

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
И УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ
ПРЕДПРИЯТИИ**

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A MONITORING
AND MANAGEMENT SYSTEM FOR IN-HOUSE TRANSPORT PROCESSES
IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

Терентьевский Р.В., студент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Terentyevsky R.V., Student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В статье рассматривается проблема повышения эффективности внутрипроизводственных логистических операций за счёт внедрения интеллектуальной системы мониторинга и управления транспортными потоками. Предложена архитектура системы, основанная на интеграции технологий позиционирования в реальном времени, цифрового двойника производственной среды и адаптивных алгоритмов маршрутизации. Разработана математическая модель транспортного потока с учётом динамических ограничений производственной среды. Проведено имитационное моделирование, подтвердившее снижение времени транспортировки грузов на 23,7 % и уменьшение простоев транспортных средств на 31,4 % по сравнению с традиционными методами управления.

Abstract: The article addresses the problem of improving the efficiency of in-plant logistics operations through the implementation of an intelligent monitoring and control system for transport flows. A system architecture based on the integration of real-time positioning technologies, a digital twin of the production environment, and adaptive routing algorithms is proposed. A mathematical model of the transport flow has been developed, taking into account the dynamic constraints of the production environment. Simulation modeling was carried out, which confirmed a reduction in cargo transportation time by 23.7% and a decrease in vehicle downtime by 31.4% compared to traditional control methods.

Ключевые слова: автоматизация производства, внутризаводская логистика, система мониторинга, оптимизация маршрутов, цифровой двойник.

Keywords: production automation, in-plant logistics, monitoring system, route optimization, digital twin.

Современные промышленные предприятия характеризуются высокой степенью автоматизации технологических процессов, однако вопросы оптимизации вспомогательных операций, в частности внутрипроизводственных транспортных процессов, зачастую остаются вне поля зрения. Нерациональная организация перемещения грузов, полуфабрикатов и готовой продукции приводит к увеличению длительности производственного цикла, росту эксплуатационных затрат и снижению общей производительности [1]. Согласно исследованиям, до 40 % времени работы внутризаводского транспорта расходуется на холостые пробеги и ожидание погрузочно-разгрузочных операций. Актуальность разработки интеллектуальных систем управления транспортными потоками обусловлена необходимостью достижения синергии между основным и вспомогательным оборудованием в условиях цифровизации промышленности [2-3].

Целью работы является разработка системы мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами, обеспечивающей динамическую оптимизацию маршрутов на основе данных в реальном времени. Для достижения поставленной цели решаются задачи формализации производственной среды, разработки математической модели транспортного потока, проектирования архитектуры системы и экспериментальной верификации предложенных решений.

Пусть производственное предприятие представляется как ориентированный взвешенный граф $G = (V, E, W)$, где множество вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует рабочим местам, складам и пунктам погрузки-разгрузки, а мно-

жество рёбер $E = \{e_{ij}\}$ описывает допустимые маршруты перемещения. Каждому ребру e_{ij} сопоставляется динамическая стоимость перемещения, зависящая от времени:

$$w_{ij}(t) = \alpha \cdot \frac{d_{ij}}{v_{\max}} + \beta \cdot \rho_{ij}(t) \cdot T_{\text{wait}} + \gamma \cdot \delta_{ij}(t) \cdot T_{\text{block}} + \eta \cdot \frac{E_{ij}}{E_{\text{norm}}},$$

где d_{ij} – физическое расстояние между узлами i и j , м; $v_{\max}$ – максимальная скорость транспортного средства, м/с; $\rho_{ij}(t) \in [0,1]$ – коэффициент загрузки маршрута в момент времени t ; T_{wait} – среднее время ожидания при загрузке, с; $\delta_{ij}(t) \in \{0,1\}$ – индикатор временных ограничений; T_{block} – время блокировки маршрута, с; E_{ij} – энергопотребление на участке, кВт·ч; E_{norm} – нормативное энергопотребление, кВт·ч; $\alpha = 0,35$, $\beta = 0,30$, $\gamma = 0,25$, $\eta = 0,10$ – весовые коэффициенты, определённые методом экспертных оценок.

Для множества транспортных средств $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ вводится вектор состояния:

$$x_r(t) = [p_r(t) \quad v_r(t) \quad q_r(t) \quad E_r(t) \quad T_{\text{оп},r}(t) \quad \text{SOC}_r(t) \quad T_{\text{прост},r}(t)]^T,$$

где $p_r(t) \in V$ – текущее местоположение средства r ; $v_r(t)$ – текущая скорость, м/с; $q_r(t)$ – текущая загрузка, кг; $E_r(t)$ – накопленное энергопотребление, кВт·ч; $T_{\text{оп},r}(t)$ – наработанное время, ч; $\text{SOC}_r(t)$ – состояние заряда батареи, %; $T_{\text{прост},r}(t)$ – время простоя, с.

Задача маршрутизации формулируется как минимизация суммарного времени выполнения всех транспортных заявок за плановый период:

$$\min J = \sum_{r=1}^k \sum_{j=1}^{n_r} (T_{\text{движ},rj} + T_{\text{погр},rj} + T_{\text{ожид},rj}),$$

при ограничениях на уникальность маршрута, удовлетворение спроса, допустимые зоны перемещения, минимальный заряд батареи, ограничение скорости, грузоподъёмность, ёмкость узлов и максимальное время простоя.

Для решения задачи оптимизации применён модифицированный алгоритм муравьиной колонии с динамическим обновлением феромонов:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho(t)) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{r=1}^k \Delta \tau_{ij}^{(r)}(t),$$

где коэффициент испарения $\rho(t)$ адаптируется в зависимости от плотности транспортного потока в диапазоне от 0,15 до 0,45. Локальное обновление феромонов определяется текущей загрузкой маршрута, а глобальное – по результатам лучшего маршрута итерации.

Предлагаемая нами система реализована по трёхуровневой архитектуре (рис. 1). Нижний уровень включает распределённую сеть датчиков: маяки ультраширокополосного позиционирования с точностью до 10 см, лазерные сканеры для обнаружения препятствий и датчики нагрузки на транспортных средствах. Средний уровень представлен шлюзами обработки данных, осуществляющими предварительную фильтрацию измерений по алгоритму Калмана. Верхний уровень содержит сервер цифрового двойника, который в реальном времени отображает состояние производственной среды и реализует модуль адаптивной маршрутизации.

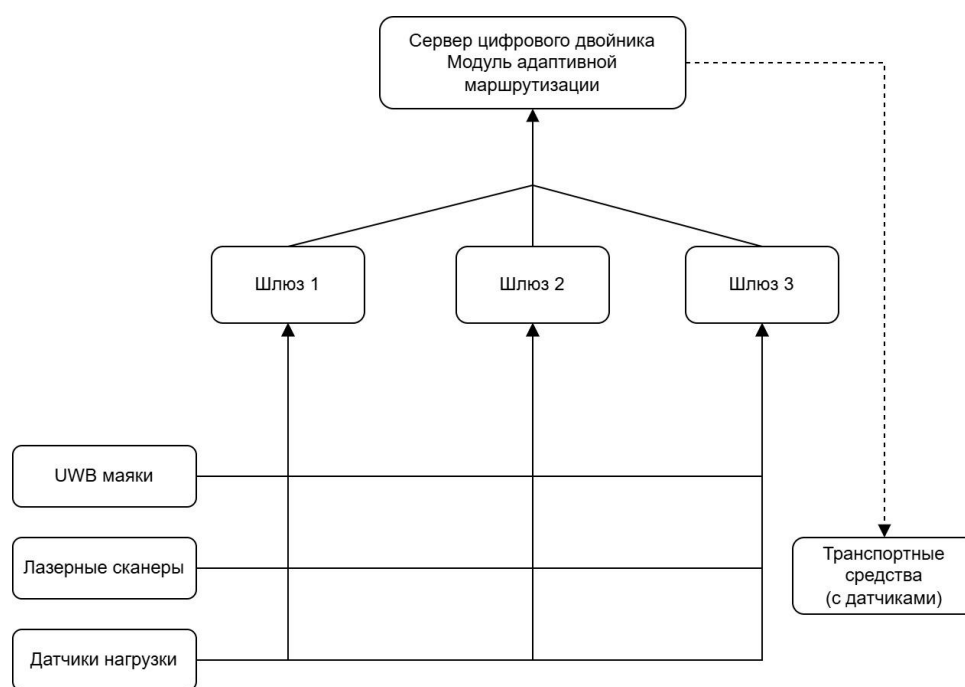


Рисунок 1 – Архитектура системы мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами

Параметры имитационной модели, использованной для верификации системы, приведены в табл. 1. Выбор значений обусловлен характеристиками типового производственного участка машиностроительного предприятия средней мощности.

Таблица 1 – Параметры имитационной модели производственного участка

Параметр	Значение	Единица измерения
Площадь производственного цеха	4800	м ²
Количество транспортных средств	8	шт.
Средняя скорость перемещения	1,2	м/с
Количество пунктов погрузки-разгрузки	14	шт.
Интенсивность поступления заявок	32	заявок/час
Средняя длительность погрузки	185	с

Фильтрация данных на уровне шлюзов осуществляется по дискретному фильтру Калмана:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k-1}),$$

где $\hat{x}_k$ – оценка состояния в момент k ; z_k – вектор измерений; K_k – коэффициент усиления фильтра; H – матрица наблюдения. Параметры фильтра настроены экспериментально: ковариация шума процесса $Q = \text{diag}(0,01; 0,01; 0,001)$, ковариация шума измерений $R = \text{diag}(0,05; 0,05)$.

Имитационное моделирование выполнялось в среде MATLAB. В модели учитывались: транспортные заявки, очереди на погрузочно-разгрузочных пунктах; движение транспортных средств по графу маршрутов с динамически пересчитываемыми весами.

В таблице 2 приводятся результаты имитационного моделирования в сравнительном виде.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования (сравнение)

Параметр	Базовый сценарий	Разработанная система	Изменение, %
Среднее время доставки, с	428 ± 34	326 ± 28	–23,7
Коэффициент использования ТС	0,58 ± 0,04	0,81 ± 0,03	+39,7
Холостые пробеги, %	38 ± 3,2	21 ± 2,1	–44,7
Конфликты на маршрутах, ед./смена	12 ± 2,8	3 ± 1,2	–75,0
Время реакции на события, с	92 ± 15	4,2 ± 0,8	–95,4

Эффект наиболее заметен в периоды пиковых нагрузок (рис. 2).

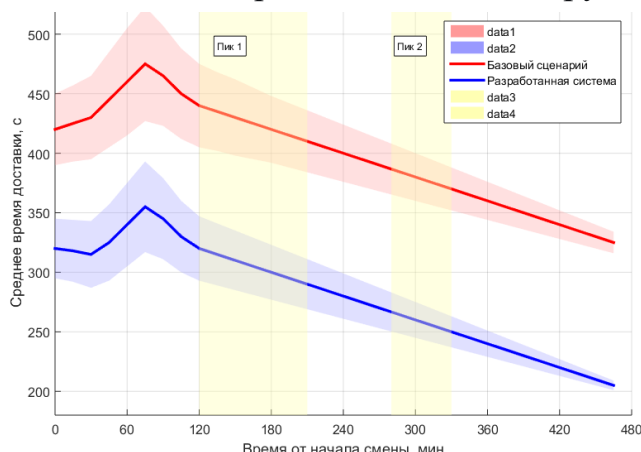


Рисунок 2 – Графики динамики доставки груза в течение рабочей смены

В результате нами разработана система мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами, обеспечивающая динамическую оптимизацию маршрутов на основе данных в реальном времени. Математическая модель транспортного потока учитывает пространственные и временные ограничения производственной среды, включая 7 переменных состояния транспортного средства и 8 типов ограничений. Предложена модификация алгоритма муравьиной колонии с динамическим коэффициентом испарения феромонов, зависящим от плотности транспортного потока.

Имитационное моделирование подтвердило эффективность предложенного подхода: снижение времени транспортировки на 23,7 %, повышение коэффициента использования транспортных средств до 0,81, уменьшение конфликтов на маршрутах на 75 %.

Список литературы

1. Ганиева, Н. М. Логистика производственных процессов : учебное пособие / Н. М. Ганиева ; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет". – Омск, 2012. – 248 с. – ISBN 978-5-8149-1341-8.
2. Основы управления производственными и материальными потоками / Н. Ю. Сопилко, О. Ю. Мясникова, И. И. Шаталова, Н. С. Щербакова ; Российский университет дружбы народов (РУДН). – Москва, 2019. – 105 с. – ISBN 978-5-209-09106-6.

3. Полуботко, А. А. Производственная логистика в цифровой экономике / А. А. Полуботко, С. Г. Халатян ; Ростовский государственный экономический университет (РИНХ). – Ростов-на-Дону, 2025. – 108 с. – ISBN 978-5-7972-3428-9.

References

1. Ganieva N. M. Logistics of production processes: Textbook. Omsk: Omsk State Technical University, 2012. 248 p. ISBN 978-5-8149-1341-8.

2. Sopilko N. Yu., Myasnikova O. Yu., Shatalova I. I., Shcherbakova N. S. Fundamentals of production and material flow management. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 2019. 105 p. ISBN 978-5-209-09106-6.

3. Polubotko A. A., Khalatyan S. G. Production logistics in the digital economy. Rostov-on-Don: Rostov State University of Economics (RINH), 2025. 108 p. ISBN 978-5-7972-3428-9.