

УДК 004.023
doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

КВАЗИНЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

В. Р. Александров¹, Н. В. Азарнов², А. А. Щеткин³, А. П. Кушнир⁴, Р. М. Огорельцев⁵

^{1,2,3} Научно-производственное предприятие «Исток» имени Шокина, Фрязино, Московская обл., Россия
^{1,3} МИРЭА – Российский технологический университет (филиал в г. Фрязино), Фрязино, Московская обл., Россия
^{4,5} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ aaschetkin@istokmw.ru
⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ roman-ogoreltcev@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном производстве все большее значение приобретает оптимизация производственных процессов. Рассмотрены принципы построения пути автономным мобильным роботом, в том числе в среде со статическими и динамическими препятствиями. Целью работы является снижение затрат на логистические системы, построенные на основе автономных мобильных роботов. *Материалы и методы.* Исследования основываются на взаимодействии MES/APS систем (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) в сочетании с IIoT (Industrial Internet of Things) и мобильными роботами. *Результаты.* Предложен алгоритм релейного управления с искусственной зоной нечувствительности и алгоритм обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики. *Выводы.* Предложенные алгоритмы интеллектуального управления позволяют упростить реализацию и снизить стоимость логистического проекта на основе применения автономных роботов и отказаться от ряда дорогостоящего программного обеспечения.

Ключевые слова: цифровое производство, интернет вещей, автономный робот, логистика, навигация, обход динамических препятствий, нечеткая логика, SimInTech, IIoT.Istok, MES, APS

Для цитирования: Александров В. Р., Азарнов Н. В., Щеткин А. А., Кушнир А. П., Огорельцев Р. М. Квазинечеткое управление автономным мобильным роботом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 57–67. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

UASI-PRECISE CONTROL OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

V.R. Aleksandrov¹, N.V. Azarnov², A.A. Schetkin³, A.P. Kushnir⁴, R.M. Ogoreltcev⁵

^{1,2,3} Research and Production Enterprise "Istok" named after A.I. Shokin, Fryazino, Moscow region, Russia
^{1,3} MIREA – Russian Technological University (Fryazino branch), Fryazino, Moscow region, Russia
^{4,5} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² nvazarnov@istokmw.ru, ³ aaschetkin@istokmw.ru
⁴ 89169521579@ya.ru, ⁵ roman-ogoreltcev@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern production, optimization of production processes is becoming increasingly important. This article discusses the principles of path construction by an autonomous mobile robot, including in an environment with static and dynamic obstacles. *Materials and methods.* The research is based on the interaction of MES/APS systems (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) in combination with IIoT (Industrial Internet of Things) and mobile robots. *Results.* An algorithm of relay control with an artificial dead zone and an algorithm of obstacle avoidance in a local environment based on quasi-fuzzy logic are proposed. *Conclusions.* The proposed intelligent control algorithms allow reducing the cost of a logistics project based on autonomous robots and abandoning a number of expensive software.

Keywords: digital manufacturing, Internet of Things, autonomous robot, logistics, navigation, dynamic obstacle avoidance, fuzzy logic, SimInTech, IIoT.Istok, MES, APS

For citation: Aleksandrov V.R., Azarnov N.V., Schetkin A.A., Kushnir A.P., Ogoreltcev R.M. Uasi-precise control of an autonomous mobile robot. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):57–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

Введение

Среди приоритетных направлений стратегии научно-технологического развития РФ намечен переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным комплексам, системам искусственного интеллекта. Важность развития информационно-телекоммуникационных систем и робототехнических комплексов отмечается также в приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники РФ. Все это говорит о важности разработок в сфере автономных транспортных систем в сфере цифровизации производства, а также разработки и внедрения новых методов и средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации приборостроительного производства, обеспечивающих повышение производительности, снижение трудоемкости и повышение экономичности производства с учетом решения вопросов обеспечения надежности, экологической безопасности окружающей среды.

Материалы и методы

В рамках развития «Передовой инженерной школы СВЧ-электроники» на базе АО «НПП "Исток" им. Шокина» проводится комплекс работ по созданию «Цифрового производства» и «Промышленного интернета вещей» – IIoT.Istok [1]. В систему «Цифрового производства» входят в настоящее время такие подсистемы, как «Технология» (далее – CAPP), «Нормативно-справочная документация» (далее – MDM), «Платформа промышленного интернета вещей» (далее – IIoT.Istok), «Планирование производства» (далее – APS/MES), которые решают целый комплекс задач (рис. 1, 2).

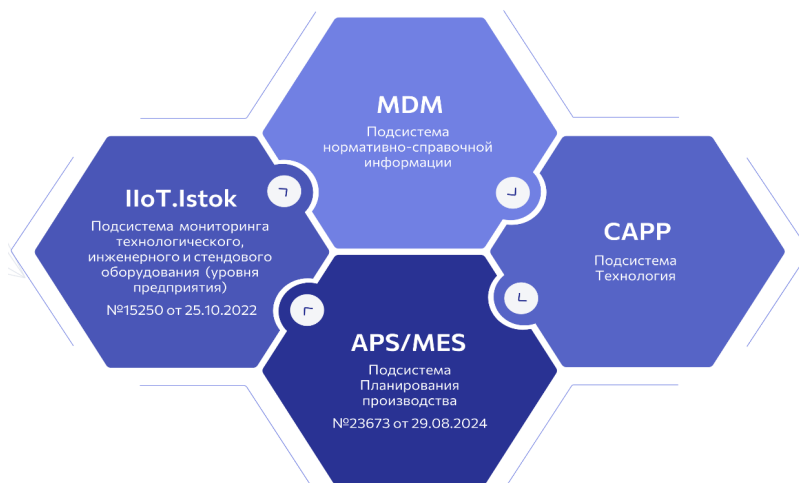


Рис. 1. Подсистемы программного продукта «Цифровое производство» АО «НПП "Исток" им. Шокина»



Рис. 2. Задачи, решаемые подсистемами ACU предприятия

Подсистема планирования производства APS/MES предназначена, в частности, для автоматизированного/автоматического построения оптимального производственного плана вплоть до сменно-суточных заданий и реализована на основе технологий больших данных и искусственного интеллекта. В число решаемых задач входят такие, как формирование производственной программы, составление производственного расписания для каждого рабочего места, определение потребности в материалах, комплектующих и инструменте, учет и контроль поставок, хранения и использования в производстве материалов и комплектующих, учет отгрузки и хранения готовой продукции, выдача и контроль сменных заданий на выполнение производственного плана, выдача требований на материалы и комплектующие на рабочие места со склада и т.д. Для полной автоматизации технологического процесса необходимо связать данные задачи информационными и материальными потоками. Одновременно с этим от технологического и инженерного оборудования через систему IIoT.Istok поступают данные о работоспособности и в каких циклах оборудование работает и в том числе потребность посредством ручных статусов в инструменте или заготовках.

В соответствии со сменным заданием определяются потребности в материалах, комплектующих и инструменте, данные о которых в цифровом виде трансформируются в наряд на бумажном носителе на выдачу материалов и комплектующих на рабочие места со склада. Параллельно формируется цифровой запрос для мобильного комплекса (рис. 3).

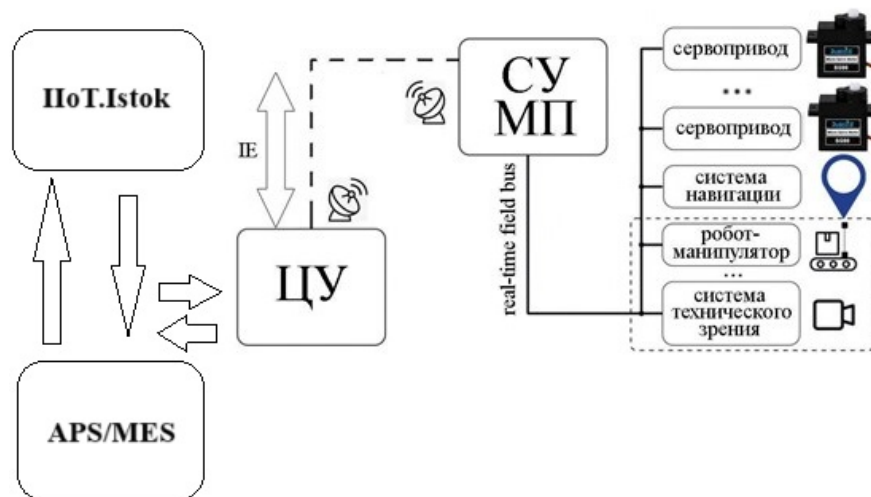


Рис. 3. Схема структуры программного обеспечения мобильного комплекса

Мобильный комплекс состоит из автономной мобильной платформы с установленным на ней роботом-манипулятором (далее – РМ) коллаборативного типа (далее – коботом) и включает в себя систему управления мобильной платформой (далее – СУМП), технического зрения, навигации. Центр управления (далее – ЦУ) связан с системой управления верхнего уровня предприятия по сети Ethernet, а с мобильным комплексом – посредством LoRaWAN. Данный вид связи хорошо зарекомендовал себя при работе в сложных условиях и на большие расстояния [2].

Автономные мобильные платформы представляют собой эффективное логистическое решение, которое находит широкое применение в современных производственных системах. Эти технологии повышают производительность труда, позволяя сократить затраты, увеличить скорость обработки грузов и повысить общую эффективность операций [3].

Для обеспечения бесперебойного движения в условиях, полных непредвиденных обстоятельств, и повышения общей эффективности логистических операций важную роль играет планирование пути с обходом препятствий, как статических, так и динамических.

Среди автономных мобильных роботов можно выделить два основных направления: автоматизированные направляемые транспортные средства (англ. *Automated Guided Vehicles*, далее – AGV) и мобильные роботизированные системы (англ. *Automated Mobile Robots*, далее – AMR). AGV представляют собой устройства, которые следуют заранее запрограммированным маршрутам, опираясь на магнитные, оптические или лазерные метки. Эти платформы хорошо подходят для выполнения задач при постоянных условиях, таких как доставка материалов между складами или внутри производственных зон по строго фиксированным маршрутам, например, по проложенной магнитной ленте. Однако эта жесткая «трамвайная» зависимость

от маршрута ограничивает гибкость и адаптивность таких систем и делает невозможным их использование в динамично изменяемой среде.

Платформы класса AMR представляют собой более продвинутые системы, способные самостоятельно анализировать свою окружающую среду и строить маршрут в реальном масштабе времени. Они используют достаточно сложные алгоритмы навигации и систему сенсоров для получения информации о препятствиях и автоматического их объезда. Это позволяет AMR эффективно работать в менее предсказуемых условиях, где они могут адаптироваться к изменениям окружающей обстановки, что значительно увеличивает их производительность и безопасность по отношению к персоналу, снижает риски простоя и ошибок, которые могут произойти при использовании жестко запрограммированных маршрутов. Благодаря возможности быстрого реагирования на изменения, например перемещение других объектов или возникновение новых препятствий, роботы AMR считаются более эффективными по сравнению с AGV в условиях динамично изменяемых и сложных логистических сред [4]. Вместе с тем стоимость таких роботов существенно отличается благодаря продвинутому набору интеллектуальных сенсоров (измерительных преобразователей) и более мощному программному обеспечению. Это обусловлено необходимостью использования сложного и дорогого оборудования (плоскостные и объемные лидары, более мощные вычислительные средства), требующегося для таких популярных при создании AMR алгоритмов, как SLAM (*simultaneous localization and mapping* – одновременная локализация и построение карты) [5]. Так, например, автономный мобильный робот Foxtech Custom Knapsak AGV BF100 стоит почти в два раза дешевле по сравнению с моделью AIVISON AMR AMB150 со SLAM. Еще больший разброс в ценах имеют датчики расстояния и системы видеонаблюдения. Поэтому целью работы является снижение затрат на логистические системы, построенные на основе автономных мобильных роботов.

Теоретические основы построения пути

Двухслойная архитектура системы планирования пути стала популярной концепцией в разработке автономных мобильных роботов и других систем, работающих в изменяющихся и сложных окружениях [6, 7]. Основные причины выбора именно этого подхода связаны с повышением эффективности, надежности и гибкости процессов планирования, а также с возможностью более эффективного управления ресурсами.

К первому слою относится уровень глобального планирования маршрута. Данный уровень планирования требует достаточно низкой частоты обновления и строит грубый маршрут по карте согласно выданному первичному полетному заданию от системы выдачи заказов робота. Результатом работы данной системы является построение глобального маршрута. Для решения этой задачи разработаны различные теоретические модели, на основе которых строятся алгоритмы, определяющие наиболее эффективные пути. Основой большинства алгоритмов построения пути служит графовая теория, где окружение моделируется в виде графа, состоящего из узлов и ребер. Узлы представляют собой ключевые точки, такие как местоположения или цели, а ребра – возможные маршруты между этими точками, с определением веса, который может отражать расстояние, время, затраты и другие параметры. Классические алгоритмы вроде алгоритма Дейкстры и алгоритма A* позволяют находить кратчайшие пути от одной вершины графа к другим, учитывая различные ограничения и условия.

Ко второму слою относится уровень локального планирования и предотвращения столкновений. Данный уровень планирования требует высокой частоты обновления и строит уточненный маршрут по данным от датчиков обнаружения препятствий и системы локализации автономной транспортной платформы с наименьшими отклонениями от ранее намеченного глобального пути. Результатом работы данной системы является траектория движения в локальной области.

Метод потенциальных полей

Метод потенциальных полей является одной из наиболее популярных стратегий локального планирования для автономных мобильных роботов. Он основан на концепции создания виртуального поля, где цели и препятствия рассматриваются как источники потенциальной энергии, которые воздействуют на движение робота. Метод объединяет идеи из физики и теории управления для обеспечения безопасного и оптимального перемещения к конечной точке маршрута.

Поле цели создается целевой точкой робота и направляет его к цели. Чем ближе робот к цели, тем сильнее притяжение. Поле препятствий (рис. 4) создается от препятствий к роботу и предназначено для предотвращения столкновений. Чем ближе робот к препятствию, тем сильнее будет отталкивание.

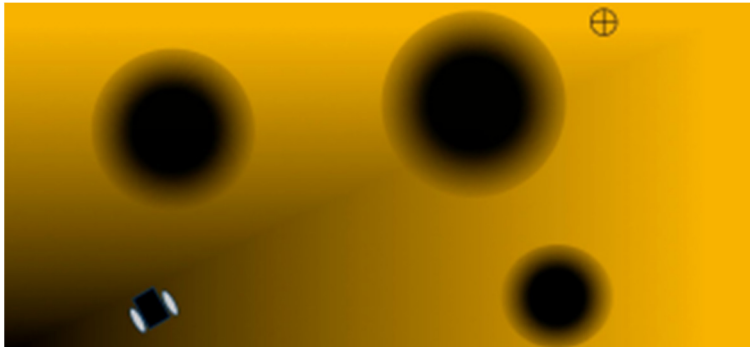


Рис. 4. Пример визуализации карты потенциальных полей

Робот перемещается в направлении градиента общего потенциального поля, что обеспечивает его движение к цели с избеганием препятствий.

Метод потенциальных полей относительно прост в понимании и реализации. Он не требует сложных математических моделей или больших вычислительных ресурсов. Такие потенциальные поля позволяют роботам быстро реагировать на изменения в окружающей среде. Если препятствие появляется внезапно, робот может мгновенно изменить направление движения для его обхода. Потенциальные поля позволяют роботам работать в динамических средах, где объекты могут перемещаться, поскольку поля находятся в постоянном обновлении.

Однако одним из основных недостатков метода является возможность застревания робота в локальных минимумах [8]. Если робот оказывается в такой точке, он может не иметь возможности двигаться к цели, поскольку силы отталкивания и притяжения могут компенсировать друг друга. Также в случаях сложной конфигурации пространства с множеством препятствий потенциальные поля могут создавать неравномерные или труднопредсказуемые траектории, что негативно сказывается на плавности движения. При этом следует учесть, что эффективность метода во многом зависит от правильно подобранных коэффициентов притяжения и отталкивания. Неправильные настройки могут привести к неверному поведению робота.

Метод клеточной декомпозиции

Метод клеточной декомпозиции заключается в разбиении пространства перемещения на сетку ячеек, каждая из которых может быть либо проходимой, либо непроходимой. Это существенно упрощает задачу планирования пути и дает возможность применять разнообразные алгоритмы поиска для нахождения оптимального маршрута. Основу метода составляет представление пространства в виде двумерной или трехмерной решетки, где каждая ячейка соответствует определенной области, а ее состояние определяется на основании информации о препятствиях и окружающей среде.

При реализации клеточной декомпозиции пространство перемещения делится на небольшие ячейки. Каждая из них имеет статус: проходимая она или нет. Проходимые ячейки позволяют роботу двигаться, а непроходимые представляют собой зоны, которые необходимо обойти.

Клеточная декомпозиция может быть статической и динамической. В статической декомпозиции информация о препятствиях фиксирована и не изменяется. Это позволяет заранее планировать пути, основываясь на известных данных. Динамическая декомпозиция, напротив, отслеживает изменения в окружающей среде, такие как, например, перемещение препятствий или изменение конфигурации областей, что критически важно для мобильных роботов, работающих в реальных условиях, где обстановка может меняться.

При использовании клеточной декомпозиции основная задача заключается в определении состояния ячеек, в формировании сетки занятости. Для этого используются различные сенсоры, такие как лазерные сканеры, камеры и ультразвуковые датчики. Эти устройства помогают собирать данные о пространстве вокруг робота. После сбора информации данные обрабатываются, что приводит к созданию карты, на которой отображается проходимость ячеек (рис. 5).

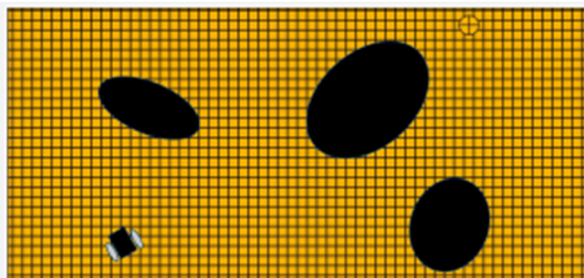


Рис. 5. Пример визуализации сетки занятости

Алгоритмы поиска пути, такие как A^* и алгоритм Дейкстры, используют для нахождения маршрута среди проходимых ячеек. Эти алгоритмы обеспечивают эффективный поиск оптимальных путей, минимизируя затраты на перемещение, например, по критериям расстояния или времени. Поскольку ячейки представляют собой дискретные объекты, поиск маршрута осуществляется быстрее и проще по сравнению с непрерывным пространством.

Метод клеточной декомпозиции имеет несколько ключевых преимуществ. Во-первых, он обеспечивает простое визуальное представление карты, что помогает операторам лучше понимать, как робот будет перемещаться в пространстве. Во-вторых, клеточная декомпозиция хорошо интегрируется с другими методами навигации и планирования, такими как обновление карты, адаптация к изменениям в окружении и оптимизация перемещения. Это позволяет роботу более эффективно реагировать на различные пространственные изменения, возникающие в процессе работы.

Однако метод не лишен недостатков. Одним из основных является необходимость тщательного выбора размера ячеек. Если ячейки слишком большие, это может привести к потере важных детализаций на карте, что затруднит поиск оптимального маршрута. С другой стороны, если ячейки слишком маленькие, это увеличивает размер графа, что ведет к большему времени вычисления маршрута [9].

Еще одним значительным ограничением является необходимость регулярного обновления информации о состоянии ячеек. Быстрые изменения в окружающей среде могут приводить к тому, что робот не сможет адекватно реагировать на новую информацию. Это в конечном итоге может повысить риск столкновений или привести к неоптимальным путям.

Метод клеточной декомпозиции является мощным инструментом для планирования пути роботов, однако его эффективное применение требует тщательного выбора параметров и постоянной адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды.

На рис. 6 приведено окно графического интерфейса в среде Matlab для процесса моделирования движения робота в соответствии с предложенным алгоритмом определения безопасного пути на основе матричных вычислений и сопоставления координат препятствий и координат робота [10].



Рис. 6. Графический интерфейс Matlab для процесса моделирования движения робота

Результат моделирования безопасного маршрута движения по участкам местности показан на рис. 7.

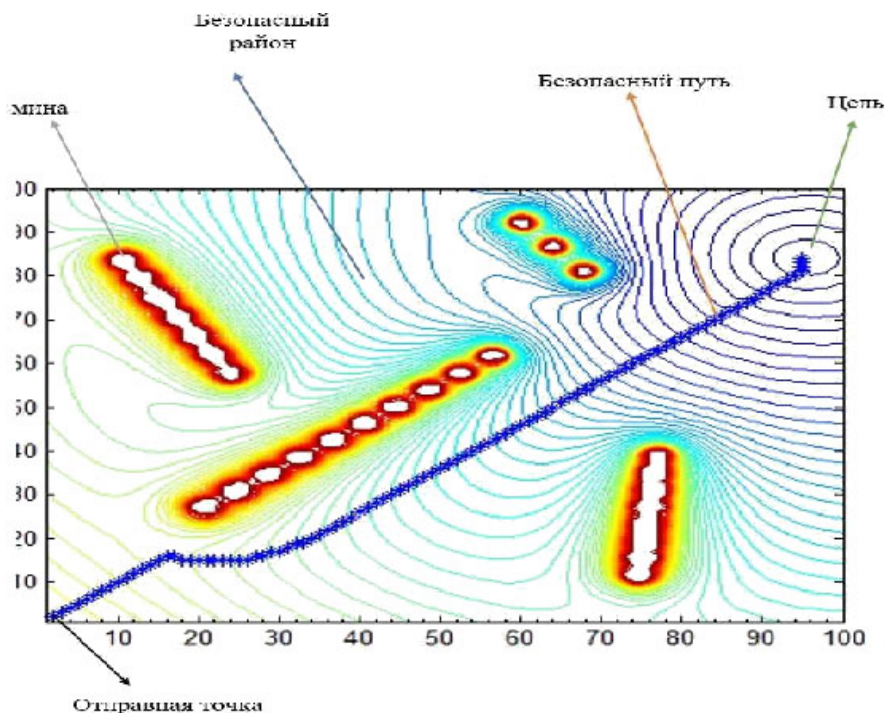


Рис. 7. Результат расчета траектории безопасного маршрута

Недостатком данного алгоритма с точки зрения применимости в условиях производственных помещений является необходимость предварительного ввода (в автоматическом или ручном режимах) координат препятствий.

Очень важным с точки зрения эффективности (в первую очередь, быстродействия и надежности) является распределение полномочий между ЦУ и СУМП (см. рис. 3). С точки зрения экономии ресурсов необходимо решение с централизованной системой управления типа клиент-сервер, однако данное решение имеет много минусов. Достаточно сложные задачи навигации требуют большой загрузки информационно-управляющего канала и передачи объемного потока видеоизображения. Если же речь идет о нескольких одновременно работающих мобильных платформах (далее – рой роботов), то на беспроводную сеть будет создаваться чрезмерная нагрузка, что может привести к перегрузке как сети, так и сервера. В этой связи представляется оптимальным «переложить» максимальное количество функций на сами мобильные платформы и разгрузить тем самым беспроводную сеть. В такой постановке задачи роль сервера сводится к выдаче задания, контролю его исполнения и решению возможных внештатных ситуаций, в которые могут попасть мобильные платформы.

При такой архитектуре неизбежно возрастет стоимость автономных мобильных платформ. Чтобы этого не произошло, на стадии проекта возможно заложить в конструкцию компоненты с минимальной стоимостью, однако более дешевые комплектующие (сенсоры, программируемые логические контроллеры (далее – ПЛК) и т.д.) не всегда могут обеспечить заданные алгоритмы управления, например, нечеткую логику.

Одним из возможных путей решения является использование более эффективных алгоритмов управления, которые на базе стандартных языков МЭК позволяют расширить технологические возможности недорогих ПЛК.

В качестве такого решения можно предложить, например, алгоритм релейного управления с искусственной зоной нечувствительности, который, по сути, является цифровым, но имеет три состояния – регулирование «вверх», регулирование «вниз» и промежуточную зону «без изменения». Данный алгоритм близок к нечеткой логике, но может быть реализован на любом стандартном логическом контроллере без использования операторов фазификации и дефазификации. В качестве примера приведены результаты работы схем, построенных на основе нечеткой логики с фазификацией по Гауссу (рис. 8) и обычной (рис. 9) логики.

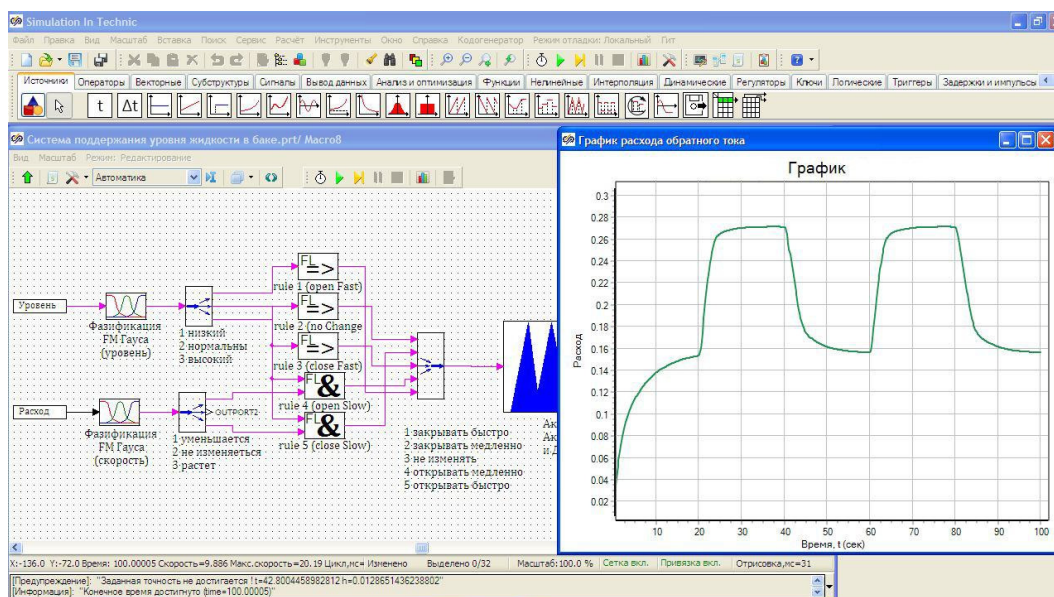


Рис. 8. Модель системы управления на основе нечеткой логики

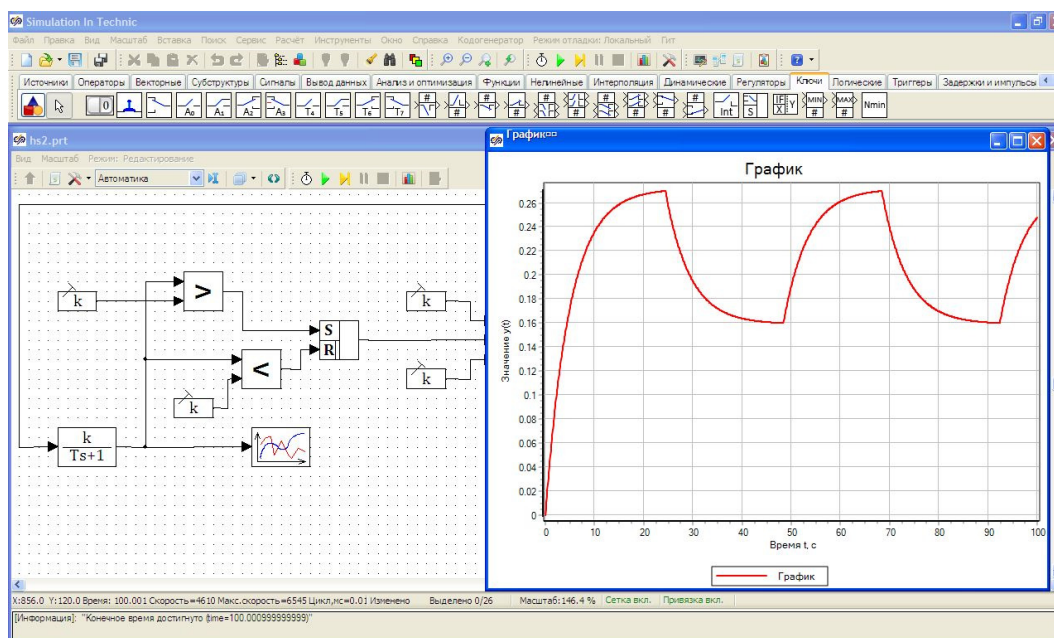


Рис. 9. Модель системы управления на основе обычной логики

С точки зрения объезда препятствий желательно, чтобы система отличала статическое препятствие от динамического. К последним следует отнести, в первую очередь, людей, которые могут оказаться на пути следования робота, т.е. транспортное средство должно обладать свойством коллаборативности.

Наиболее просто данная задача решается на основе интеллектуальной системы распознавания образов, однако имеет высокую стоимость.

Снижение стоимости может быть достигнуто на основе предлагаемого алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики (рис. 10).

Предлагается идентифицировать препятствие путем сравнения характеристик в трех зонах – дальней, средней и ближней. Исходными данными для анализа является двоичная информация – есть препятствие/нет препятствия.

На эту информацию накладываются дополнительные сведения о стабильности препятствия во времени [11]. Если характеристика препятствия постоянна во всех трех зонах, то эту помеху с высокой степенью вероятности можно считать статической, в противном случае – динамической помехой, что требует более строгих правил обхода.

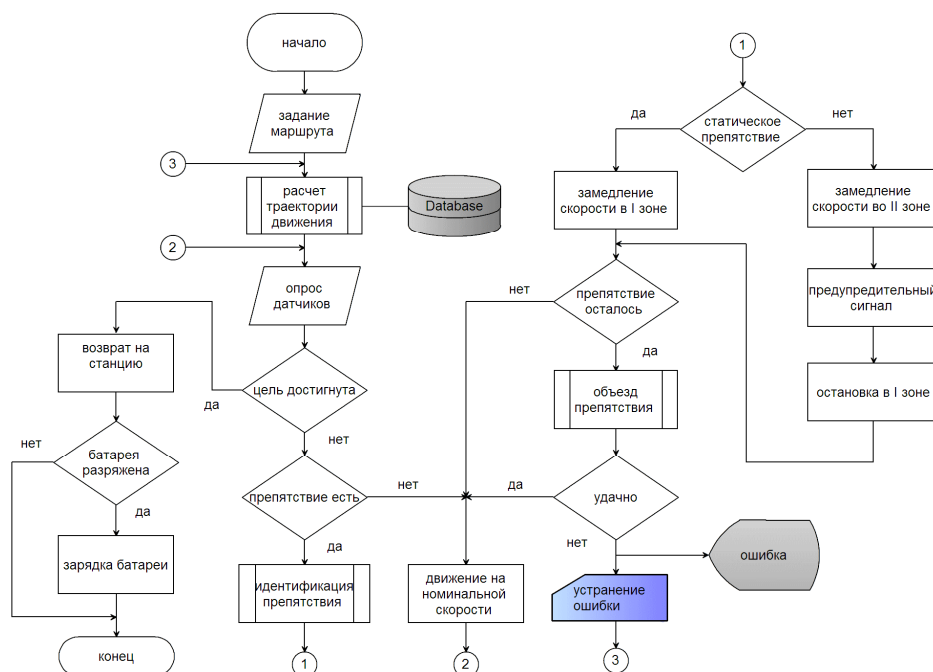


Рис. 10. Блок-схема алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики

Заключение

В целях повышения эффективности управления возможно применение алгоритма релейного управления с искусственной зоной нечувствительности, реализация которого возможна на стандартном логическом контроллере.

Решение задачи объезда препятствий может быть достигнуто применением алгоритма обхода препятствий в локальной среде на основе квазинечеткой логики.

Применение предложенных алгоритмов управления позволяет расширить технологические возможности стандартных программируемых контроллеров, снизить стоимость проекта на основе применения автономных мобильных роботов и отказаться от ряда дорогостоящего программного обеспечения.

Список литературы

1. Программный продукт «Цифровое производство». URL: <https://istokmw.ru/digital-production/>
2. Зикирбай К. Е., Алимбаева Ж. Н., Алимбаев Ч. А. [и др.] Система интеллектуального учета и управления коммунальными ресурсами на основе технологии LoRaWAN // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 6–19. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-1 EDN: FALUYD
3. Хаблов Д. В. Модель управления складским транспортным роботом с адаптивным планированием пути // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : тр. XVI Междунар. конф. (г. Москва, 26–28 сентября 2023 г.). М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2023. С. 1041–1046. doi: 10.25728/mlsd.2023.1041 EDN: BFCPSZ
4. Яковлева Е. А., Моторкин А. С., Капустин Д. Р. Выбор системы роботизированной автоматизации процессов на производстве // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. (г. Санкт-Петербург, 13–14 октября 2022 г.). СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. Ч. 3. С. 357–362. doi: 10.18720/SPBPU/2/id23-499 EDN: KTMNDJ
5. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5 EDN: TBKHZY
6. Бросалин Д. О., Гуренко Б. В., Медведев М. Ю. Интеграция локального и глобального планировщиков в систему управления мобильным роботом // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 6 (236). С. 8–24. doi: 10.18522/2311-3103-2023-6-8-24 EDN: WQWOYW
7. Мамедова Т. А. К., Алиева Н. Р. К. Планирование пути мобильного робота в динамических средах: обзор // Endless Light in Science. 2022. № 6-6. С. 156–165. EDN: NVMVDI
8. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Барашков А. А. Вопросы построения потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 65–70. doi: 10.15372/AUT20190407 EDN: WHYVDB
9. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15–58. doi: 10.24108/mathm.0118.0000098 EDN: YWFAYD

10. Кушнир А. П., Зейн Алдин А. Автономный роботизированный комплекс «Jad» // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сб. докл. Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. М. : РТУ МИРЭА, 2021. Т. 2. С. 76–81.
11. Холопов В., Кушнир А., Курнасов Е. [и др.]. Разработка цифровой системы мониторинга технологического процесса производства на основе индекса состояния оборудования // Конференция молодых ученых России по электротехнике и электронике IEEE 2017 (1–3 февраля 2017 г., Санкт-Петербург). СПб. : ЛЭТИ, 2017. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910692

References

1. *Programmnyy produkt «Tsifrovoye proizvodstvo» = The software product "Digital production"*. (In Russ.). Available at: <https://istokmw.ru/digital-production/>
2. Zikirbay K.E., Alimbaeva Zh.N., Alimbaev Ch.A. et al. A system of intelligent accounting and management of municipal resources based on LoRaWAN technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):6–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-1 EDN: FALUYD
3. Khablov D.V. A management model for a warehouse transport robot with adaptive path planning. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2023): tr. XVI Mezhdunar. konf. (g. Moskva, 26–28 sentyabrya 2023 g.) = Management of the development of large-scale systems (MLSD'2023) : proceedings of the XVI International Conference (Moscow, September 26-28, 2023)*. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2023:1041–1046. (In Russ.). doi: 10.25728/mlsd.2023.1041 EDN: BFCPSZ
4. Yakovleva E.A., Motorkin A.S., Kapustin D.R. Choosing a system for robotic process automation in production. *Sistemnyy analiz v proektirovani i upravlenii: sb. nauch. tr. XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 3 ch. (g. Sankt-Peterburg, 13–14 oktyabrya 2022 g.) = System analysis in design and management : collection of scientific papers XXVI International Scientific and Practical Conference : at 3 a.m. (St. Petersburg, October 13-14, 2022)*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2023;Pt.3:357–362. (In Russ.). doi: 10.18720/SPBPU/2/id23-499 EDN: KTMNDJ
5. Urvaev I.N. Navigation of a mobile robot based on laser rangefinder methods. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(1):44–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5 EDN: TBKHZY
6. Brosalin D.O., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu. Integration of local and global planners into the mobile robot control system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2023;(6): 8–24. (In Russ.). doi: 10.18522/2311-3103-2023-6-8-24 EDN: WQWOYW
7. Mamedova T.A.K., Alieva N.R.K. Planning the path of a mobile robot in dynamic environments: an overview. *Endless Light in Science*. 2022;(6-6):156–165. (In Russ.). EDN: NVMVDI
8. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Barashkov A.A. Questions of constructing potential fields in the tasks of local navigation of mobile robots. *Avtometriya = Autometry*. 2019;55(4):65–70. (In Russ.). doi: 10.15372/AUT20190407 EDN: WHYVDB
9. Lyu V. Methods of path planning in an environment with obstacles (review). *Matematika i matematicheskoe modelirovanie = Mathematics and mathematical modeling*. 2018;(1):15–58. (In Russ.). doi: 10.24108/mathm.0118.0000098 EDN: YWFAYD
10. Kushnir A.P., Zeyn Aldin A. Autonomous robotic complex "Jad". *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. Ros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Innovative technologies in electronics and instrument engineering : collection of dokl. Russian Scientific and Technical conference with the international*. Moscow: RTU MIREA, 2021;2:76–81. (In Russ.)
11. Kholopov V., Kushnir A., Kurnasov E. et al. Development of a digital system for monitoring the technological process of production based on the equipment condition index. *Konferentsiya molodykh uchenykh Rossii po elektrotekhnike i elektronike IEEE 2017 (1–3 fevralya 2017 g., Sankt-Peterburg) = Conference of Young Scientists of Russia on Electrical Engineering and Electronics IEEE 2017 (February 1-3, 2017, St. Petersburg)*. Saint Petersburg: LETI, 2017. (In Russ.). doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910692

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Романович Александров

директор по цифровой трансформации,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический
университет (филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: vr Aleksandrov@istokmw.ru

Vitaly R. Aleksandrov

Director of digital transformation,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Никита Владимирович Азарнов

инженер,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: nvazarnov@istokmw.ru

Nikita V. Azarnov

Engineer,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Алексей Алексеевич Щеткин

начальник отдела автоматизированных
систем управления,
Научно-производственное предприятие
«Исток» имени А. И. Шокина
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а);
преподаватель,
МИРЭА – Российский технологический
университет (филиал в г. Фрязино)
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: aaschetkin@istokmw.ru

Aleksey A. Shchetkin

Head of the department of automated control systems,
Research and Production Enterprise
"Istok" named after A.I. Shokin
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia);
lecturer,
MIREA – Russian Technological University
(Fryazino branch)
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Александр Петрович Кушнир

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной информатики,
Институт информационных технологий,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: 89169521579@ya.ru

Aleksandr P. Kushnir

Candidate of technical sciences, associate professor of
the sub-department of industrial informatics,
Institute of Information Technologies,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Роман Маркович Огорельцев

аспирант,
МИРЭА – Российский технологический
университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: roman-ogoreltcev@yandex.ru

Roman M. Ogoreltcev

Postgraduate student,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 21.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 18.04.2025

Принята к публикации/Accepted 28.04.2025