di_2}{dt} + R i_2 + \frac{nc}{r}(V - l\omega) = U_2, \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $m$  — суммарная масса платформы и статоров электродвигателей;  $J_1$  — момент инерции

робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс  $C_1$ ;

Данная система включает динамические уравнения для четырех элементов: скорости  $V = \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi$  точки  $A$ , угловой скорости платформы  $\Omega = \dot{\psi}$  и токов  $i_1 = \dot{e}_1$ ,  $i_2 = \dot{e}_2$  во внешних цепях электродвигателей управляемых колес.

2. Поворот на месте вокруг мгновенного центра скоростей  $P$   $\omega_1 = -\omega_2$ .

$$\begin{cases} J\dot{\Omega} = \frac{nc l}{r}(i_1 - i_2) - \mu_\omega \omega + \frac{l}{r}(M_{f_1} - M_{f_2}) - m_1 a V \omega, \\ L_i \frac{di_1}{dt} + R i_1 + \frac{nc}{r}(V + l\omega) = U_1, \\ L_i \frac{di_2}{dt} + R i_2 + \frac{nc}{r}(V - l\omega) = U_2, \end{cases} \quad (5)$$

В приведенных системах R- омическое сопротивление цепи ротора,  $c$ - коэффициент электро-механического взаимодействия,  $m_1$ - суммарная масса всех элементов МРСП,  $\mu_\mu$ ,  $\mu_\omega$ - коэффициенты вязкого трения для поступательного и вращательного движения робота соответственно,  $i_1$ ,  $i_2$ - токи во внешних цепях электродвигателей соответственно,  $U_1, U_2$ - напряжения в цепях электродвигателей.

Положение мгновенного центра вращения описывается формулой:

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \end{pmatrix} \quad (7)$$

Для платформы с двумя управляемыми колесами вектор управляющих воздействий можно представить в виде:

$$\bar{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4), \quad (8)$$

где  $U_1, U_2$ - скорости управляемых колес, а  $U_3, U_4$ - углы поворота ведущих колес относительно вертикальных осей-  $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ .

Наибольшая маневренность робота достигается при  $PC \rightarrow \min$ .

Таким образом, задача минимизации радиуса поворота сводится к уменьшению расстояния PC. Изменяемым параметром является положение точки P (МЦС), которое описывается функцией:

$$P = f(\varphi_1, \varphi_2). \quad (9)$$

### III. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МРП

Уровень автономности робота определяется способностью с помощью сенсорных устройств воспринимать и интерпретировать окружающую среду, выполнять самостоятельную диагностику подсистем и при необходимости компенсировать их сбои, осуществлять точную навигацию и позиционирование и действовать в условиях динамически изменяющейся окружающей среды [2].

Уровень этих возможностей, а следовательно, и уровень автономности может варьироваться от ее практического отсутствия до полной автономности.

Для реализации автоматического управления, рассматриваемая платформа оснащена группой

устройств, принимающих информацию из внешней среды. В эту группу опционально входят:

- 3D сенсор высокого разрешения типа LIDAR;
- Система технического зрения (СТЗ);
- Система вертикальных и горизонтальных дальномеров ( $D_{1-12}$ );
- Датчик контактного взаимодействия  $D_{13}$ .

На рис. 2 представлена интеграция схемы системы управления МРП в схему исполнительного механизма движения ведущих колес МРП. Платформа оснащена бортовой системой управления и осуществляет автоматическую транспортировку грузов в заданные точки, определяемые оператором.

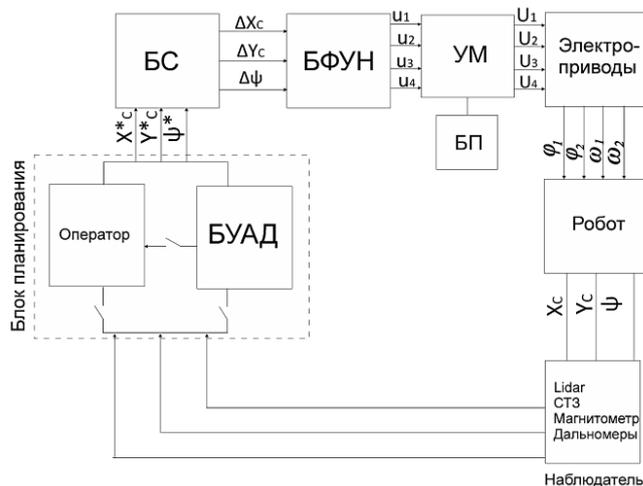


Рис. 2. Структурная схема системы управления МРП

Цикл управления МРП начинается в блоке планирования. Формирование задания на перемещение МРП может осуществляться оператором в режиме ручного управления. При реализации автономного управления план автономного движения формируется в блоке управления автономным движением (БУАД) с использованием информации, полученной с системы искусственного очувствления робота. Органы искусственного очувствления МРП могут содержать горизонтальные и вертикальные дальнометры  $D_{1-13}$ , LIDAR, СТЗ, магнитометр. В случае гибридного варианта формирования информации об окружающей среде, информация, полученная с систем искусственного очувствления робота обрабатывается с привлечением оператора и поступает в блок сравнения (БС).

В БС из блока планирования поступает информация в виде желаемых значений  $x_c^*$ ,  $y_c^*$  и  $\psi^*$ , задаваемых вручную оператором, или БУАД. Полученные данные позволяют определить отклонения- ошибки положения МРП  $\Delta x_c$ ,  $\Delta y_c$ ,  $\Delta \psi$ . Значения ошибок поступают в блок формирования управляющих напряжений (БФУН), который задает управляющие напряжения  $u_1, u_2, u_3, u_4$  на четыре электропривода объектов управления- колес робота. Усилитель мощности (УМ), снабженный блоком питания (БП), усиливает управляющие напряжения до необходимых величин  $U_1, U_2, U_3, U_4$ . Приводы поворачивают колеса МРП на необходимые углы  $\varphi_1, \varphi_2$  с требуемой угловой скоростью  $\omega_1, \omega_2$ . В

результате этого, центр масс С робота приобретает новые координаты  $x_c, y_c, \psi$ . Цикл управления замыкается посредством использования наблюдающих органов МРП, которые фиксируют текущее положение робота и передают сведения в блок планирования, либо новым решением, принимаемым оператором. Данный цикл продолжает действовать до достижения роботом конечной точки.

IV. РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МРП

Согласно принятому в России в 2019 году ГОСТ Р 60.0.0.4–2019 (идентичен международному стандарту ИСО 8373:2012), выделяются два основных режима работы робототехнической системы:

— автоматический режим -рабочий режим, при котором система управления роботом работает в соответствии с программой выполнения задания без вмешательства человека.

— ручной режим - рабочий режим, при котором робот управляется оператором с помощью, например, телеуправления через ЧМИ- кнопок или джойстика, и который исключает автоматическую работу.

Телеуправление представляет собой управление в реальном времени движением робота или робототехнического устройства, осуществляемое оператором из удаленного места (дистанционно) с использованием телевизионного канала обратной связи.

На деле степени автономности робота могут иметь более широкую классификацию. Ряд исследователей выделяют десять и более уровней автономности робота [13-17], некоторые из которых неочевидно отличаются друг от друга. Для упрощения разрабатываемой стратегии перехода инициативы управления, выделим четыре основных уровня автономности робота (табл. 1).

Введем понятие коэффициента вовлеченности оператора в процесс управления МРП  $\lambda$ , причем:

$$\lambda = \frac{t}{\tau} \leq 1, \tag{10}$$

где  $\tau$ - полное время выполнения технологической операции, а  $t$ - время участия человека в процессе управления МРП.

Основные степени автономности с учетом коэффициента вовлеченности оператора в процесс управления, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни автономности человеко-машинной системы

№ реж.	Уровень автономности	Восприятие	Планирование	Действие	Коэффициент вовлеченности оператора в процесс управления
1	Телеуправление без поддержки (Manual Teleoperation)	ч	ч	ч	$\lambda=1$
2	Телеуправление с	ч/р	ч	ч/р	$0,5 < \lambda < 1$

	поддержкой (Assisted Teleoperation)				
3	Контроль выполнения подзадач (Executive Control)	р	ч/р	р	$0 < \lambda < 0,5$
4	Полная автономность (Full Autonomy)	р	р	р	$\lambda \ll 1$

В режиме (I) на всем протяжении выполнения технологической операции оператор полностью берет на себя задачи управления МРП, восприятие окружающей среды и мониторинг систем, разработку планов и способов их реализации.

При реализации режима (II), телеуправления с поддержкой, оператор осуществляет управление более 50% общего времени работы МРП. Тем не менее, робот воспринимает и анализирует окружающую обстановку и в ряде случаев может вмешаться в выполнение задачи, например остановиться при обнаружении препятствия.

При реализации режима (III), оператор ставит МРП абстрактную цель высокого уровня (например, перейти в окружающей среде в заданную точку). Робот автономно воспринимает окружающую среду, формирует план движения и перемещается по сформированной самостоятельно траектории. При прохождении наиболее ответственных участков управление осуществляет оператор.

При реализации режима (IV), МРП выполняет поставленную задачу преимущественно автономно, без вмешательства человека.

Графическое отображение степени участия человека в технологическом процессе, реализуемом МРП, представлено на графиках, рис. 3.

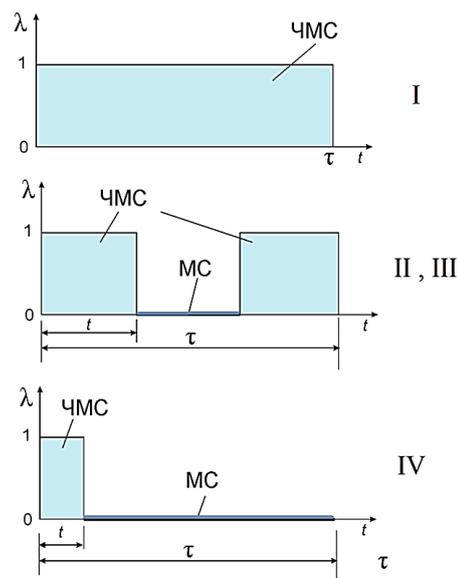


Рис. 3. Графическая интерпретация уровня автономности  $\lambda$  выполнения МРП технологического процесса. I- телеуправление II, III- телеуправление с поддержкой выполнения подзадач, IV- автономная работа

Широкое распространение получил тип взаимодействия робота и оператора, в основе которого лежит периодическое изменение уровня автономности системы, инициатором которого может выступать как человек, так и робот, т.е. взаимодействие человека и робота со смешанной инициативой.

Планируемый уровень автономности МРП напрямую зависит от задачи, которую робот должен выполнять. В соответствии с [22], действия, выполняемые роботом, могут быть классифицированы по пяти категориям:

- навигация,
- манипулирование,
- восприятие окружающей среды (в части определения препятствий и их типа),
- организация деятельности и социальное взаимодействие.

Для проектируемой МРП в рамках данной работы мы рассматриваем только навигацию и восприятие окружающей среды. Таким образом, МРП с изменяемыми уровнями автономности позволяет оператору выбирать до начала работы предпочтительный уровень автономности, либо осуществлять ручное телеуправление МРП непосредственно в процессе выполнения операции [18-20].

Ниже представлена блок-схема алгоритма реализации переменных режимов автономности МРП при выполнении платформой заданной технологической операции.

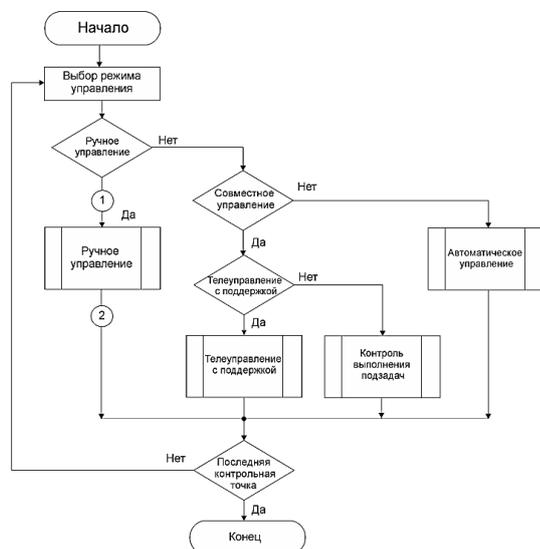


Рис. 4. Блок-схема алгоритма изменения уровня автономности работы МРП

Этапы начального размещения МРП на участке, и задания контрольных точек выполняет оператор в режиме телеуправления без поддержки-1. На начальном этапе оператором также осуществляется выбор предпочтительного режима управления. Далее в соответствующем режиме (1-4) МРП с использованием информации, поступающей с системы искусственного очувствления робота, определяет оптимальный путь до ближайшей контрольной точки и выстраивает

предполагаемую траекторию движения и реализует подпрограмму по перемещению.

После реализации подпрограммы, в случае наличия других контрольных точек для достижения, МРП возвращается к блоку выбора режима. Выбор режима управления может быть осуществлен вручную или автоматически. При отсутствии сигнала, время реакции оператора, представляющее собой задержку системы, является определяющим параметром для выбора режима телеуправления.

На рис. 5 представлена блок-схема подпрограммы достижения заданной точки.

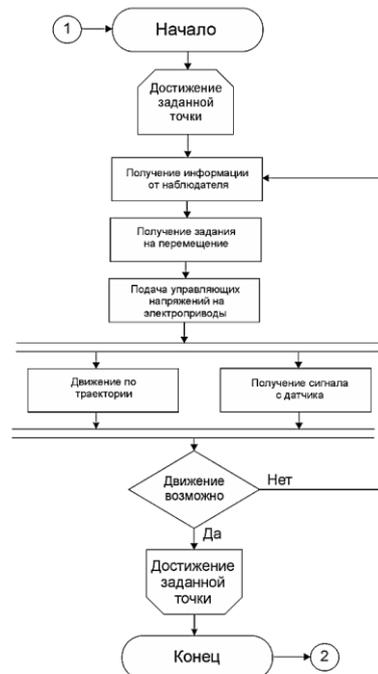


Рис. 5. Блок-схема подпрограммы достижения заданной точки (пример для ручного режима управления)

На данном этапе исследований разработан общий алгоритм подпрограммы, которая может быть реализована при изначально выбранном любом режиме автономности 1-4. Для примера в конкретной работе подпрограмма рассмотрена для ручного режима. Движение по траектории представляет собой параллельный процесс, включающий непосредственно движение и обработку информации с датчиков. В случае появления препятствий, при которых реализация задания на перемещения становится невозможной, значительная задержка системы приводит к выходу из подпрограммы достижения заданной точки и возврату к блоку выбора режима.

Далее при окончании выполнения работ МРП необходимо занять требуемое конечное положение-точку останова. Этот этап может быть выполнен при сопровождении оператора или полностью самостоятельно МРП, в режиме 4.

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ АУТОНОМНОСТИ ДВИЖЕНИЯ МРП

Чем более сложна среда, в которой предстоит работать роботу, тем более высокий уровень автономности требуется для решения задачи [21,22].

Однако цена ошибки определяет относительно невысокие уровни автономности самоходных роботов, поскольку результат их решения может повлиять на безопасность человека. Определяющим фактором для выбора режима работы МРП может также служить квалификация оператора, а также ситуационная сложность производственных условий. Маневренность робототехнической системы может также повысить ее уровень автономности.

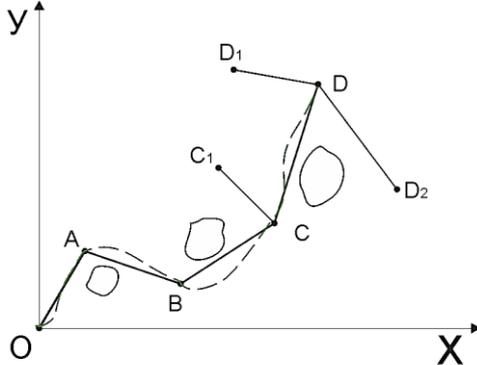


Рис. 6. Траектория движения МРП

На рис. 6 непрерывной линией показана желаемая кусочно-линейная траектория движения МРП, а штриховой- действительная. Точки С и D являются бифуркационными- в них МРП имеет вариативность в выборе дальнейшего направления движения. Фигурами неправильной формы обозначены препятствия, которые учитываются при выборе траектории движения робота оператором или БУАД.

Точки А, В, С, С<sub>1</sub>, D, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> являются контрольными. Как видно на схеме (рис. 7), участки АВ, ВС, CD являются наиболее сложными для прохождения МРП в автономном режиме, тогда как СС<sub>1</sub>, DD<sub>1</sub>, DD<sub>2</sub> МРП способна преодолеть без вмешательства оператора.

По завершении подпрограммы перемещения между двумя заданными точками (рис. 5), МРП возвращается к выбору режима управления (рис 4), чтобы обеспечить безопасное прохождение наиболее ответственных участков. Как и было указано ранее, при отсутствии инициативы со стороны оператора, МРП продолжает выполнять задачу по перемещению в автономном режиме.

Выбранная кинематическая схема МРП отличается тем, что ведущие колеса имеют возможность независимого поворота относительно общей вертикальной оси. Это позволяет минимизировать радиус поворота и осуществлять движение параллельно препятствию, что способствует снижению доли ручного управления МРП при выполнении ею технологической операции. Моделирование траекторий движения МРП с заявленной кинематической схемой будет выполнено авторами в ходе дальнейших исследований, однако на данном этапе работы очевидно преимущество примененной кинематики, прямо сказывающееся на повышении уровня автономности, снижения нагрузки на оператора и повышения безопасности производственных условий.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках исследования была предложена кинематическая схема МРП, отличающаяся высокой маневренностью, обеспечиваемой независимым поворотом осей ведущих колес в горизонтальной плоскости.
2. Предложена концепция организации управления МРП с изменяемой степенью автономности. Предложены и рассмотрены четыре уровня автономности работы системы. Для каждого уровня определены задачи, выполняемые роботом и оператором.
3. Разработана схема системы автоматического управления МРП. Ключевой особенностью схемы является реализация механизма передачи контроля выполнения задач между человеком и роботом, реализованная в блоке наблюдения.
4. Представлена блок-схема изменения режимов автономности МРП в ходе выполнения задания по достижению контрольной точки. Разработан универсальный алгоритм реализации подпрограммы выполнения задания по перемещению.
5. Определены контролируемые переменные состояния управляемой системы.
6. Рассмотрен критерий эффективности управления МРП, основанный на минимизации времени реакции оператора на возмущающий сигнал, поступающий с ЧМИ.

Дальнейшим направлением исследования является разработка и усовершенствование механизма автоматического переключения режима автономности МРП в зависимости от выполняемого задания, а так же разработка человеко-машинного интерфейса, позволяющего минимизировать время реакции оператора на сигналы, поступающие с системы искусственного осязания робота. Основной задачей в продолжение исследования является проведение исследований влияния системы на выполнение поставленных перед оператором МРП задач, по результатам которых можно будет сделать выводы об особенностях и эффективности применения предложенного подхода.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Gawel A. et al. A fully-integrated sensing and control system for high-accuracy mobile robotic building construction //2019 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). – IEEE, 2019. – p. 2300-2307 DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967733
- [2] Семькина И. Ю., Григорьев А. В., Гаргаев А. Н. Подходы к созданию роботизированного проходческого комбайна в условиях безлюдной шахты. *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017*. – 2017. – С. 202-205.
- [3] Esan O., Du S., Lodewyk B. Review on Autonomous Indoor Wheel Mobile Robot Navigation Systems // 2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD). IEEE, 2020. P. 1. DOI: 10.1109/icABCD49160.2020.9183838
- [4] Jacko J. A. (ed). Human computer interaction handbook: *Fundamentals, evolving technologies, and emerging applications*. – 2012. DOI: 10.1201/b11963
- [5] Bengler K. et al. From HMI to HMIs: Towards an HMI framework for automated driving. *Information*. – 2020. – Т. 11. – №. 2. – p. 61. DOI: 10.3390/info11020061
- [6] Петров В.Ф., Симонов С.Б., Терентьев А.И. и др. Сетевая структура обработки информации в распределенных системах управления

- наземными робототехническими комплексами. *Известия вузов. Электроника*. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 389-398. – DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-389398.
- [7] Яцун С.Ф., Бартечев В.В., Политов Е.В. Н., Афонин Д.В. (2018). Моделирование движения робота-тягача для перевозки самолетов по аэродрому. *Известия Юго-Западного государственного университета*, 22(2), 34-43. Doi: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-34-43
- [8] Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot //Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” ER (ZR) 2019, Kursk, Russia, 17-20 April 2019. – Springer Singapore, 2020. – С. 397-409. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2\_32
- [9] Politov E. N., Rukavitsyn A. N. Study of controlled motion bionic mini robot //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 87. – №. 8. – С. 082040. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082040
- [10] Афонин Д. А., Печурин А. С., Яцун С. Ф. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной буксировочной системы воздушных судов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2022, № 2, с. 91-102 DOI: 10.31857/S0235711922020031
- [11] Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов // *Фундаментальная и прикладная математика*. 2005. № 8. С. 29. Doi: 10.1007/s10958-007-0496-4
- [12] Morin P., Samson C. Motion control of wheeled mobile robots // *Springer handbook of robotics*. – 2008. – Т. 1. – р. 799-826. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5\_35
- [13] Спасский Б. А. Телеуправление в экстремальной робототехнике. *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2020. – Т. 8. – №. 2. – С. 101-111.
- [14] Спасский Б. А. Совместное управление роботами, автономное и от человека-оператора // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2017. – №. 1. – С. 69-76.
- [15] Спасский Б. А. Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2016. – №. 4. – С. 21-31.
- [16] Лопота А. В., Спасский Б. А. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2020. – Т. 8. – №. 1. – С. 5-17.
- [17] Beer J. M., Fisk A. D., Rogers W. A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction // *Journal of human-robot interaction*. – 2014. – Т. 3. – №. 2. – р. 74. Doi: 10.5898/JHRI.3.2.Beer
- [18] Czarnowski J. et al. Technology gaps in human-machine interfaces for autonomous construction robots. *Automation in Construction*. – 2018. – Т. 94. – р. 179-190. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.06.014
- [19] Петров В. Ф. и др. Опыт построения человеко-машинного интерфейса оператора дистанционного и супервизорного управления движением РТС // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2019. – №. 1 (203). – С. 199-209.
- [20] Сергеев С. Ф. Проблема интерфейса в человеко-машинном взаимодействии // *Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики*. Вып. – 2014. – Т. 6. – С. 83-105.
- [21] Wang S., Ramos J. Dynamic locomotion teleoperation of a reduced model of a wheeled humanoid robot using a whole-body human-machine interface. *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – р. 1872-1879. DOI: 10.1109/LRA.2021.3138521
- [22] Watanabe K. et al. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots. *Journal of Intelligent and Robotic systems*. – 1998. – Т. 22. – №. 3. – р. 315-330. DOI: 10.1023/a:1008048307352
- Loktionova O.G.**  
**Локтионова О.Г.**  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго- Западного государственного университета. В 1987 году окончила Курский политехнический институт по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».  
В 2008 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук «Динамика вибрационных технологических процессов и машин для переработки неоднородных гранулированных сред».  
Является автором 140 научных публикаций и 8 патентов на изобретения.  
Область научных интересов - механика, динамика сплошных сред, вибрационные машины и технологии, мехатроника, робототехника Эл. адрес: log7.9@mfil.ru  
Служебный адрес: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94, ЮЗГУ
- Saveleva E.V.**  
**Савельева Екатерина Владимировна**  
Инженер, младший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго- Западного государственного университета.  
В 2017 г. окончила магистратуру Юго- Западного государственного университета, специальность: «Теория расчета и проектирования зданий и сооружений городской и транспортной инфраструктуры».  
В 2021 году окончила аспирантуру по направлению «Техника и технологии строительства». С 2016 года занимается научной работой на кафедре механики, мехатроники и робототехники Юго- Западного государственного университета. Участвует в исследованиях носимых и колесных робототехнических систем. Является соавтором 20 научных публикаций и 3 патентов на полезную модель.  
Область научных интересов: строительная робототехника, усиление строительных конструкций, сложное сопротивление строительных конструкций, композитные армирующие материалы.  
Эл. адрес: katasavelkursk@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-5993-3791  
Служебный адрес: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94, ЮЗГУ
- Politov E.N.**  
**Политов Евгений Николаевич**  
Доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета, г. Курск.  
В 2001 году окончил Курский государственный технический университет по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство". В 2016 году окончил Юго-Западный государственный университет по направлению магистратуры «Мехатроника и робототехника».  
В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.  
Является автором более 70 научных публикаций и 14 патентов.  
Область научных интересов – мобильная робототехника, моделирование динамических процессов, реология.  
Эл. адрес: politovveyevgeny@yandex.ru  
orcid.org/ 0000-0002-0597-8505  
Служебный адрес: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94, ЮЗГУ

# Movement control algorithm for a mobile robotic platform with a variable level of autonomy

O.G. Loktionova, E.V. Saveleva, E.N. Politov

**Abstract**—The creation and implementation of robotic transport devices in production is an urgent task for the development of various industries. Due to the initial complexity of the production conditions, as well as various operational upgrades of individual sections, it is often not possible to completely exclude human participation in the performance of a technological operation. Robotic systems with a given level of autonomy help to reduce the labor intensity of work for a person. The object of the study is a mobile three-wheeled robotic platform (MRP) for local delivery of goods, which has high maneuverability. The purpose of this work is to develop an automatic control system for a mobile robotic wheeled platform with a variable level of autonomy, as well as to evaluate the effectiveness of the transition of the control initiative between a person and a robot when performing various subtasks.

The study uses methods of structural analysis and synthesis of automatic control systems for technical objects. The block diagram of the automatic control system (ACS), the scheme and nature of the organization of feedback in the process of human-machine interaction are considered. The criterion for the effectiveness of MCI control based on minimizing the operator's response time to a disturbing signal coming from the HMI is considered.

The use of control with a variable level of autonomy will speed up the robotization of industry, reduce the labor intensity of work in production, reduce the class of labor hazard for humans, as well as minimize the risks of emergency and emergency situations when performing specified technological operations.

**Key words**—Mobile robotic platform (MRP), automatic control system (ACS), human-machine interface (HMI), telecontrol, variable level of autonomy.

## 1. REFERENCES

- [1]. Gawel A et al. A fully-integrated sensing and control system for high-accuracy mobile robotic building construction //2019 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). – IEEE, 2019. – p. 2300-2307 DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967733
- [2]. Semykina I. Yu., Grigoriev A. V., Gargaev A. N. Podkhody k sozdaniyu robotizirovannogo prokhodcheskogo kombayna v usloviyakh bezlyudnoy shakhty [Approaches to the creation of a robotic tunneling machine in a deserted mine]. Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroyeniya i elektromekhaniki: [Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics]: IPDME-2017. – 2017. – S. 202-205.
- [3]. Esan O., Du S., Lodewyk B. Review on Autonomous Indoor Wheel Mobile Robot Navigation Systems // 2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD). IEEE, 2020. P. 1. DOI: 10.1109/icABCD49160.2020.9183838
- [4]. Jacko, J. A. (ed.). Human computer interaction handbook: Fundamentals, evolving technologies, and emerging applications. – 2012. DOI: 10.1201/b11963
- [5]. Bengler K. et al. From HMI to HMIs: Towards an HMI framework for automated driving. information. – 2020. – T. 11. – No. 2.- p. 61. DOI: 10.3390/info11020061
- [6]. Petrov V.F., Simonov S.B., Terentiev A.I. Setevaya struktura obrabotki informatsii v raspredelennykh sistemakh upravleniya nazemnymi robototekhnicheskimi kompleksami [Network structure of information processing in distributed control systems for ground-based robotic complexes]. Izvestiya vuzov. [University bulletin. Electronics]. – 2018. – T. 23, No. 4. – S. 389-398. – DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-389398.
- [7]. Yatsun S.F., Bartenev V.V., Politov E.V. N., Afonin D.V. (2018). Modelirovaniye dvizheniya robota-tyagacha dlya perevozki samoletov po aerodromu [Simulation of the movement of a tractor robot for transporting aircraft around the airfield]. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Southwestern State University], 22(2), 34-43. Doi: 10.21869/2223-1560-2018-22-2-34-43
- [8]. Politov E., Afonin D., Bartenev V. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” ER (ZR) 2019, Kursk, Russia, 17 -20 April 2019. – Springer Singapore, 2020. – P. 397-409. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2\_32
- [9]. Politov E. N., Rukavitsyn A. N. Study of controlled motion bionic mini robot // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – T. 87. – no. 8. – P. 082040. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082040
- [10]. Afonin D. A., Pechurin A. S., Yatsun S. F. Modelirovaniye avtonomnogo krivolinyenogo dvizheniya robotizirovannoy buksirovochnoy sistemy vozduzhnykh sudov [Modeling of autonomous curvilinear motion of a robotic towing system of aircraft] // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and reliability of machines], 2022, no. 2, p. 91-102 DOI: 10.31857/S0235711922020031
- [11]. Martynenko U.G. Upravleniye dvizheniyem mobil'nykh kolesnykh robotov [Movement control of mobile wheeled robots] // Fundamental'naya i prikladnaya matematika [Fundamental and applied mathematics]. 2005. No. 8. P. 29. Doi: 10.1007/s10958-007-0496-4
- [12]. Morin P., Samson C. Motion control of wheeled mobile robots // Springer handbook of robotics. – 2008. – T. 1. – p. 799-826. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5\_35
- [13]. Spassky B. A. Teleupravleniye v ekstremal'noy robototekhnike [Remote control in extreme robotics]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. – 2020. – T. 8. – No. 2. – S. 101-111.
- [14]. Spassky B. A. Sovmestnoye upravleniye robotami, avtonomnoye i ot cheloveka-operatora [Joint control of robots, autonomous and from a human operator] // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. – 2017. – no. 1. – S. 69-76.
- [15]. Spassky B. A. Obzor sovremennykh interfeysnykh sistem operatorov mobil'nykh nazemnykh robotov [Review of modern interface systems for operators of mobile ground robots] // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. – 2016. – no. 4. – S. 21-31.
- [16]. Lopota A. V., Spassky B. A. Mobil'nyye nazemnyye robototekhnicheskiye komplekсы professional'nogo naznacheniya [Mobile ground-based robotic complexes for professional purposes] // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. – 2020. – T. 8. – No. 1. – S. 5-17.
- [17]. Beer J. M., Fisk A. D., Rogers W. A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction // Journal of human-robot interaction. – 2014. – T. 3. – No. 2.- p. 74. Doi: 10.5898/JHRI.3.2.Beer
- [18]. Czarnowski J. et al. Technology gaps in human-machine interfaces for autonomous construction robots. Automation in Construction. – 2018. – T. 94. – p. 179-190. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.06.014
- [19]. Petrov V. F. et al. Opyt postroyeniya cheloveko-mashinnogo interfeysa operatora distantsionnogo i supervizionnogo upravleniya dvizheniyem RTS [Experience in building a human-machine interface for an operator of remote and supervisory control of RTS motion] // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. [Bulletin of the Southern Federal University]. Technical science. – 2019. – no. 1 (203). – S. 199-209.

[20]. Sergeev S. F. Problema interfeysa v cheloveko-mashinnom vzaimodeystvii [The problem of the interface in human-machine interaction] // Aktual'nyye problemy psikhologii truda, inzhenernoy psikhologii i ergonomiki [Actual problems of labor psychology, engineering psychology and ergonomics. Issue]. - 2014. - T. 6. - S. 83-105.

[21]. Wang S., Ramos J. Dynamic locomotion teleoperation of a reduced model of a wheeled humanoid robot using a whole-body human-machine

interface. IEEE Robotics and Automation Letters. - 2021. - Vol. 7. - No. 2.-p. 1872-1879. DOI: 10.1109/LRA.2021.3138521

[22]. Watanabe K. et al. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots. Journal of Intelligent and Robotic Systems. - 1998. - T. 22. - No. 3.-p. 315-330. DOI: 10.1023/a:1008048307352