

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://resources.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/11INOR226.pdf>

DOI: 10.15862/11INOR226 (<https://doi.org/10.15862/11INOR226>)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гаургов, С. С. Дискретно-событийная модель системы доставки деталей транспортными роботами / С. С. Гаургов, А. В. Пономарев, Н. В. Гладков, А. М. Гинцяк // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://resources.today/PDF/11INOR226.pdf>. DOI: 10.15862/11INOR226.

For citation:

Gaurgov S.S., Ponomarev A.V., Gladkov N.V., Gintciak A.M. A discrete-event model of a parts delivery system using transport robots. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(2): 11INOR226. Available at: <https://resources.today/PDF/11INOR226.pdf>. DOI: 10.15862/11INOR226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 004.94:621.865

Гаургов Сергей Сергеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sergeygaurgov@gmail.com

Пономарев Александр Витальевич

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sasha-ponom@mail.ru

Гладков Никита Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nikitpgladkov@gmail.com

Гинцяк Алексей Михайлович¹

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг»
Заведующий лабораторией «Цифровое моделирование промышленных систем»
Кандидат технических наук
E-mail: gintsyak_am@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=977523
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203897426>

Дискретно-событийная модель системы доставки деталей транспортными роботами

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения гибкости логистических процессов в условиях неопределенности современного высокотехнологичного производства. В статье предложено решение актуальной научно-практической проблемы, связанной с автоматизацией и повышением точности доставки деталей в цехах с использованием транспортных роботов. Авторами представлен комплексный подход, преодолевающий дефицит методологических решений по интеграции аналитических моделей с алгоритмами оперативного маневрирования транспортными средствами.

¹ https://www.spbstu.ru/university/about-the-university/personalities/232612_gintsyak_aleksey_mikhaylovich/

В среде передового имитационного моделирования AnyLogic спроектирована пространственная планировка производственного участка на одиннадцать рабочих мест с сетью путей для роботов. Отдельное внимание уделено ключевым техническим и эксплуатационным параметрам (скорость, ускорение, время погрузки и параметры энергопотребления). Также предложены две целевые функции для многокритериальной оптимизации работы системы, направленные на минимизацию временных штрафов за нарушение графика и снижение общего энергопотребления парка автоматизированных транспортных средств. На основе серии проведенных численных экспериментов методом дискретно-событийного анализа выявлены критические закономерности влияния размера парка роботов и темпа работы линии на итоговый коэффициент загрузки оборудования. Сформулированы конкретные практические рекомендации по конфигурированию транспортной системы для различных режимов производительности сборочной линии. В заключении подчеркнуто, что предложенный имитационный подход обеспечивает принятие выверенных инфраструктурных решений и эффективную реконфигурацию сборочных систем без реальных физических затрат и финансовых расходов на натурные испытания.

Ключевые слова: цех; детали; доставка; робот; маршрут; точность; модель

Введение

В условиях современной высококонкурентной и неопределенной производственной среды гибкость и маневренность являются двумя ключевыми факторами, которыми должны обладать производственные системы для оптимальной работы и адаптации к техническим сбоям с минимальным участием человека [1]. В данном контексте эффективность производства и рациональность распределения ресурсов в сборочных цехах являются ключевыми факторами, определяющими сроки поставки продукции и стандарты качества. В связи с растущей сложностью конструкций, тенденцией к увеличению размеров компонентов и растущим спросом на индивидуализацию, традиционные модели управления цехами не способны удовлетворить требования производства к высокой эффективности, точности и гибкости [2]. Следовательно, для систематической оптимизации процесса сборки и доставки деталей необходим новый подход, интегрирующий интеллектуальную логистику, принципы бережливого производства и моделирование на системном уровне.

Зачастую основу таких прогрессивных подходов составляют модели дискретно-событийного моделирования (DES) реконфигурируемых автоматических сборочных систем, состоящих из роботизированных станций и системы подачи материалов на основе автономных транспортных роботов (AGV) [3]. Целью разработки такой модели является содействие планированию компоновки и оценке реконфигурируемых сборочных систем [4].

Эти модули разрабатываются с использованием программного обеспечения AnyLogic, который представляется универсальным и мощным инструментом для моделирования, способным работать с различными подходами, включая дискретно-событийное моделирование, системную динамику и агент-ориентированное моделирование [5]. Данное программное обеспечение предоставляет интегрированную среду геоинформационных систем для описания атрибутов различных объектов (агентов) в рамках имитационной модели [6].

Таким образом, создание гибких производственных систем с транспортировкой материалов на основе AGV, которые способны обеспечивать точность соблюдения графика движения, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решению которой и посвящена данная статья.

Исследования в области интеграции AGV с современными системами планирования производства для преодоления неэффективности и жесткости, присущих традиционным

методам ручной транспортировки, представлены работами Скворцовой Д., Феединой А., Кульбацкой В., Ермакова Д., En Ren, Jing Hu, Ziyang Mei, Joseph George Beton, Tristan Cragnolini.

Особенности использования имитационного моделирования для анализа и оптимизации сложных систем цепочек поставок, описывают в своих трудах Козлов А. Ю., Сидоров А. И., Ермаков А. В., Сучкова Л. И., Louison Duboz, Konstantinos Mattas, Luca Bonamini, Enrico Silani.

Над решением ключевых проблем, связанных с эффективностью управления парком AGV, которая в значительной степени зависит от выбора механизмов отправки и маршрутизации, а также от общей интеграции графиков AGV и машин, трудятся Литиков Д. А., Матлахов В. П., Рябов А. В., Филипас А. А., Luis A. Moncayo-Martínez, Naihui He.

Наличие широкого спектра публикаций по данной тематике, позволяет говорить о ее активном развитии. Наличие значительного объема теоретических наработок, тем не менее, не снимает остроты проблемы неопределенности в функционировании AGV. Речь идет прежде всего о таких факторах, как отказы оборудования или нелинейная вариативность операционных циклов; именно их неадекватный учет зачастую выступает барьером, препятствующим прецизионному прогнозированию динамики систем доставки [7]. Более того, если рассматривать производственную среду как пространство с жестко ограниченными ресурсами, обнаруживается дефицит методологических решений по интеграции аналитических моделей с алгоритмами оперативного маневрирования.

В данной связи приоритетной задачей исследования выступает проектирование дискретно-событийной модели, описывающей логистические циклы транспортерных роботов.

Методы

Методологическую основу исследования составляет дискретно-событийное имитационное моделирование логистических циклов цеха сборки, реализованное в программной среде AnyLogic. В спроектированной модели воссоздана пространственная планировка производственного участка на 11 рабочих мест с замкнутой сетью путей, по которой перемещаются от 1 до 3 транспортерных роботов (AGV) с жестко заданными техническими характеристиками (максимальная скорость 1,2 м/с, ускорение 0,3 м/с², работа от аккумулятора до 3 ч). Программная логика доставки деталей формализована через параллельные маршруты обработки заявок с использованием блоков управления флотом роботов (fleetAGV, controlAGV), математического расчета времени транспортного цикла и индикаторных функций наполненности буферов сборочных станций. Для оптимизации процессов предложена двухкритериальная математическая модель, нацеленная на минимизацию временных штрафов за отклонение от графика и снижение совокупного энергопотребления парка транспортных средств в зависимости от их массы и текущей загрузки. Верификация полученных результатов и оценка итогового коэффициента загрузки оборудования осуществлены на основе серии численных экспериментов (по 30 итераций для 8-часовой смены) при варьировании объема парка AGV и темпа производства от 6 до 30 кузовов/ч.

Результаты и обсуждение

Реализация процесса имитации грузопотоков, обеспечиваемых автономными модулями, в настоящей работе демонстрируется на кейсе формирования маршрутов в контуре сборочной линии автомобильного производства. Технологическим базисом выступает среда AnyLogic. Выбор данного ПО обусловлен спецификой метода DES, потенциал которого в контексте оптимизации и верификации производственных процессов позволяет не просто описывать систему, но и находить точки роста её эффективности в условиях неопределенности [8]. Эта

модель будет учитывать стратегии планирования маршрутов AGV и управления производством, обеспечивая необходимую информационную поддержку для доработки как планировки, так и технологической конфигурации цеха сборки [9].

На рисунке 1 автором показана пространственная планировка производственного цеха, включающая сетку расположения оборудования и спроектированную сеть путей для движения автоматизированных транспортных средств.

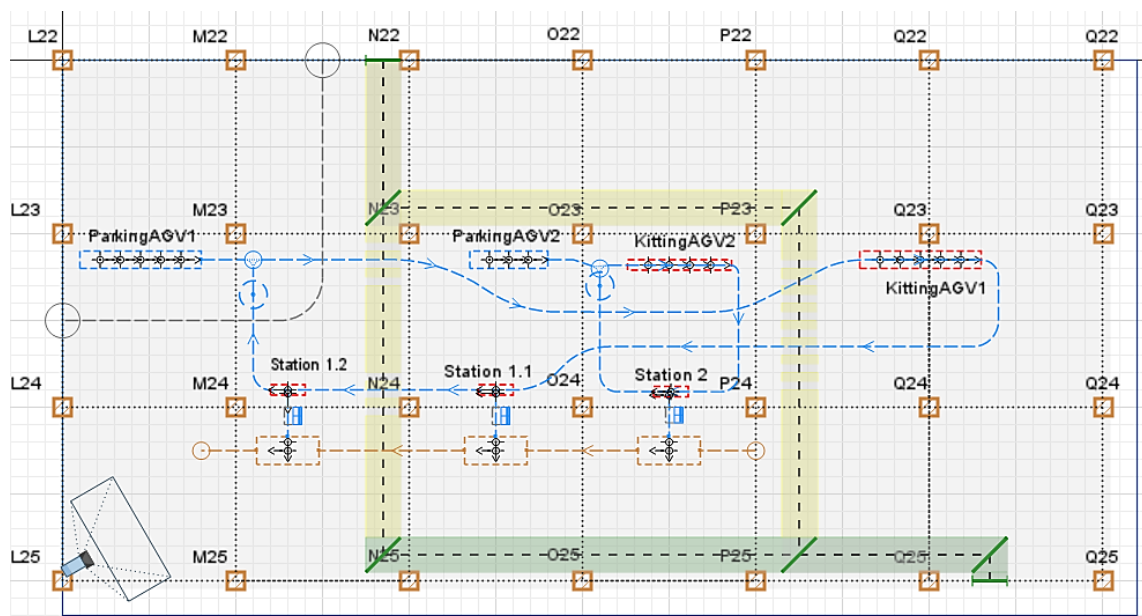


Рисунок 1. Топологическая схема производственного участка и транспортной сети (составлено автором)

Как мы видим из рисунка 1, логистическая среда четко разделена на функциональные зоны: места парковки роботов (ParkingAGV), станции комплектования (KittingAGV) и сборочные посты (Station), соединенные между собой замкнутыми маршрутами перемещения для обеспечения непрерывности потока деталей.

Таблица 1

Технические и эксплуатационные параметры имитационной модели (

Объект модели	Параметр	Значение/диапазон	Ед. изм.
Транспортерный робот (AGV)	Максимальная рабочая скорость	1,2	м/с
	Ускорение/замедление	0,3	м/с ²
	Время погрузки/разгрузки	45	сек
	Количество роботов в системе	1–3	ед.
	Время работы от аккумулятора	До 3	ч
	Безопасная дистанция	0,5	м
Сборочные станции (Station)	Общее количество рабочих мест	11	ед.
	Время технологической операции	20–35 (ср. 28)	мин
	Вместимость входного буфера	1–2	ед.
Зоны комплектования (KittingAGV)	Время комплектования заказа	120–180	сек
	Количество постов параллельной сборки	2	ед.
Среда (Layout)	Шаг сетки	1	м
	Общая длина замкнутого маршрута	140–160	м

Составлено автором

Для обеспечения точности результатов имитации в модели были определены несколько ключевых параметров, кратко изложенных в таблице 1. Цех включает 11 рабочих мест, охватывающих основные этапы от хранения деталей и поэтапной сборки до окончательной

комплектации. Время обработки каждой операции сборки составляет от 20 до 35 минут, в среднем около 28 минут. AGV выступают в качестве основного средства транспортировки материалов, их количество установлено в диапазоне от одной до трех единиц. Максимальная рабочая скорость каждого AGV составляет 1,2 м/с, а ускорение и замедление установлены на уровне 0,3 м/с². Время погрузки и разгрузки на один AGV составляет 45 с. С учетом ограничений по энергоснабжению каждый AGV оснащен аккумулятором, обеспечивающим непрерывную работу в течение до 3 ч. Когда уровень заряда аккумулятора опускается ниже заданного порога, система автоматически запускает протокол возврата на зарядку.

Перечисленные в таблице 1 параметры определяют физические и временные ограничения системы, которые составляют основу алгоритмов управления потоками агентов. Эти значения интегрируются в логические блоки имитационной модели для расчета длительности дискретных состояний и интервалов между событиями.

На рисунке 2 представлена программная реализация дискретно-событийной логики процесса доставки, описывающая последовательность событий, начиная от возникновения потребности в детали и заканчивая её транспортировкой непосредственно к производственной линии. Модель на рис. 2 включает в себя два параллельных маршрута обработки заявок, где задействованы блоки управления парком роботов (fleetAGV) и конфигураторы их движения (controlAGV) [10], что позволяет имитировать захват транспортного ресурса, перемещение и последующую разгрузку деталей.

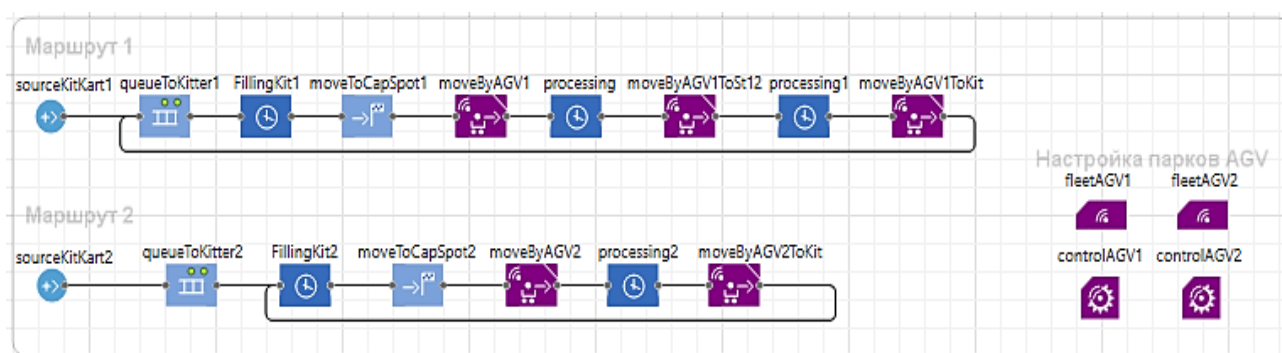


Рисунок 2. Логическая схема алгоритмов доставки и управления группой роботов (составлено автором)

Математическая формализация времени перемещения робота на дистанцию L учитывает заданные в модели параметры — максимальную скорость $V_{max} = 1,2$ м/с и ускорение $a = 0,3$ м/с²:

$$T_{move} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{L}{a}}, L < \frac{V_{max}^2}{a} \\ \frac{V_{max}}{a} + \frac{L}{V_{max}}, L \geq \frac{V_{max}^2}{a} \end{cases}. \quad (1)$$

Полное время транспортного цикла с учетом фиксированной задержки на погрузочно-разгрузочные работы ($T_{load} = 45$ с) определяется как $T_{cycle} = T_{move} + 2 \times T_{load}$.

На рисунке 3 представлена имитационная схема сборочной линии, которая является конечным потребителем системы доставки деталей, функционирующей на основе роботов-транспортеров.

Представленная на рисунке 3 логика сборки базируется на последовательной интеграции блоков assembler, где осуществляется прецизионное сопряжение базового кузова с агрегатами.

Включение в контур модели функционала хранения (store) и извлечения (retrieve) дает возможность не просто обозначить наличие буферных зон, но и верифицировать временные лаги в ожидании поставок с высокой степенью детализации [11].

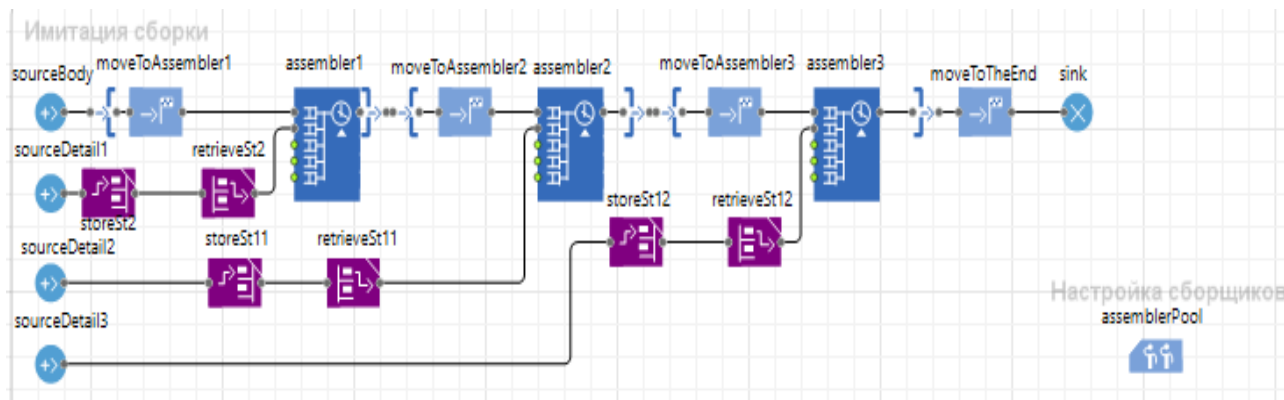


Рисунок 3. Структура имитационной модели процесса сборки изделий (составлено автором)

Процедура формализации в узле assembler опирается на использование индикаторной функции состояния $S_{ass}(t)$ [12]. Данная функция детерминирует старт сборочной операции при достижении пороговых условий наполненности буферов:

$$S_{ass} = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_{body}(t) \geq 1 \text{ и } Q_{det}(t) \geq 1 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (2)$$

В рамках приведенного выражения переменная $Q_{body}(t)$ отражает текущий объем агентов в очереди хранения, в то время как параметр Q_{det} соотносится с очередью извлечения; их совокупный анализ позволяет зафиксировать момент готовности системы к циклу. Валидация полученных данных и поиск экстремумов в параметрах функционирования AGV-системы детерминируют необходимость использования системы ключевых индикаторов (KPI) [13].

В качестве фундаментальных метрик здесь выступают не только количественные показатели доработанных изделий, но и — что является критическим предиктором эффективности — коэффициент загрузки рабочих мощностей, что находит свое отражение в структуре предлагаемой математической модели [14]. Последняя декомпозируется на две целевые функции.

Предлагаемая математическая модель состоит из двух целевых функций, описанных следующим образом:

$$Min(f) = \{f_1, f_2\}. \quad (3)$$

Целевая функция 1: направлена на минимизацию общих затрат, связанных с опережением и задержкой выполнения запланированных работ, и сформулирована она следующим образом:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{|T|} a \max\{0, d_i - C_i\} + \sum_{i=1}^{|T|} \beta \max\{0, C_i - d_i\}. \quad (4)$$

В этой формуле коэффициент β (штраф за задержку) имеет критическое значение для автомобильной промышленности, так как опоздание одной детали может привести к остановке всей линии, поэтому он обычно значительно выше коэффициента опережения a . Фактическое время завершения заказа (C_i) напрямую зависит от времени его выпуска в систему и суммарного времени обработки на выбранных станциях [15].

Целевая функция 2: представляет собой минимизацию общего энергопотребления, связанного с загрузкой AGV и совокупным расстоянием перемещения, и формулируется следующим образом:

$$f_2 = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_{AGV}} dis_{ij} X_{ijnt} F(Q_{n_0} + Q_{ijnt}). \quad (5)$$

В формуле $F(Q_{n_0} + Q_{ijnt})$ — показатель энергопотребления, зависящий от массы AGV и расстояния перемещения. Переменная X_{ijnt} учитывает разницу в энергопотреблении между порожним роботом (Q_{n_0}) и роботом, нагруженным деталями для конкретной работы (Q_{ijnt}). Дистанция dis_{ij} соответствует физической сетке путей, представленной на рисунке 1.

Итоговая эффективность использования оборудования, выраженная через коэффициент (K_{util}) для системы, состоящей из 11 рабочих мест, определяется усреднением результатов 30 итераций при длительности смены T_{sim} (8 часов):

$$K_{util} = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} \left(\frac{\sum_{i=1}^{11} \int_0^{T_{sim}} S_{ass,i}(t) dt}{11 \cdot T_{sim}} \right)_k. \quad (6)$$

В данном выражении индекс i обозначает конкретную рабочую станцию, тогда как переменная k фиксирует номер итерации, выполняемой в процессе моделирования.

Практическая применимость предложенного подхода оценивалась серией численных экспериментов. В них варьировались два ключевых фактора: темп производства, задаваемый диапазоном величин JpH (от 6 до 30 кузовов в час с шагом 5), и размер парка AGV ($N_{AGV} = 1, 2, 3$). Результаты расчета коэффициента загрузки (рис. 4) демонстрируют следующую динамику: при использовании только одного AGV удается поддерживать коэффициент в диапазоне 88–91 %, однако при ограничении $JpH \leq 15$ дальнейшее наращивание темпа производства приводит к превращению транспортной системы в «узкое место». В подобных условиях AGV не успевают завершить цикл доставки (порядка 128 с) до поступления очередного запроса, что провоцирует снижение K_{util} до 67 % при $JpH = 30$. В свою очередь, конфигурация с двумя AGV обеспечивает устойчивый уровень загрузки (85–90 %) вплоть до $JpH = 25$, тогда как при $N_{AGV} = 3$ деградация показателей практически отсутствует во всем исследованном диапазоне. Конфигурация $N_{AGV} = 2$ обеспечивает устойчивый уровень загрузки 85–90 % вплоть до $JpH = 25$, а при $N_{AGV} = 3$ деградация практически отсутствует во всём диапазоне.

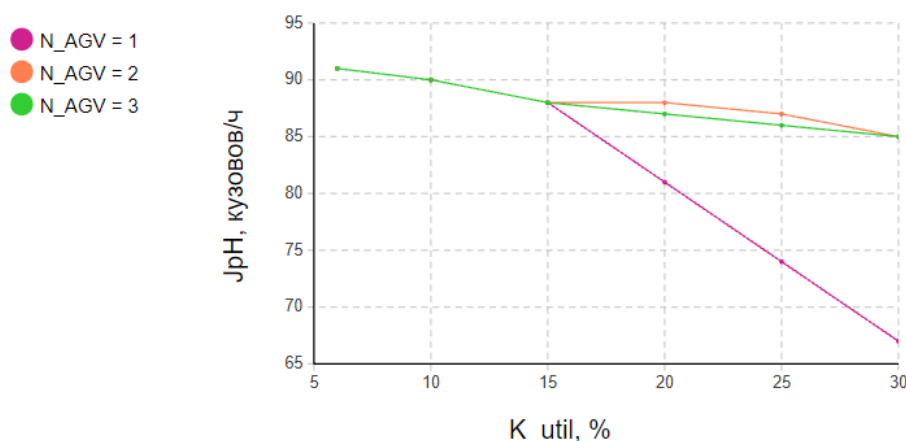


Рисунок 4. Зависимость K_{util} от JpH при различных конфигурациях парка AGV (составлено автором)

Динамика штрафной функции f_1 , характеризующей суммарные временные потери вследствие нарушения графика (рис. 5), демонстрирует качественно аналогичную картину. При $N_{AGV} = 1$ штраф остаётся нулевым до $JpH = 15$, после чего резко возрастает — при $JpH = 30$ он достигает 42,5 усл. ед., что обусловлено накоплением необслуженных заявок. Парк из двух AGV сдерживает рост f_1 до значений, не превышающих 5 усл. ед. при $JpH \leq 25$. Конфигурация $N_{AGV} = 3$ обеспечивает $f_1 = 0$ во всём исследуемом диапазоне.

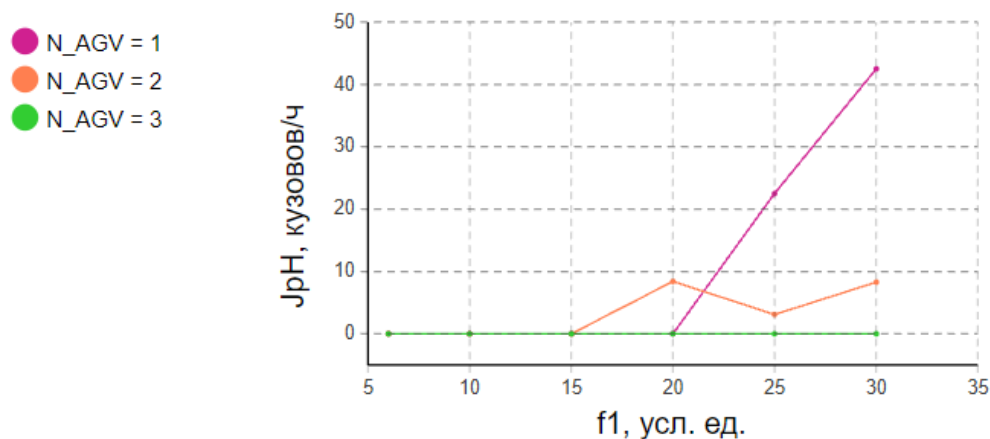


Рисунок 5. Штрафная функция f_1 в зависимости от JpH и N_{AGV} (составлено автором)

Оценка энергетической целевой функции f_2 при фиксированном $JpH = 20$ (рис. 6) показала, что суммарное энергопотребление флота слабо зависит от числа транспортеров: значения составили 35,0; 35,3 и 35,8 усл. ед. для $N_{AGV} = 1, 2, 3$ соответственно.

Незначительный прирост при добавлении единиц обусловлен увеличением холостого пробега на перепозиционирование.

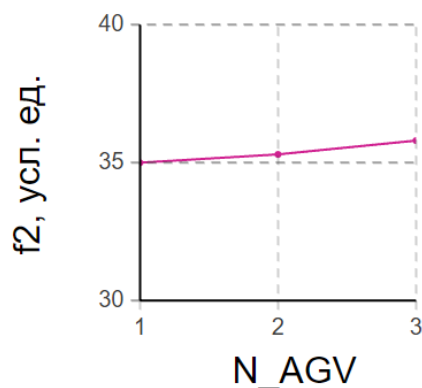


Рисунок 6. Энергопотребление f_2 при $JpH = 20$ в зависимости от N_{AGV} (составлено автором)

Совокупный анализ трёх экспериментов позволяет сформулировать практические рекомендации по конфигурированию системы. При производительности линии до 15 кузовов/ч достаточно одного AGV на маршрут — дополнительные единицы не повышают K_{util} , но увеличивают f_2 . Оптимальность конфигурации транспортной системы с параметром $N_{AGV} = 2$ фиксируется главным образом в границах производительности от 15 до 25 кузовов/ч. Данный вариант, исключая избыточную нагрузку на энергосеть, одновременно нивелирует риски возникновения временных штрафов. Если же плановые темпы смещаются в область значений свыше 25 кузовов/ч, инфраструктурная потребность неизбежно возрастает до трех единиц AGV. В этом контексте предложенный модельный инструментариум ценен прежде всего прогностической силой — возможностью выработки выверенных технологических решений еще до этапа капиталоемкого физического развертывания комплексов.

Выводы

Преодоление логистических сложностей и сопутствующих им операционных дисбалансов, специфичных для цехов сборки комплексной продукции (в частности, на предприятиях автомобилестроения), выступает ключевым вектором применения предложенного в статье методологического инструментария. В основу концепции заложено сопряжение аппарата дискретно-событийного моделирования с алгоритмами предиктивного управления парком AGV. Специфика эксплуатации роботизированных платформ, жестко детерминированная критериями точности позиционирования и взаимной координации, накладывает ограничения на процессы диспетчеризации; тем не менее разработанная схема автоматизации позволяет осуществлять динамическую переконфигурации рабочих зон. В конечном итоге, как показывают результаты симуляционных тестов, за счет сквозного интегрального мониторинга физических потоков в режиме реального времени формируются условия, необходимые для стабильного роста операционной эффективности предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубенко Ю. В. Алгоритм оптимизации архитектуры многоагентной системы, основанный на аппроксимации «функции стратегии» // Научные труды КубГТУ. 2025. № 4. С. 141–151. DOI: 10.26297/2312-9409.2025.4.12.
2. Бычков И. В., Давыдов А. В., Кензин М. Ю., Нагул Н. В. Иерархическое планирование действий разнородной группы автономных мобильных роботов // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskoe-planirovanie-deystviy-raznorodnoy-gruppy-avtonomnyh-mobilnyh-robotov> (дата обращения: 06.07.2026).
3. Тамков П. И., Ильичев В. Г. Модели и алгоритмы управления инновациями робототехнических компаний на основе имитационного моделирования // ИВД. 2026. № 4(136). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-i-algoritmy-upravleniya-innovatsiyami-robototekhnicheskikh-kompaniy-na-osnove-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 06.07.2026).
4. Курочкин С. Ю. Параметрический синтез системы управления групповым движением роботов с использованием статистического имитационного моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1(231). С. 146–154. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-146-154.
5. Seonghun Seo, Hoon Jung A robust collision prediction and detection method based on neural network for autonomous delivery robots // ETRI Journal. 2023. Volume 45, Issue 2. P. 87–94. DOI: 10.4218/etrij.2021-0397.
6. Chenyang Zhang, Jieliang Zhao Design and Simulation of Bionic Quadruped Obstacle-Overcoming Robot // Advanced Materials Technologies. 2024. Volume 9, Issue 24. P. 60–67. DOI: 10.1002/admt.202400992.
7. Галин Р. Р. и др. Подход к распределению задач технологического процесса среди неоднородных участников КРТС с учетом их состояния // УБС. 2024. № 112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-raspredeleniyu-zadach-tehnologicheskogo-protsessa-sredi-neodnorodnyh-uchastnikov-krts-s-uchetom-ih-sostoyaniya> (дата обращения: 06.07.2026).

8. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., Макоев А. Р. Концепция создания системы управления мультиагентной робототехнической системой сельскохозяйственного назначения на базе нейрокогнитивных алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3(239). DOI: 10.18522/2311-3103-2024-3-6-18.
9. Yutong Wang, Shenghao Yang Thermo-magnetic soft robot for adaptive locomotion and delivery // Droplet. 2025. Volume 4, Issue 3. P. 102–105. DOI: 10.1002/dro2.70016.
10. Абуталипов Р. Н., Заммоев А. У., Чернышев Г. В. Поиск теоретических подходов для исследования киберфизических систем и сред с интеллектуальным управлением // Известия КБНЦ РАН. 2024. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poisk-teoreticheskikh-podhodov-dlya-issledovaniya-kiberfizicheskikh-sistem-i-sred-s-intellektualnym-upravleniem> (дата обращения: 06.07.2026).
11. Григорьева Е. Д., Ушаков В. А. Модель и алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2(244). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-i-algoritm-resheniya-transportno-logisticheskoy-zadachi-svoevremennoy-dostavki-gruzov-s-ispolzovaniem-gruppirovki> (дата обращения: 06.07.2026).
12. Zhongchan Pu, Shuqing Wu, Yi Han. A Discrete-Event Simulation Model for Assessing Operating Room Efficiency of Thoracic, Gastrointestinal, and Orthopedic Surgeries // World Journal of Surgery. 2024. Vol. 48, № 5. DOI: 10.1002/wjs.12116.
13. Jiahao Li, Dezhong Tong, Zhuonan Hao, Yinbo Zhu, Hengan Wu, Mingchao Liu, Weicheng Huang. Harnessing Discrete Differential Geometry: A Virtual Playground for the Bilayer Soft Robots // Advanced Intelligent Systems. 2025. Vol. 7, № 9. DOI: 10.1002/aisy.202500141.
14. Junjian Zhou, Zhiqiang Chen Cross-Scale Hierarchical Targeted Delivery System Based on Small-Scale Magnetic Robots // Advanced Robotics Research. 2026. № 67. P. 90–95. DOI: 10.1002/adrr.202500187.
15. Xiaowu Huang, Jiangtao Fu, Juntong Yun, Li He, Changrong Zhang. Event-Driven Model Predictive Control With Sliding Mode Observer for Omnidirectional Demolition Robots // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2025. Vol. 37, № 27–28. DOI: 10.1002/cpe.70424.

Gaurov Sergey Sergeevich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: sergeygaurov@gmail.com

Ponomarev Alexander Vitalievich

National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia
E-mail: sasha-ponom@mail.ru

Gladkov Nikita Vladimirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: nikitpgladkov@gmail.com

Gintciak Aleksei Mikhailovich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: gintsyak_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=977523

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203897426>

A discrete-event model of a parts delivery system using transport robots

Abstract. The relevance of this research stems from the need to enhance the flexibility of logistics processes in the face of the uncertainty inherent in modern high-tech manufacturing. This article proposes a solution to a pressing scientific and practical problem concerning the automation and improved accuracy of component delivery within workshops using conveyor robots. The authors present a comprehensive approach that addresses the lack of methodological solutions for integrating analytical models with algorithms for the real-time manoeuvring of transport vehicles. Using the advanced simulation software AnyLogic, a spatial layout of a production area with eleven workstations and a network of paths for robots has been designed. Particular attention is paid to key technical and operational parameters (speed, acceleration, loading time and energy consumption parameters). Two objective functions are also proposed for the multi-criteria optimisation of the system's operation, aimed at minimising time penalties for schedule violations and reducing the overall energy consumption of the fleet of automated transport vehicles. Based on a series of numerical experiments using the discrete-event simulation method, critical patterns have been identified regarding the influence of the size of the robot fleet and the line's operating rate on the final equipment utilisation rate. Specific practical recommendations have been formulated for configuring the transport system for various operating modes of the assembly line. In conclusion, it is emphasised that the proposed simulation approach enables the adoption of well-considered infrastructure solutions and the effective reconfiguration of assembly systems without incurring actual physical costs or financial expenditure on full-scale testing.

Keywords: workshop; parts; delivery; robot; route; accuracy; model