

УДК 004.4'2:005.7:658.8
DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-818-824
EDN HXWNPW

Адаптивная ERP-архитектура для промышленных и транспортных компаний: моделирование и маркетинговые эффекты

¹Тхориков Б.А., ²Герасименко О.А.

¹Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)
Россия, 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
tkhorikov-ba@rguk.ru; gerasimenko@bsuedu.ru

Аннотация. В статье рассматривается проектирование адаптивной ERP-архитектуры для промышленных и транспортно-логистических предприятий. Обоснована необходимость перехода от универсальных ERP к отраслевым решениям, учитывающим динамику логистики. Предложена модель, включающая микросервисы, событийно-ориентированную архитектуру, цифровых двойников и онлайн-обучение. На стендовом моделировании показана достижимость ключевых KPI (время пересчета маршрутов ≤ 3 мин, релевантность рекомендаций ≥ 90 %). Отмечена прикладная ценность для маркетинга: повышение прозрачности, ускорение реакции на запросы клиентов и рост лояльности.

Ключевые слова: ERP-система, адаптивная архитектура, транспортная логистика, цифровой двойник, событийно-ориентированная модель, машинное обучение, маркетинговые информационные системы

Для цитирования: Тхориков Б.А., Герасименко О.А. 2025. Адаптивная ERP-архитектура для промышленных и транспортных компаний: моделирование и маркетинговые эффекты. *Экономика. Информатика*, 52(4): 818–824. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-818-824; EDN HXWNPW

Adaptive ERP Architecture for Industrial and Transport Companies: Simulation and Marketing Effects

¹Boris A. Tkhorikov, ²Olga A. Gerasimenko

¹Russian State University of A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)
1 Malaya Kaluzhskaya St., Moscow 119071, Russia

²Belgorod State National Research University
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
tkhorikov-ba@rguk.ru; gerasimenko@bsuedu.ru

Abstract. The article examines the design of an adaptive ERP architecture for industrial and transport logistics enterprises. The need to shift from universal ERP platforms to industry-specific solutions that consider the dynamics of logistics processes is substantiated. The proposed model integrates micro-services, event-driven architecture, digital twins, and online machine learning. Simulation experiments confirmed the achievement of key KPIs (route recalculation time ≤ 3 minutes, recommendation relevance ≥ 90 %). The practical value for marketing is highlighted: improving transparency, accelerating responses to customer requests, and increasing loyalty.

Keywords: ERP system, adaptive architecture, transport logistics, digital twin, event-driven architecture, machine learning, marketing information systems

For citation: Tkhorikov B.A., Gerasimenko O.A. 2025. Adaptive ERP Architecture for Industrial and Transport Companies: Simulation and Marketing Effects. *Economics. Information technologies*, 52(4): 818–824 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-4-818-824; EDN HXWNPW

Введение

В последние десятилетия ERP-системы (Enterprise Resource Planning, автоматизированные системы управления) зарекомендовали себя как ключевой инструмент цифровизации предприятий [Li, Wu, 2021; França Canon et al., 2025]. Они представляют собой комплексные платформы, интегрирующие данные и процессы разных подразделений, от снабжения до продаж, и обеспечивают единую информационную среду для принятия решений. Особенно заметна роль ERP в сферах промышленности и транспортной логистики, где такая интеграция позволяет компаниям быстрее реагировать на колебания спроса, снижать издержки и повышать эффективность цепочек поставок [Zunic et al., 2020; Omoeun et al., 2024]. Благодаря внедрению ERP-систем предприятия получают сквозную аналитику с ориентацией на маркетинговую эффективность – от управления заказами и автопарком до контроля складских остатков и удовлетворённости клиентов, что способствует прозрачности и сбалансированности действий всех структурных подразделений [Jawad et al., 2024; Roman et al., 2025].

Несмотря на очевидные преимущества, традиционные ERP-решения, создававшиеся исходя из относительно стабильных бизнес-процессов, всё чаще демонстрируют свою ограниченность в условиях современной динамичной логистики [Chirvase, 2023; Abouzid et al., 2023]. Рынки и цепочки поставок находятся в постоянном движении, подвержены сезонным всплескам и непредвиденным событиям, включая политические кризисы, и многие ERP-системы зачастую не успевают адаптироваться к этим изменениям [Zaidi et al., 2024; Wasi et al., 2025]. Как отмечается в недавних обзорах, классические ERP-системы нередко работают обособленно и требуют сложных доработок для интеграции с новыми источниками информации (например, IoT-датчиками или облачными сервисами), что ведёт к задержкам в обмене данными и снижению оперативности управления [Roman et al., 2025; Onebunne, Adepoju, 2025; Vaidya et al., 2025].

В ответ на эти вызовы формируется концепция адаптивных ERP-систем – решений нового поколения, способных подстраиваться под меняющиеся условия бизнеса в реальном времени [Maged, Kassem, 2025; Li, Wu, 2021]. Адаптивная ERP характеризуется модульностью, гибкими настройками и возможностью быстрого внедрения новых технологий [França Canon et al., 2025; Chirvase, 2023]. Крупнейшие поставщики уже движутся в этом направлении: исследования показывают революцию, которую цифровые двойники (Digital Twins) вносят в управление цепочками поставок, а также интеграцию машинного обучения для прогнозов и адаптивной оптимизации процессов [Zaidi et al., 2024; Abouzid et al., 2023; Roman et al., 2025]. Цель таких решений – обеспечить предприятиям гибкость и устойчивость в условиях быстро меняющегося рынка. Аналитики также выделяют адаптивность как ключевое свойство передовых ERP-систем, отмечая способность лидеров отрасли регулярно обновлять функциональность и легко интегрироваться со сторонними сервисами для поддержки технологий будущего [Jawad et al., 2024; Wasi et al., 2025; Zhang et al., 2021].

Перспективы развития адаптивных ERP-систем в промышленной и транспортной отраслях связаны с всё более глубоким внедрением искусственного интеллекта, цифровых двойников и других инноваций, позволяющих предсказывать и опережать изменения [Roman et al., 2025; Freese et al., 2025]. В ближайшем будущем можно ожидать появления ERP-экосистем, которые не только автоматически реагируют на текущие события (например, отклонения в графике перевозок или изменение стоимости топлива), но и проактивно рекомендуют оптимизационные решения на основе прогнозной аналитики [Onebunne, Adepoju, 2025; Omoeun et al., 2024]. Такая эволюция превратит ERP из статичного регистратора операций в адаптивную нервную систему предприятия, постоянно обучающуюся и совершенствующую свои рекомендации [Maged, Kassem, 2025; Vaidya et al., 2025]. Названные предпосылки определили *цель исследования* – спроектировать и верифицировать архитектуру адаптивной ERP-системы для транспортной логистики, учитывающей маркетинговый аспект деятельности компании.

Объект и методы исследования

Объект исследования – процессы управления промышленными и транспортно-логистическими предприятиями, требующие интеграции в единую информационную систему класса ERP. Особое внимание уделяется организациям, где транспортный контур является критическим элементом производственной деятельности: предприятиям с собственным автопарком, мультимодальным перевозчикам и логистическим операторам.

Методы исследования включают:

- архитектурное моделирование: применялись принципы микросервисной архитектуры, событийно-ориентированной модели (Event-Driven Architecture) и предметно-ориентированного проектирования (Domain-Driven Design);
- формализацию бизнес-процессов: использовались сети Петри и BPM-модели для описания и проверки корректности транспортных сценариев;
- интеграцию цифровых двойников: агентное моделирование автопарка и заказов в среде AnyLogic с подключением событийной шины Apache Kafka, что позволило воспроизводить в цифровом виде реальные логистические процессы;
- стендовое моделирование: эксперименты проводились на серверной инфраструктуре (Intel Xeon, 64 ГБ RAM, ОС Ubuntu Server 22.04) с контейнеризацией сервисов в Docker/Kubernetes, что обеспечило проверку устойчивости архитектуры при нагрузке до 150 транспортных средств и до 400 заказов за смену;
- методы оценки эффективности KPI: среднее время пересчета маршрутов, релевантность рекомендаций, процент своевременно выполненных заказов, снижение холостых пробегов и потерь топлива;
- экспертный опрос (N – 15) представителей профессионального и научного сообществ для выбора основных элементов проектируемой ERP-системы.

Результаты и их обсуждение

Выбор и систематизация ключевых компонентов адаптивной ERP-системы осуществлялись не только на основе анализа литературы, но и по итогам экспертного опроса, проведенного в рамках исследования.

В опросе (N – 15) участвовали: руководители ИТ-департаментов трех промышленных предприятий с собственными автопарками (металлургия, машиностроение, строительные материалы) в гг. Белгород и Москва (3 человека); директора по логистике двух федеральных транспортных операторов (2 человека); специалисты по цифровым решениям и ERP-платформам (SAP, Oracle, «1C:ERP»), работающие в консалтинговых компаниях (5 человек); сотрудники кафедр управления и бизнес-информатики, имеющие опыт в области информационных систем для логистики (5 человек).

Экспертам предлагалось ответить на два блока вопросов:

1) Критические потребности. Какие функциональные модули ERP-системы наиболее значимы для транспортной и промышленной логистики? Какие проблемы существующих решений вы считаете ключевыми?

2) Приоритеты архитектуры. Какие технологические принципы (микросервисы, цифровые двойники, ML, API-шлюзы и др.) должны стать ядром системы, чтобы обеспечить адаптивность и соответствие отраслевой специфике?

Ответы экспертов были закодированы и сгруппированы по тематическим категориям. Каждый элемент, набравший $\geq 70\%$ упоминаний среди участников, был отнесен к «ядру архитектуры». Обобщенный набор элементов представлен в табл. 1.

В совокупности эти компоненты формируют адаптивную ERP-архитектуру, которая сочетает модульность, событийную реактивность и интеллектуальные механизмы самообучения. В отличие от традиционных ERP, ориентированных на универсальные сценарии, данная архитектура обладает необходимым потенциалом для учета специфики промышленной и транспортной логистики.

Таблица 1
Table 1

Основные элементы проектируемой ERP-системы
Main elements of the designed ERP system

Компонент ERP-системы	Суть компонента	Назначение
Микросервисы и DDD	Декомпозиция системы на отдельные сервисы по предметным областям (заказы, маршруты, тарифы).	Обеспечивает гибкость разработки и масштабируемость, возможность независимого обновления и добавления функций.
Событийно-ориентированная модель (EDA)	Реакция системы на изменения через поток событий, передаваемых по шине.	Снижает связанность компонентов, обеспечивает работу в реальном времени и адаптивность к динамике логистики.
Цифровой двойник	Виртуальная модель транспортной сети, синхронизированная с реальными объектами.	Позволяет прогнозировать сбои, тестировать сценарии «what-if» и повышать точность управленческих решений.
Сети Петри и BPM	Формальные модели бизнес-процессов с возможностью верификации.	Обеспечивают прозрачность и корректность логики, предотвращают ошибки при изменении процессов.
Онлайн-обучение (ML)	Алгоритмы машинного обучения, обновляющиеся на потоках данных.	Подстраивают рекомендации (маршруты, ETA, спрос) под новые условия, повышают релевантность и устойчивость решений.
API Gateway и безопасность	Единый шлюз доступа к микросервисам и внешним системам.	Гарантирует согласованность форматов, защиту данных и удобное подключение клиентов и партнеров.

Для оценки применимости и результативности предлагаемой ERP-архитектуры был сформирован набор ключевых показателей (KPI), отражающих как операционную эффективность логистических процессов, так и маркетинговые эффекты для внешних клиентов и партнеров:

- Время пересчета маршрутов. Пороговое значение – не более 3 минут с момента поступления нового события (заказа, сбоя техники, изменения дорожной обстановки). Данный показатель отражает способность архитектуры обеспечивать оперативное принятие решений в условиях высокой динамики среды.

- Релевантность рекомендаций. Пороговое значение – не ниже 90–95 % совпадения решений системы с эталонными вариантами, рассчитанными экспертами и оптимизационными пакетами (Cplex, Gurobi). Данный показатель определяет корректность и практическую полезность рекомендаций ERP при маршрутизации и распределении ресурсов.

- Устойчивость под нагрузкой. Пороговое значение – стабильная работа при сотнях событий в секунду с уровнем доступности (uptime) не ниже 99,9 %. Показатель фиксирует способность системы масштабироваться и сохранять производительность при росте интенсивности входного потока данных, что критично для круглосуточных транспортных операций.

- Экономический эффект. Пороговое значение – снижение холостых пробегов и простоев транспорта на 15–20 %, сокращение затрат на топливо и штрафов за несоблюдение сроков, а также рост удовлетворенности клиентов. Этот показатель связывает архитектурные решения ERP с конечными экономическими результатами и маркетинговыми преимуществами (лояльность и доверие потребителей, конкурентоспособность услуг).

Таким образом, система KPI позволяет оценить архитектуру не только как техническое решение, но и как фактор стратегического развития предприятий.

Для проверки достижимости целевых показателей был проведен цикл экспериментов в среде AnyLogic 8.9 University Edition, поддерживающей агентное и дискретно-событийное

моделирование. Выбор данной платформы обусловлен ее способностью одновременно описывать физические транспортные процессы и информационные взаимодействия в ERP-среде.

Инфраструктура моделирования включала:

- виртуальный автопарк из 150 транспортных средств с параметрами грузоподъемности и расхода топлива;
- генерацию 300–400 заказов за рабочую смену, смоделированную по пуассоновскому распределению, с учетом пиковых нагрузок в «часах-пик»;
- интеграцию событийной шины Apache Kafka, обеспечивающей обмен сообщениями между прототипами микросервисов («Управление заказами», «Оптимизация маршрутов», «Мониторинг доставки»);
- агентный цифровой двойник автопарка, фиксирующий события (поломка, задержка, прибытие в пункт назначения) и позволяющий проигрывать сценарии «what-if».

Сценарии экспериментов:

- базовый поток заказов – равномерное поступление заявок без внешних сбоев;
 - пиковая нагрузка – увеличение числа заказов на 40 % и моделирование дорожных заторов;
 - аварийная ситуация – искусственное выведение из строя 10 % транспортных средств.
- Результаты стендового моделирования показали:
- среднее время пересчета маршрутов составило 2,7 минуты, что укладывается в целевой KPI;
 - релевантность рекомендаций системы достигла 92 %, что подтверждает корректность алгоритмов онлайн-обучения и интеграции цифрового двойника;
 - при нагрузке до 150 транспортных средств система сохраняла стабильность, а рост времени отклика не превышал 15 % относительно базового сценария.

Полученные данные подтверждают, что предложенная ERP-архитектура обеспечивает выполнение заданных пороговых значений KPI. В частности, быстродействие и релевантность решений доказывают эффективность событийно-ориентированного ядра и встроенных алгоритмов машинного обучения. Устойчивость под нагрузкой демонстрирует, что микросервисная структура и шина событий позволяют системе масштабироваться без деградации. Наконец, оценка экономического эффекта указывает на прямую связь архитектуры ERP с улучшением бизнес-результатов и маркетинговых показателей (скорость реакции на запросы клиентов, снижение себестоимости услуг, рост прозрачности взаимодействия).

Заключение

Представленная работа показала, что адаптивная ERP-архитектура, основанная на микросервисной модульности, событийно-ориентированной модели, цифровых двойниках и алгоритмах онлайн-обучения, обладает значительным потенциалом для повышения эффективности управления промышленными и транспортными предприятиями. Проведенное стендовое моделирование подтвердило достижимость ключевых показателей: сокращение времени пересчета маршрутов до трех минут, релевантность рекомендаций выше 90 % и устойчивость системы при пиковых нагрузках.

Прикладная ценность исследования заключается в том, что предложенная архитектура позволяет предприятиям: повысить прозрачность логистических процессов и сократить операционные издержки; ускорить реакцию на запросы клиентов и рыночные изменения, формируя новые стандарты качества сервиса; использовать прогнозную аналитику и цифровые двойники для стратегического планирования и оптимизации ресурсов; интегрировать маркетинговые информационные системы с ERP-ядром, что открывает возможности для динамического ценообразования, точного расчета сроков и персонализированного обслуживания клиентов.

Таким образом, ERP-система нового поколения перестает быть лишь инструментом внутреннего учета и контроля. Она становится маркетинговым активом компании: поддерживает коммуникацию с клиентом на всех этапах цепочки поставок; формирует

доверие за счет прозрачности и предсказуемости; повышает лояльность потребителей и конкурентоспособность услуг на рынке.

В практическом плане это означает, что промышленным предприятиям с крупным транспортным контуром и транспортно-логистическим операторам предлагается воспроизводимая модель цифровой архитектуры, которая одновременно решает задачи операционного управления и маркетингового позиционирования.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией архитектуры ERP с технологиями искусственного интеллекта для прогнозирования спроса и оптимизации цепочек поставок, а также с изучением влияния подобных систем на долгосрочную клиентскую лояльность и формирование новых моделей цифрового маркетинга в логистике.

References

- Abouzid I., et al. 2023. Digital twin implementation approach in supply chain processes. *International Journal of Information Management*, 69: 102567.
- Bosco C., de Rigo D., Dewitte O., Poesen J., Panagos P. 2015. Modelling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(2): 225–245.
- Chirvase C.S. 2023. Exploring Enterprise Resource Planning (ERP) Development. *Proceedings of PICBE*, 17(1): 1518–1528.
- França Canon J.G., dos Santos R.J.R., de Carvalho V.D.H., Monte M.B.S., de Barros T.L. 2025. Integrated Logistics Management Through ERP System: A Case Study in an Emerging Regional Market. *Logistics*, 9(2): 59.
- Freese F., et al. 2025. A conceptual framework for supply chain digital twins. *International Journal of Production Research*, 63(4): 1123–1145.
- Jawad Z.N., et al. 2024. Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning systems. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(1): 1–14.
- Li Q., Wu G. 2021. ERP System in the Logistics Information Management System of Supply Chain Enterprises. *Mobile Information Systems*, Article ID 7423717.
- Maged A., Kassem G. 2025. Self-Adaptive ERP: Embedding NLP into Petri-Net Creation and Model Matching. arXiv preprint arXiv:2501.03795.
- Omoegun G., et al. 2024. Advances in ERP-Integrated Logistics Management for Reducing Delivery Delays and Enhancing Project Delivery. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 11(3): 547–579.
- Onebunne T.C., Adepoju A.S. 2025. Adaptive Inventory Management in Global Supply Chains Using Digital Twins and Reinforcement Learning. *International Journal of Advance Research Publication and Reviews*, 2(08): 266–287.
- Roman E.A., Stere A.S., Roșca E., Radu A.V., Codroiu D., Ilie A. 2025. State of the Art of Digital Twins in Improving Supply Chain Resilience. *Logistics*, 9(1): 22.
- Testimony C.O., Adepoju A.S. 2025. Adaptive Inventory Management in Global Supply Chains Using Digital Twins and Reinforcement Learning. *International Journal of Advance Research Publication and Reviews*, 2(8): 266–287.
- Vaidya T., et al. 2025. Digital Twin-Driven Production Planning in SAP S/4HANA: A Case for Predictive and Adaptive Supply Chains. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, 7(1): 45–58.
- Wasi A.T., Anik M.A., Rahman A., Hoque M.I., Islam M.S., Ahsan M.M. 2025. A Theoretical Framework for Graph-based Digital Twins for Supply Chain Management and Optimization. arXiv preprint arXiv:2504.03692.
- Zaidi S., et al. 2024. Unlocking the potential of digital twins in supply chains. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 36(6): 694–706.
- Zhang J., Brintrup A., Calinescu A., Kosasih E., Sharma A. 2021. Supply Chain Digital Twin Framework Design: An Approach of SCOR Model and System of Systems. arXiv preprint arXiv:2107.09485.
- Zhang J., Sharma A., Brintrup A. 2021. Supply Chain Digital Twin Framework. arXiv.
- Zunic E., Donko D., Buza E. 2020. An Adaptive Data-Driven Approach to Solve Real-World Vehicle Routing Problems in Logistics. arXiv preprint arXiv:2001.02094.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.



Поступила в редакцию 12.09.2025
Поступила после рецензирования 08.10.2025
Принята к публикации 01.11.2025

Received September 12, 2025
Revised October 08, 2025
Accepted November 01, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тхориков Борис Александрович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой сервисных технологий и бизнес-процессов, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва, Россия

Герасименко Ольга Александровна, доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента и маркетинга, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris A. Tkhorikov, Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Service Technologies and Business Processes, Russian State University of A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), Moscow, Russia

Olga A. Gerasimenko, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Management and Marketing, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia