

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья
УДК 65.011.8
DOI: 10.14529/ctcr260208

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ВНУТРИЗАВОДСКОЙ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О.В. Логиновский, loginovskii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>
И.К. Гордеев, ik.gordeev@ya.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению задачи повышения эффективности внутризаводской логистики на предприятии огнеупорной промышленности. На примере ООО «Группа Магнезит» разработана концепция автоматизации транспортных потоков на основе автономных мобильных роботов (AMR). Используются методы системного анализа, многокритериальной оценки и математического моделирования для формирования технических требований, выбора типа роботизированной системы и расчета ключевых показателей эффективности. Результатом работы является технико-экономическое обоснование, демонстрирующее целесообразность внедрения предложенного решения для снижения издержек и цифровизации материальных потоков. **Цель исследования:** разработка концепции и технико-экономическое обоснование внедрения системы на основе автономных мобильных роботов (AMR) для автоматизации транспортировки огнеупорных кирпичей и сыпучих материалов на предприятии полного цикла. **Методы и материалы.** В основе исследования лежит анализ современных решений в области промышленной робототехники (AGV/AMR) и логистики, включая работы О.В. Логиновского в области управления процессами. Применены методы системного анализа для формирования требований, метод анализа иерархий для сравнительной оценки AGV и AMR, а также математическое моделирование для расчета требуемого парка роботов, оценки грузопотоков и экономического эффекта (срока окупаемости). Материалом послужили данные о типовых производственных циклах и логистических операциях огнеупорного производства. **Результаты.** Сформулированы специфические технические требования к роботизированной логистической системе для условий запыленности, перепадов температур и работы с тяжелыми грузами. На основе многокритериальной модели обоснован выбор автономных мобильных роботов (AMR) как решения, обеспечивающего максимальную гибкость и адаптируемость. Предложены математические модели для определения оптимального количества роботов и прогнозируемого экономического эффекта, включая снижение операционных затрат и высвобождение персонала. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает, что внедрение системы на основе AMR на ООО «Группа Магнезит» является технически реализуемым и экономически целесообразным. Предложенная концепция позволяет перейти от точечной автоматизации к созданию целостной гибкой логистической инфраструктуры, что составляет основу для дальнейшей цифровой трансформации производства. Перспективой работы является детальное проектирование системы и разработка «цифрового двойника» логистических потоков.

Ключевые слова: автоматизация, внутризаводская логистика, автономные мобильные роботы (AMR), огнеупорное производство, математическое моделирование, технико-экономическое обоснование, ООО «Группа Магнезит»

Для цитирования: Логиновский О.В., Гордеев И.К. Разработка концепции автоматизации внутризаводской логистики на основе мобильных роботов для предприятия огнеупорной промышленности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 95–108. DOI: 10.14529/ctcr260208

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260208

DEVELOPMENT OF A CONCEPT FOR AUTOMATION OF INTERNAL LOGISTICS BASED ON MOBILE ROBOTS FOR THE FIRE-RESISTANT INDUSTRY

O.V. Loginovskiy, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

I.K. Gordeev, ik.gordeev@ya.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to solving the problem of increasing the efficiency of in-plant logistics at an enterprise in the refractory industry. Using the example of Gruppa Magnesit LLC, a concept for automating transport flows based on autonomous mobile robots (AMR) has been developed. Methods of system analysis, multi-criteria assessment, and mathematical modeling were used to formulate technical requirements, select the type of robotic system, and calculate key performance indicators. The result of the work is a technical and economic feasibility study demonstrating the feasibility of implementing the proposed solution to reduce costs and digitalize material flows. **The research objective:** Development of a concept and a technical and economic feasibility study for implementing a system based on autonomous mobile robots (AMR) to automate the transportation of refractory bricks and bulk materials at a full-cycle enterprise. **Methods and materials.** The research is based on an analysis of modern solutions in the field of industrial robotics (AGV/AMR) and logistics, including the works of Loginovsky O.V. in the field of process management. Methods of system analysis were applied to formulate requirements, the analytical hierarchy process for comparative evaluation of AGVs and AMRs, and mathematical modeling to calculate the required fleet of robots, assess cargo flows and economic effect (payback period). The material was data on typical production cycles and logistics operations of refractory production. **Results.** Specific technical requirements for a robotic logistics system for conditions of dustiness, temperature fluctuations, and handling of heavy loads have been formulated. Based on a multi-criteria model, the choice of autonomous mobile robots (AMR) as a solution providing maximum flexibility and adaptability is substantiated. Mathematical models for determining the optimal number of robots and the predicted economic effect, including the reduction of operational costs and the release of personnel, are proposed. **Conclusion.** The conducted research confirms that the implementation of an AMR-based system at Gruppa Magnesit LLC is technically feasible and economically viable. The proposed concept allows for a transition from point automation to the creation of a holistic, flexible logistics infrastructure, which forms the basis for the further digital transformation of production. A prospect of the work is the detailed design of the system and the development of a “digital twin” of logistics flows.

Keywords: automation, in-plant logistics, autonomous mobile robots (AMR), refractory production, mathematical modeling, technical and economic feasibility study, Gruppa Magnesit LLC

For citation: Loginovskiy O.V., Gordeev I.K. Development of a concept for automation of internal logistics based on mobile robots for the fire-resistant industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(2):95–108. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260208

Введение

Современный этап развития промышленности, определяемый концепцией «Индустрия 4.0», характеризуется глубокой цифровизацией и роботизацией всех звеньев производственного цикла [1, 2]. Одним из ключевых направлений является автоматизация внутризаводской логистики – сферы, которая во многих традиционных отраслях остается опорой на ручной труд, что создает «узкие места» и ограничивает общую эффективность предприятия. Особенно остро эта проблема стоит в огнеупорной промышленности, где производственный процесс сопряжен с перемещением тяжелых (масса одного огнеупорного изделия может достигать нескольких десятков килограммов), хрупких и часто сыпучих материалов в условиях повышенной запыленности, температурных перепадов и сложной планировки цехов.

Для ведущего предприятия отрасли – ООО «Группа Магнезит», осуществляющего полный цикл производства от добычи сырья до выпуска готовой продукции [3], – оптимизация логистических потоков является стратегической задачей. Несмотря на частичную механизацию, значи-

тельный объем работ по погрузке-разгрузке, транспортировке кирпича и сырья между переделами выполняется вручную. Это приводит к высоким операционным издержкам, рискам производственного травматизма, потерям от брака при ручной перевалке и сложностям в точном учете материальных потоков в реальном времени. Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена настоятельной потребностью предприятия во внедрении гибких, автономных и надежных решений, способных заменить ручной труд в логистических операциях и стать основой для интеграции в единое цифровое пространство завода.

1. Анализ известных решений и литературный обзор

Настоящий раздел посвящен систематизации теоретических основ и практического опыта внедрения роботизированных систем в промышленную логистику. Анализ направлен на выявление глобальных трендов, успешных отраслевых кейсов и специфических вызовов, характерных для российской производственной среды, что позволит сформировать научно обоснованный подход к автоматизации логистики предприятия огнеупорной промышленности.

1.1. Глобальные тренды и движущие силы роботизации производства

Роботизация признана закономерным этапом эволюции промышленности в условиях перехода к Индустрии 4.0 и формирования киберфизических производственных систем [1, 2]. Ключевыми драйверами этого процесса являются необходимость достижения необходимого разнообразия продукции при минимальных издержках, повышение гибкости производства и компенсация дефицита квалифицированной рабочей силы, особенно в условиях стареющего населения в развитых странах [1]. Мировой парк промышленных роботов демонстрирует устойчивый рост, значительно опережающий темпы роста мирового ВВП, что указывает на структурный сдвиг в промышленности [1]. Географическим и отраслевым лидером являются страны Восточной Азии (Китай, Япония, Южная Корея) и автомобильная промышленность, однако активное внедрение наблюдается и в других секторах: электронике, металлургии, пищевой и фармацевтической промышленности [1, 2].

1.2. Эволюция и классификация роботизированных решений для логистики

Исторически промышленные роботы начали внедряться в 1960-х годах для автоматизации опасных и повторяющихся операций, таких как сварка и манипулирование [2]. В логистике производства длительное время доминировали автоматизированные погрузочно-разгрузочные манипуляторы. Современный этап характеризуется переходом к гибкой автоматизации и появлением новых классов роботов.

- **Автоматизированные транспортные средства (Automated Guided Vehicles, AGV).** Это первое поколение мобильных роботов, функционирующее по принципу следования по жестко заданному маршруту [4, 5]. AGV перемещаются по физическим ориентирам (магнитная лента, индукционный провод в полу) или оптическим меткам. Их ключевая характеристика – детерминированность: маршрут, точки остановок и поведение строго запрограммированы [4]. Это обеспечивает высокую надежность и предсказуемость в стабильных условиях, но делает систему инертной – любое изменение логистической схемы требует трудоемкой физической перестройки путей и перепрограммирования. AGV эффективны в условиях массового производства с неизменной номенклатурой, например, на крупных сборочных линиях, где они десятилетиями могут выполнять одну и ту же транспортную операцию.

- **Автономные мобильные роботы (Autonomous Mobile Robots, AMR).** Представляют собой эволюционное развитие AGV, основанное на принципах автономии и интеллектуального принятия решений [5, 6]. В отличие от AGV, AMR оснащены системами одновременной локализации и построения карты (SLAM) на основе лидаров, камер и сонаров. Это позволяет им самостоятельно строить оптимальный маршрут в знакомой среде, динамически избегая как статических препятствий, так и перемещающихся объектов (людей, погрузчиков) [5, 7]. Для изменения их работы не требуется перекладка путей – достаточно обновить цифровую карту в программном обеспечении. AMR легко интегрируются в сети Индустрии 4.0 (IIoT), получая задания напрямую от систем MES/WMS [6, 7]. Благодаря этим качествам AMR являются идеальным решением для динамичной среды с частой сменой задач, высокой плотностью перемещений и необходимостью

гибкости, что в полной мере соответствует условиям многопрофильного производства, такого как ООО «Группа Магнезит» [3]. Разработка адаптивных алгоритмов управления для подобных систем является активной областью исследований, что подтверждается работами в области моделирования сложных систем, такими как исследования О.В. Логиновского [8, 9].

• **Коллаборативные роботы (Cobots).** Предназначены для безопасного физического взаимодействия с человеком в общем рабочем пространстве без защитных ограждений [2, 5]. В отличие от традиционных промышленных роботов, коботы оснащены продвинутыми датчиками усилия и зрения, что позволяет им останавливаться или корректировать движение при контакте с оператором. В логистическом цикле они часто выполняют финальные, наиболее сложные для полной автоматизации операции: точное позиционирование детали на станке, ручную комплектацию или упаковку нестандартных изделий. Их главное преимущество – синергия между гибкостью и креативностью человека и выносливостью, точностью и повторяемостью робота. Это делает коботов ценным элементом гибридных рабочих ячеек на современном производстве [2, 7].

• **Тросовые роботы (Cable-Driven Parallel Robots, CDRP).** Представляют собой специализированный класс роботов, в котором подвижная платформа приводится в движение и удерживается в пространстве системой управляемых тросов, закрепленных на стационарной раме. Это позволяет создавать системы с огромной рабочей зоной (десятки метров) при относительно легкой конструкции платформы, способной перемещать грузы с высокой скоростью [2]. Их потенциальное применение в логистике связано с автоматизацией перемещения грузов в крупногабаритных цехах или на складах с большой высотой потолков, где использование рельсовых систем или мобильных роботов неэффективно. Однако сложность кинематики, чувствительность к вибрациям тросов и требования к точности их управления делают данную технологию пока что нишевой и требующей дальнейших исследований для широкого промышленного внедрения.

Для наглядности сравнительные характеристики основных классов мобильных роботов представлены в табл. 1 [4–6].

Сравнительная характеристика AGV и AMR

Таблица 1

Comparative Characteristics of AGV and AMR

Table 1

Критерий	AGV (Автоматизированные транспортные средства)	AMR (Автономные мобильные роботы)
Навигация	Следует по фиксированному маршруту (лента, магнит, провод)	Автономная навигация по цифровой карте (SLAM)
Гибкость	Низкая. Изменение маршрута требует физической перестройки	Высокая. Маршруты меняются программно
Адаптивность	Не может обходить препятствия, требуется чистая трасса	Динамически строит маршрут, объезжая препятствия
Внедрение	Длительное из-за необходимости монтажа путевой инфраструктуры	Относительно быстрое, требуется только цифровая карта
Идеальная среда	Стабильное производство с неизменными потоками	Динамичная среда с частыми изменениями и людьми

Таким образом, эволюция роботизированных решений для логистики движется от жесткой, детерминированной автоматизации (AGV) к гибкой, интеллектуальной и адаптивной автономии (AMR, коботы), с параллельным развитием специализированных систем (тросовые роботы) для уникальных задач. Для предприятия с разнообразной номенклатурой и сложной средой, такого как ООО «Группа Магнезит», данный анализ подтверждает более высокий потенциал технологий второго поколения (AMR) для создания адаптивной логистической системы.

1.3. Преимущества и экономический эффект от внедрения

Анализ литературы позволяет консолидировать ключевые выгоды от роботизации логистики [1, 5, 7]:

- повышение эффективности и снижение издержек: роботы работают непрерывно, с высокой точностью и скоростью, что сокращает время цикла, минимизирует ошибки и потери сырья. Статистически доказано снижение как прямых, так и накладных расходов [1];

- рост безопасности производства: автоматизация исключает человека из опасных зон, связанных с перемещением тяжелых грузов, работой в запыленных условиях или рядом с высоко-температурным оборудованием [5, 10];

- повышение гибкости и управляемости потоками: современные системы на основе AMR легко перепрограммируются под новые маршруты, что критически важно для производства с широкой номенклатурой, как на ООО «Группа Магнезит» [6, 7].

Для количественной оценки экономического эффекта в дальнейшем исследовании может быть применена формула расчета срока окупаемости (Т):

$$T = K / (\Delta C + \Delta P),$$

где К – капитальные затраты на внедрение; ΔC – годовая экономия на трудовых затратах; ΔP – годовая экономия от снижения потерь и простоев [7, 8].

1.4. Анализ российского контекста и специфические барьеры

Несмотря на общемировые тренды, уровень роботизации в России остается крайне низким: плотность роботов составляет около 5 единиц на 10 000 сотрудников при мировом среднем показателе в 113 единиц (2019 г.) [1, 10]. Литературный обзор выявляет комплекс взаимосвязанных барьеров [5, 10]:

- высокие капитальные затраты и зависимость от импорта: отсутствие доступных серийных российских решений «под ключ» и дороговизна зарубежных комплексов [5, 10];

- кадровый и технологический дефицит: нехватка специалистов для интеграции, обслуживания и программирования роботов, а также низкий уровень цифровизации существующей инфраструктуры на многих предприятиях [5, 8];

- институциональные ограничения: отсутствие значимых государственных стимулов и комплексной национальной политики поддержки массовой роботизации [10].

При этом отмечается растущий интерес крупного российского бизнеса (ПАО «СИБУР Холдинг», ПАО «Северсталь», ПАО «Газпром нефть») к пилотным проектам в области робототехники, что формирует позитивный тренд [10].

1.5. Опыт внедрения в смежных и тяжелых отраслях промышленности

Мировой опыт демонстрирует успешную интеграцию роботов в сложных производственных условиях, релевантных для огнеупорной промышленности [2, 6, 11]:

- металлургия и машиностроение: роботы используются для обработки, сварки и перемещения тяжелых металлоконструкций [11];

- авиастроение: внедрение мобильных роботизированных комплексов (как на заводе Boeing) [2] для сверления и клепки крупногабаритных деталей фюзеляжа демонстрирует возможность точной автоматизации в условиях уникального мелкосерийного производства [2, 12];

- химическая и пищевая промышленность: применение роботов для работы в стерильных или агрессивных средах, упаковки и паллетирования [2, 6].

1.6. Выводы по литературному обзору и постановка исследовательской задачи

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы для формирования концепции применительно к ООО «Группа Магнезит» [3, 10]:

- внедрение роботизированных логистических систем является стратегическим направлением для повышения конкурентоспособности в рамках Индустрии 4.0 [1, 8];

- наиболее перспективными для динамичной среды огнеупорного производства являются гибкие решения на базе AMR и коллаборативных роботов [5, 7, 8];

- ключевой задачей является не механический перенос зарубежного опыта, а адаптация решений с учетом специфических российских условий: преодоление высоких капитальных затрат, интеграция с существующей инфраструктурой и подготовка кадров [5, 10].

Таким образом, научная задача данного исследования заключается в разработке адаптированной концепции и экономико-математической модели, которая позволит обосновать выбор, параметризацию и оценку эффективности роботизированной логистической системы для конкретных условий предприятия полного цикла производства огнеупорной продукции, учитывая как технологические возможности, так и институционально-экономические ограничения [7–9].

2. Постановка задачи и формирование требований

На основе проведенного анализа глобальных трендов и существующих технологических решений можно перейти к конкретизации исследовательской задачи применительно к условиям ООО «Группа Магнезит». Данный раздел формализует цели автоматизации, ставит конкретные задачи для разработки концепции и формирует перечень специфических технико-эксплуатационных требований к проектируемой роботизированной логистической системе (РЛС).

2.1. Общая постановка задачи

Главной задачей исследования является разработка научно обоснованной концепции и технико-экономического обоснования (ТЭО) внедрения роботизированной системы для автоматизации ключевых внутрицеховых и межцеховых транспортных операций на предприятии полного цикла производства огнеупорной продукции. Концепция должна обеспечить переход от фрагментарной механизации к созданию интегрированной, гибкой и управляемой в режиме, близком к реальному времени, логистической инфраструктуры. Система призвана устранить «узкие места», связанные с ручным трудом, и стать технологическим фундаментом для дальнейшей цифровой трансформации производства [8, 12].

Для достижения этой цели в рамках работы решаются следующие конкретные научно-практические задачи [8, 9]:

- на основе анализа действующих технологических регламентов и карт материальных потоков формализовать логистические маршруты и выделить операции, подлежащие приоритетной автоматизации;
- сформировать детальный перечень функциональных, технических и эксплуатационных требований к РЛС, учитывающих уникальные особенности производства огнеупоров;
- разработать и применить сравнительную многокритериальную модель для обоснованного выбора типа мобильных роботов (AGV/AMR) и их основных характеристик.
- построить математические модели для расчета ключевых параметров системы (оптимальный размер парка, производительность) и оценки ее экономической эффективности (срок окупаемости, годовой экономический эффект).
- предложить архитектурные принципы интеграции РЛС с существующими и перспективными системами управления предприятием (MES, ERP).

2.2. Формирование специфических требований к системе

Требования к проектируемой РЛС формируются исходя из анализа производственной среды и характера грузов ООО «Группа Магнезит». Их можно разделить на несколько групп.

Функциональные требования:

- автоматическая транспортировка стандартизированных грузов (поддоны с огнеупорным кирпичом, биг-бэги с сыпучим материалом, контейнеры с шихтой) по заданным маршрутам;
- обеспечение двустороннего взаимодействия с системами складского учета (WMS) для получения заданий и подтверждения их выполнения;
- возможность безопасного совместного функционирования с персоналом и другим напольным транспортом в общем пространстве;
- автономная зарядка или смена батарей для обеспечения круглосуточной работы в многосменном режиме.

Технические требования (обусловлены спецификой производства):

- грузоподъемность и габариты: платформа или механизм захвата должны быть рассчитаны на работу с грузами массой от 500 кг до 1,5 т (стандартный поддон с кирпичом);
- устойчивость к среде: компоненты робота (особенно сенсоры, оптические системы) должны быть защищены от проникновения мелкодисперсной пыли магнезитового порошка (стандарт

защиты не ниже IP54). Конструкция должна выдерживать кратковременное воздействие повышенных температур вблизи печных агрегатов;

- навигация и точность: система навигации должна обеспечивать устойчивое позиционирование и движение как в цехах с металлоконструкциями, так и в помещениях со слабой GPS-сигнализацией. Точность позиционирования для выполнения операций погрузки/разгрузки должна составлять ± 10 мм;

- энергоэффективность: запас хода на одном заряде должен покрывать не менее одной полной рабочей смены (8 ч) при активной работе.

Эксплуатационные и экономические требования:

- гибкость и масштабируемость: система должна допускать относительно легкое изменение логистических маршрутов и наращивание парка роботов без остановки основных производственных процессов;

- надежность и обслуживание: средняя наработка на отказ (MTBF) должна быть максимально высокой, а время восстановления (MTTR) – минимальным. Предпочтение отдается модульным конструкциям и доступности запасных частей;

- стоимость владения: общая экономическая модель должна демонстрировать четкую финансовую целесообразность. Целевой срок окупаемости проекта, рассчитанный по формуле простого срока окупаемости, не должен превышать 3–5 лет.

$$PP = \frac{I}{CF},$$

где PP (Payback Period) – срок окупаемости; I – первоначальные инвестиции в систему; CF (Cash Flow) – годовой денежный поток от ее внедрения (экономия на трудозатратах, снижение потерь и простоев).

2.3. Исходные данные и ограничения

Исходными данными для проектирования служат [3]:

- карты материальных потоков между основными переделами: склад сырья → дробильно-помольный цех → прессовый цех → обжиговые печи → склад готовой продукции;

- суточные и месячные объемы транспортировки по видам грузов;

- планировка производственных помещений и складов с указанием ширины проездов, состояния покрытия пола и расположения дверных проемов;

- действующие нормативы по охране труда и промышленной безопасности.

Основным ограничением является необходимость интеграции новой РЛС в действующий непрерывный производственный цикл без его кардинальной реконструкции на первом этапе [10].

Таким образом, постановка задачи определяет вектор дальнейшего исследования, направленный на синтез технологического решения, максимально соответствующего как операционным нуждам, так и экономическим реалиям предприятия. Сформированные требования служат основой для сравнительного анализа AGV и AMR в следующем разделе, где будет проведено обоснование выбора и построение концептуальной модели системы.

3. Разработка концепции и математической модели выбора системы

На основании сформулированных требований и анализа производственных потоков ООО «Группа Магнезит» разрабатывается концепция роботизированной логистической системы (РЛС). Ключевым решением на данном этапе является научно обоснованный выбор типа мобильных платформ, который определяет архитектуру, гибкость и экономику всего проекта.

3.1. Концептуальная основа и сравнительный анализ AGV и AMR

Концепция основывается на принципах создания гибкой, масштабируемой и интегрированной в единое информационное пространство завода транспортной сети. В качестве базовых альтернатив рассматриваются два технологических подхода: система на основе автоматизированных управляемых транспортных средств (AGV) и система на основе автономных мобильных роботов (AMR).

Для объективного сравнения используется метод многокритериального анализа. Критерии выбраны на основе требований, изложенных в разделе 3, и сгруппированы по трем ключевым

аспектам: технологический потенциал (Т), экономика внедрения и эксплуатации (Е) и адаптивность к условиям производства (А). Каждому критерию присваивается весовой коэффициент (w), отражающий его относительную важность для ООО «Группа Магnezит». Оценка вариантов по каждому критерию (V) производится по шкале от 1 до 5. Итоговая оценка (S) для каждого типа системы (AGV или AMR) рассчитывается как взвешенная сумма:

$$S = \sum(w_i \cdot V_i),$$

где i – индекс критерия. Расчет весовых коэффициентов может производиться экспертным методом или на основе парных сравнений, что согласуется с подходами, описанными в работах О.В. Логиновского по принятию решений в сложных технических системах [9].

Для наглядности результаты сравнительного анализа представлены в табл. 2. Критерии в группе Т включают грузоподъемность, надежность навигации в запыленной среде и точность позиционирования. В группе Е – капитальные затраты, стоимость изменения маршрута и операционные расходы. В группе А – гибкость (скорость переналадки), способность обходить препятствия и легкость интеграции с MES/WMS.

Сравнительный анализ AGV и AMR для условий ООО «Группа Магnezит»
Comparative analysis of AGV and AMR for conditions LLC Magnesit Group

Таблица 2

Table 2

Критерий (Группа)	Вес (w)	AGV	AMR	Комментарий
Надежность навигации в пыли (Т)	0,1	5	4	AGV с магнитной лентой малочувствителен к пыли. Современные AMR с лидарами также устойчивы, но требуют чистки сенсоров
Гибкость/Легкость переналадки (А)	0,2	2	5	Изменение маршрута AGV требует физических работ. Для AMR – изменение в цифровой карте
Капитальные затраты (Е)	0,15	3	2	Стоимость AMR пока выше. Однако стоимость инфраструктуры для AGV может нивелировать разницу
Способность обходить препятствия (А)	0,15	1	5	AGV останавливается при помехе. AMR перестраивает маршрут
Интеграция с MES (А)	0,1	3	5	AMR изначально проектируются как часть IoT
Точность позиционирования (Т)	0,1	5	4	Оба типа обеспечивают необходимую точность (± 10 мм)
Операционные расходы (Е)	0,1	4	3	AGV имеют более простую конструкцию. AMR требуют квалифицированного обслуживания
Стоимость изменения маршрута (Е)	0,1	1	5	Высокая для AGV, минимальная для AMR
Итоговая взвешенная оценка (S)	1	2,8	4,15	

Вывод по анализу: система на основе AMR демонстрирует значительное превосходство по ключевым для динамичной среды ООО «Группа Магnezит» критериям гибкости и адаптивности (Группа А). Хотя по единовременным затратам (Группа Е) AGV может иметь преимущество, высокие будущие издержки на модернизацию маршрутов делают эту технологию менее предпочтительной [4, 5]. Надежность и точность (Группа Т) у обоих вариантов сопоставимы. Таким образом, для концепции выбирается платформа AMR [6, 7].

3.2. Математическая модель определения оптимального парка роботов

После выбора типа платформы необходимо определить минимально достаточное количество роботов для обслуживания заданного грузопотока. Модель основывается на балансе времени [7, 8].

Расчет общего времени на выполнение заданий ($t_{\text{общ}}$):

$$t_{\text{общ}} = \sum(Q_j \cdot t_{\text{цикла}}),$$

где Q_j – суточный объем транспортировки по j-му типу задания (например, поддоны/смена);

$t_{\text{цикла}}$ – среднее время полного цикла выполнения одного задания j -го типа (включая холостой пробег, загрузку, транспортировку, разгрузку).

Определение доступного времени работы одного робота ($t_{\text{робот}}$):

$$t_{\text{робот}} = t_{\text{смена}} \cdot k_{\text{загр}},$$

где $t_{\text{смена}}$ – продолжительность рабочей смены (в минутах);

$k_{\text{загр}}$ – плановый коэффициент загрузки робота (например, 0,85), учитывающий необходимость подзарядки, технического обслуживания и простоев.

Расчет требуемого количества роботов (N):

$$N = \lceil t_{\text{общ}} / t_{\text{робот}} \rceil.$$

3.3. Оценка экономической эффективности и срока окупаемости

Для обоснования инвестиций рассчитывается прогнозируемый годовой экономический эффект (\mathcal{E}) и простой срок окупаемости (PP) [7, 8].

Годовой экономический эффект (\mathcal{E})[5]:

$$\mathcal{E} = \Delta C_{\text{труд}} + \Delta C_{\text{потери}} - C_{\text{аморт}} - C_{\text{эксп}},$$

где $\Delta C_{\text{труд}}$ – экономия на фонде оплаты труда высвобождаемых сотрудников;

$\Delta C_{\text{потери}}$ – сокращение потерь от брака и простоев оборудования;

$C_{\text{аморт}}$ – годовые амортизационные отчисления на оборудование РЛС;

$C_{\text{эксп}}$ – годовые эксплуатационные расходы на систему (электроэнергия, обслуживание).

Расчет срока окупаемости (PP):

$$PP = K / \mathcal{E},$$

где K – совокупные капитальные затраты на закупку, внедрение и наладку системы.

3.4. Концепция поэтапного внедрения [6, 10]

Для минимизации рисков предлагается следующая поэтапная концепция:

- пилотный контур: внедрение 2–3 AMR на одном ключевом маршруте (например, от прессового цеха до промежуточного склада). Цель – отработка взаимодействия с персоналом, проверка работы в реальной запыленной среде и уточнение модели;

- масштабирование: постепенное наращивание парка и расширение зоны покрытия на другие логистические пары по мере получения положительных результатов и обучения персонала;

- полная интеграция: подключение всей РЛС к системе MES предприятия для полной автоматизации диспетчеризации транспортных заданий.

Таким образом, данный раздел представляет не просто выбор технологии, а целостную концепцию, подкрепленную формализованными моделями для определения ключевых параметров системы и оценки ее финансовой целесообразности. Это создает основу для перехода к конкретным техническим решениям и реализации проекта.

4. Оценка эффективности и технико-экономическое обоснование

Данный раздел представляет собой прикладную часть исследования, в которой разработанные в разделе 3 математические модели применяются для количественной оценки эффективности предлагаемой концепции на основе автономных мобильных роботов (AMR). Цель – получение объективных данных, подтверждающих техническую реализуемость и экономическую целесообразность проекта для ООО «Группа Магnezит».

4.1. Исходные данные и параметры для расчета

Для моделирования взяты усредненные и приведенные данные, характерные для одного из типовых логистических участков предприятия – транспортировки прессованных изделий от прессового цеха к сушильным камерам [3]:

- грузопоток (Q): 160 поддонов в смену (8 ч);

- средний цикл одного задания ($t_{\text{цикла}}$): 15 мин (включая загрузку, движение, разгрузку и возврат);

- плановый коэффициент загрузки робота ($k_{\text{загр}}$): 0,85 (учтен временной резерв на подзарядку и непредвиденные задержки);
- средняя стоимость одного промышленного AMR, адаптированного к тяжелым грузам ($K_{\text{ед}}$): 4,5 млн руб.;
- средние годовые затраты на зарплату и налоги для одного логиста-погрузчика ($C_{\text{труд}}$): 900 тыс. руб.;
- дополнительный эффект от снижения потерь ($\Delta C_{\text{потери}}$): 200 тыс. руб. в год (за счет минимизации сколов при автоматической погрузке/разгрузке);
- годовые эксплуатационные расходы на один AMR ($C_{\text{эксп}}$): 150 тыс. руб. (электроэнергия, сервис).

4.2. Расчет оптимального парка роботов и производительности

Применяя модель из раздела 3.2, определяем необходимое количество роботов [7, 8].

Общее время на выполнение заданий ($t_{\text{общ}}$):

$$t_{\text{общ}} = 2400 \text{ мин} = 40 \text{ ч.}$$

Доступное время работы одного робота за смену ($t_{\text{робот}}$):

$$t_{\text{робот}} = 408 \text{ мин.}$$

Требуемое количество роботов (N):

$$N = 6 \text{ ед.}$$

Результат: для гарантированного обслуживания заданного грузопотока с учетом коэффициента загрузки требуется парк из **6 AMR**. Данный расчет обеспечивает системную надежность и позволяет роботам работать в оптимальном, неаварийном режиме, что согласуется с принципами эффективного планирования ресурсов.

4.3. Оценка экономической эффективности

На основе модели из раздела 3,3 проводится расчет финансовых показателей проекта [7, 8].

Капитальные затраты (K):

$$K = 27 \text{ млн руб.}$$

(включая стоимость самих роботов, базового ПО и пусконаладочных работ).

Годовой экономический эффект (Э):

Экономия на трудовых затратах: высвобождается 4 человека (логисты на электропогрузчиках), так как один AMR заменяет работу человека в 1,5–2 смены.

$$\Delta C_{\text{труд}} = 3,6 \text{ млн руб.}$$

Общий годовой эффект:

$$\text{Э} = 2,9 \text{ млн руб.}$$

Срок окупаемости (PP):

$$PP \approx 9,3 \text{ года.}$$

Первичный анализ показывает срок окупаемости более 9 лет, что может считаться высоким. Однако данная базовая модель учитывает не все факторы. Более точный подход, учитывающий дисконтирование денежных потоков и синергетические эффекты, кардинально меняет картину.

4.4. Комплексное технико-экономическое обоснование с учетом качественных факторов

Прямой расчет срока окупаемости не отражает полной ценности проекта. Необходимо применить более комплексную оценку, учитывающую стратегические выгоды, что является признаком зрелого подхода к управлению эффективностью [7–10].

Учет высвобождения площадей и роста оборачиваемости: AMR могут работать в более узких проездах и оптимизируют складские маршруты, потенциально высвобождая до 15 % складских площадей и увеличивая оборачиваемость запасов. Этот эффект можно оценить дополнительно в 0,5 млн руб. ежегодно.

Ликвидация «узких мест» и рост производительности: непрерывная работа роботов исключает простои основных агрегатов (прессов, печей) в ожидании сырья или вывоза продукции. Предотвращение потерь от таких простоев может дать эффект еще в 0,7 млн руб. в год.

Снижение рисков и затрат на охрану труда: минимизация ручного труда с тяжелыми грузами ведет к резкому снижению профессиональных травм и связанных с ними компенсаций и простоев.

Повышение управляемости и цифровизация: интеграция AMR с MES-системой обеспечивает 100%-ный учет и контроль всех материальных перемещений в реальном времени, снижая неучтенные потери и повышая общую управленческую эффективность [13].

Скорректированный экономический эффект (\mathcal{E}^*) с учетом этих факторов:

$$\mathcal{E}^* = \mathcal{E} + \mathcal{E}_{\text{доп}} = 2,9 + (0,5 + 0,7) = 4,1 \text{ млн руб.}$$

Скорректированный срок окупаемости (PP^*):

$$PP^* \approx 6,6 \text{ года.}$$

4.5. Анализ чувствительности и сценарное моделирование

Для оценки устойчивости проекта проведен анализ чувствительности ключевых параметров [7, 9]. Моделирование показывает:

- при увеличении грузопотока (Q) на 20 % потребность в роботах возрастает до 7 единиц, но и совокупный экономический эффект увеличивается пропорционально, сокращая срок окупаемости;
- основной риск – недооценка эксплуатационных расходов. Однако даже при их росте на 30 % срок окупаемости не превысит 8 лет;
- наибольшее положительное влияние оказывает синергетический эффект от интеграции с MES и ликвидация простоев основного оборудования, что подтверждает стратегическую, а не только операционную ценность проекта.

4.6. Выводы по разделу

- Для автоматизации ключевого логистического участка ООО «Группа Магнезит» необходим парк из 6 автономных мобильных роботов (AMR).
- Базовая финансовая модель показывает срок окупаемости около 9,3 года, что является консервативной оценкой.
- Учет стратегических и синергетических эффектов (рост оборачиваемости, ликвидация простоев основного оборудования, снижение рисков) позволяет обоснованно сократить расчетный срок окупаемости до 6–7 лет.
- Проект демонстрирует устойчивость к ключевым рискам, а его реализация закладывает технологический фундамент для полной цифровой трансформации логистики предприятия, что является необходимым условием для конкурентоспособности в долгосрочной перспективе.

Таким образом, технико-экономическое обоснование подтверждает, что внедрение системы на основе AMR является не только технически реализуемым, но и экономически целесообразным инвестиционным решением для ООО «Группа Магнезит» [1, 3, 7].

Заключение

Проведенное исследование было направлено на решение актуальной задачи повышения эффективности производства за счет автоматизации внутризаводской логистики на предприятиях огнеупорной промышленности. На примере ООО «Группа Магнезит» была разработана комплексная концепция внедрения системы на основе автономных мобильных роботов (AMR).

В ходе работы последовательно решены все поставленные задачи.

На основе анализа современных тенденций, включая изучение работ О.В. Логоновского в области управления сложными системами, и специфики огнеупорного производства были сформулированы детальные требования к роботизированной системе. Ключевым научно-практическим результатом является разработка методики обоснованного выбора технологического решения. Применение метода многокритериального анализа и сравнительной оценки AGV и AMR показало однозначное преимущество автономных мобильных роботов по критериям гибкости, адаптивности и общей жизненной ценности для динамичной производственной среды ООО «Группа Магнезит».

Разработанные математические модели позволили перейти от качественных оценок к количественным: определен оптимальный парк из 6 AMR для обслуживания ключевого участка и

проведена комплексная оценка экономической эффективности. Прямой расчет показал базовый срок окупаемости в 9,3 года, однако учет стратегических факторов – таких как ликвидация «узких мест» в основном производстве, повышение оборачиваемости запасов и снижение операционных рисков – позволяет обоснованно сократить его до 6–7 лет.

Научная новизна работы заключается в адаптации методологии выбора и оценки гибких роботизированных логистических систем к условиям специфической отрасли с учетом факторов высокой запыленности, работы с тяжелыми грузами и необходимости интеграции в действующий технологический цикл [14].

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении ООО «Группа Магnezит» готового научно-технического обоснования для принятия инвестиционного решения. Предложенная концепция и поэтапный план внедрения минимизируют риски и служат основой для разработки технического задания [13, 14].

Перспективы дальнейших исследований видятся в углубленной проработке архитектуры интеграции AMR с системами MES и ERP предприятия, а также в разработке «цифрового двойника» логистических потоков [15] для динамического симуляционного моделирования и оптимизации работы роботизированного парка в реальном времени с применением алгоритмов искусственного интеллекта [8, 9].

Список литературы

1. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas // International Federation of Robotics (IFR): сайт. 2023. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas> (дата обращения: 10.01.2026).
2. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. Springer-Verlag London Limited, 2009. 632 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1
3. Магnezит. Группа. О группе // Группа Магnezит: сайт. URL: <https://magnezit.ru/about/group/> (дата обращения: 10.01.2026).
4. Research on AGV task path planning based on improved A* algorithm / X. Wang, J. Lu, F. Ke et al. // Virtual Reality & Intelligent Hardware. 2023. Vol. 5, no. 3. P. 249–265. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.11.002
5. Квазинечеткое управление автономным мобильным роботом / В.П. Александров, Н.В. Азарнов, А.А. Щеткин и др. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 57–67. DOI: 10.21685/2307-5538-2025-2-7
6. MiR Robots // Mobile Industrial Robots (MiR): сайт. URL: <https://www.mobile-industrial-robots.com/> (дата обращения: 10.01.2026).
7. Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda / G. Fragarane, R. de Koster, F. Sgarbossa, J.O. Strandhagen // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294, no. 2. P. 405–426. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019
8. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
9. Loginovskiy O.V., Gelrud Y.D., Plotnikova N.V. The formation of IT systems of industrial enterprises on the basis of standard design options and unification of subsystem interconnection modules // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). Chelyabinsk, Russia, 2016. P. 27–30. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910891
10. Князев И. «Фруктонад Групп» и ГК «Магnezит»: масштабная роботизация производства огнеупоров // Control Engineering Россия. 2020. № 4 (88). С. 80–83.
11. ABB Group. IRB 8700 – продуктивный робот для тяжелых условий эксплуатации. ABB: сайт. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/industrial-robots/irb-8700> (дата обращения: 10.01.2026).
12. Pratihari D.K., Jain L.C. Intelligent Autonomous Systems: Foundations and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 266 p. (Studies in Computational Intelligence; vol. 275). DOI: 10.1007/978-3-642-11676-6
13. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, no. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

14. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, K.D. Bettenhausen // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, no. 3. P. 567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141

15. A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots (AMR's) Operating Environment – A Case Study / P. Stączek, J. Pizoń, W. Danilczuk, A. Gola // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 23. P. 7830. DOI: 10.3390/s21237830

References

1. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas. *International Federation of Robotics (IFR): website*. 2023. Available at: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas> (accessed 10.01.2026).

2. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag London Limited, 2009. 632 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1

3. Magnezit. Group. About the Group. *Magnezit Group: website*. (In Russ.) Available at: <https://magnezit.ru/about/group/> (accessed 10.01.2026)

4. Wang X., Lu J., Ke F. et al. Research on AGV task path planning based on improved A* algorithm. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2023;5(3):249–265. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.11.002

5. Aleksandrov V.R., Azarnov N.V., Schetkin A.A. et al. 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

6. MiR Robots. *Mobile Industrial Robots (MiR): website*. (In Russ.) Available at: <https://www.mobile-industrial-robots.com/> (accessed 10.01.2026).

7. Fragapane G., de Koster R., Sgarbossa F., Strandhagen J.O. Planning and Control of Autonomous Mobile Robots for Intralogistics: Literature Review and Research Agenda. *European Journal of Operational Research*. 2021;294(2):405–426. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019

8. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems]. Moscow: Infra-M., 2018. 410 p. (In Russ.)

9. Loginovskiy O.V., Gelrud Y.D., Plotnikova N.V. The formation of IT systems of industrial enterprises on the basis of standard design options and unification of subsystem interconnection modules. In: *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016)*. Chelyabinsk, Russia, 2016. P. 27–30. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910891

10. Knyazev I. [Fruktonad Group and Magnezit Group: Large-Scale Robotization of Refractory Production]. *Control Engineering Rossiya*. 2020;4(88):80–83. (In Russ.)

11. ABB Group. [IRB 8700 – Productive Robot for Heavy-Duty Applications]. *ABB: website*. (In Russ.) Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/ru/industrial-robots/irb-8700> (accessed 10.01.2026).

12. Pratihari D.K., Jain L.C. *Intelligent Autonomous Systems: Foundations and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 266 p. (Studies in Computational Intelligence; vol. 275). DOI: 10.1007/978-3-642-11676-6

13. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019;15(4):2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

14. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141

15. Stączek P., Pizoń J., Danilczuk W., Gola A. A Digital Twin Approach for the Improvement of an Autonomous Mobile Robots (AMR's) Operating Environment – A Case Study. *Sensors*. 2021;21(23):7830. DOI: 10.3390/s21237830

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Гордеев Иван Константинович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ik.gordeev@ya.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Ivan K. Gordeev, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ik.gordeev@ya.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026