УДК 658.7 : 004.8 : 004.94 : 614.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

© 2026 А.В. Иващенко[1], И.В. Болвашенков[1,2], М.А. Терехин[1,2], Д.А. Мельников[1,2]

[1] Самарский государственный медицинский университет, г. Самара, Россия
[2] Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия

Статья поступила в редакцию 16.06.2026

Организация логистической цепи поставок при производстве медицинских изделий и медицинской техники требует специального подхода, учитывающего взаимодействие производственных предприятий, логистических компаний и организаций здравоохранения. Для решения данной задачи могут быть применены методы управления организационными системами, а также информационные технологии прогнозирования и поддержки принятия решений с использованием элементов искусственного интеллекта. В статье предложено развитие архитектуры медицинской логистической цепи поставок MPL (Medical Party Logistics), ориентированной на адаптацию механизмов организационного управления к условиям высокотехнологичного здравоохранения и требованиям персонализированной медицины. Основное направление исследования связано с разработкой и имитационным моделированием управляющего контура, объединяющего прогнозирование спроса, управление запасами и поддержку принятия решений по балансировке серийных и единичных операций. С позиций теории управления организационными системами и теории ограничений определены основные точки применения предиктивной аналитики и технологий искусственного интеллекта в управлении медицинской логистической цепью поставок. Имитационное моделирование показало возможность повышения устойчивости логистического процесса, сокращения среднего времени выполнения заказа и увеличения доли пациентов, обслуженных в установленный срок. Предложенный подход может быть использован при разработке систем поддержки принятия решений для организации производственных кооперации по созданию инновационных медицинских изделий и медицинской техники.

Ключевые слова: медицинская логистическая цепь поставок, высокотехнологичное здравоохранение, персонализированная медицина, управление организационными системами, искусственный интеллект, имитационное моделирование, регулятор.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-130-140
EDN: RBRQVY

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация логистической цепи поставок для производства современных медицинских изделий и медицинской техники представляет собой сложную научную задачу из области управления организационными системами. Необходимость согласования междисциплинарной деятельности в сферах здравоохранения, производства и информационных технологий, а также учета требований персонализированной медицины препятствует реализации известных методов и средств управления в социальных и экономических системах применительно к медицинской логистической цепи поставок. В данной статье предлагается новый подход, основанный на развитии моделей логистического посреднического оператора, обладающего необходимой гибкостью и адаптивностью в условиях неопределенности спроса и предложения.

Обобщенно логистическая цепь поставок [1, 2] объединяет взаимосвязанные процессы закупки, хранения, транспортировки, и др., обеспечивающих движение материалов и комплектующих в соответствии с принятыми бизнес-процессами производственной кооперации. В сложной цепи поставок задействованы различные организации, в частности, в здравоохранении это могут быть лечебные учреждения, производственные предприятия и логистические компании, построенные в соответствии с разными принципами организационного управления [3].

Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, директор Передовой медицинской инженерной школы. E-mail: anton.ivashenko@gmail.com
Болвашенков Иван Викторович, ассистент Передовой медицинской инженерной школы, аспирант. E-mail: i.v.bolvashenkov@samsmu.ru
Терехин Михаил Александрович, ассистент Передовой медицинской инженерной школы, аспирант. E-mail: terexin.m.a@yandex.ru
Мельников Денис Алексеевич, ассистент кафедры медицинской физики, математики и информатики, аспирант. E-mail: den.melnickov2001@yandex.ru

Эффективность логистической цепи поставок [4] определяется совокупностью материальных потоков в рамках кооперационных и координационных процессов и обычно зависит от возможности унификации процессов и продуктов, устранения узких мест, масштабирования производства и логистики и стандартизации операций и показателей качества. Принципы персонализированной медицины [5] требуют существенной корректировки этих целей вплоть до реализации противоположной методологии, основанной на индивидуальном подходе к каждому пациенту и, соответственно, каждому производственному заказу.

Действительно, производство персонализированного имплантата или отдельного медицинского прибора, адаптированного по размерам, интерфейсу и методике использования под конкретного пациента, требует особого подхода по организации логистической цепи поставок, что не позволяет реализовать оптимизированные консолидации и кооперации.

Решение этой проблемы требует поиска компромисса между задачами унификации и персонализации, который видится, прежде всего, в динамическом и автоматизированном регулировании баланса штучных и групповых операций медицинской логистической цепи поставок. Для описания такого рода процессов используются различные модели цепочек поставок, от 1PL до 6PL и выше [6]. Они различаются по способу привлечения внешних организаций, реализующих производственные и транспортные услуги. Перспективным представляются подходы, основанные на виртуализации посреднических операторов [7] за счет реализации специализированного программного обеспечения и технологий искусственного интеллекта.

Для постановки и решения задачи управления медицинской логистической цепью поставок ранее была предложена модель MPL (Medical Party Logistics), ориентированная на адаптацию механизмов управления цепями поставок к условиям высокотехнологичного здравоохранения [8]. Указанная модель отражает специфику функционирования производственно-логистических кооперций в условиях неопределённости спроса и предложения, однако требует дальнейшей разработки инструментов балансировки штучных и групповых операций.

Настоящая статья развивает данный подход. Если в исходной постановке была сформирована общая концепция медицинской логистической цепи поставок для высокотехнологичной персонализированной медицины, то в данной работе рассматривается механизм её программной и имитационной реализации. Предлагаемое решение основано на включении модуля предиктивной аналитики, использующего элементы искусственного интеллекта для прогнозирования спроса, управления запасами и поддержки принятия решений в условиях изменяющейся производственной нагрузки [9, 10].

Целью исследования является разработка и имитационное моделирование подхода к автоматизированному управлению медицинской логистической цепью поставок на основе интеграции механизмов прогнозирования спроса, управления запасами и балансировки производственных сценариев. Новизна исследования заключается в формировании управляющего контура по аналогии с ПИД-регулятором, объединяющего прогнозирование спроса, управление запасами и балансировку серийного и единичного производства. Апробация предложенного подхода выполнена средствами имитационного моделирования на примере логистики персонализированных имплантатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим типовую медицинскую логистическую цепь поставок, содержащую последовательные и взаимосвязанные этапы диагностики, накопления и логистики материалов и комплектующих, производство индивидуальных комплектующих и параметризацию, итоговую передачу или установку медицинской техники пациенту (возможно, требующего оперативного вмешательства). Соответствующая диаграмма процесса накопленной стоимости (VAD) приведена на Рис. 1.

С позиций теории управления организационными системами и теории ограничений, можно выделить основные места реализации предиктивной аналитики с использованием технологий искусственного интеллекта в соответствии с возможными инструментами управления цепью поставок. Первое узкое место в процессе медицинской цепи поставок состоит в специфическом колебании спроса в части персонализированного заказа материалов и комплектующих. Для снижения неопределенности в данном направлении необходимо увязать планы реализации с прогнозами заболеваний по направлениям медицинской помощи. Данная задача относится к типовым задачам прогнозирования и может быть успешно решена с использованием искусственной нейронной сети.

Второе направление реализации искусственного интеллекта состоит в совершенствовании взаимодействия поставщиков материалов и комплектующих в цепи поставок. Специфическая трудность в данном случае состоит в гетерогенном характере участников цепи поставок, включающих как производственные, так и логистические предприятия, а также организации здравоохранения. В организационном плане участники медицинской цепи поставок руководствуются разными показа-

телями эффективности и применяют разные методики управления ресурсами, что сказывается на рассогласовании процессов принятия решений. Для решения этой проблемы должны применяться технологии стратегического объемного планирования показателей с помощью механизмов виртуального круглого стола, для чего достаточно успешно используются мультиагентные технологии искусственного интеллекта.

Третье направление совершенствования медицинской цепи поставок состоит в оптимизации складских запасов в соответствии с результатами прогнозирования заказов и ритмичности производства. Учитывая высокую неопределенность и неоднородность параметров, для решения данной задачи можно предложить проведение имитационного моделирования в ограничениях для случаев оптимистичных, реалистичных и пессимистичных прогнозов функционирования медицинской логистической цепи поставок, для чего должно быть разработано программное обеспечение модуля поддержки принятия решений.

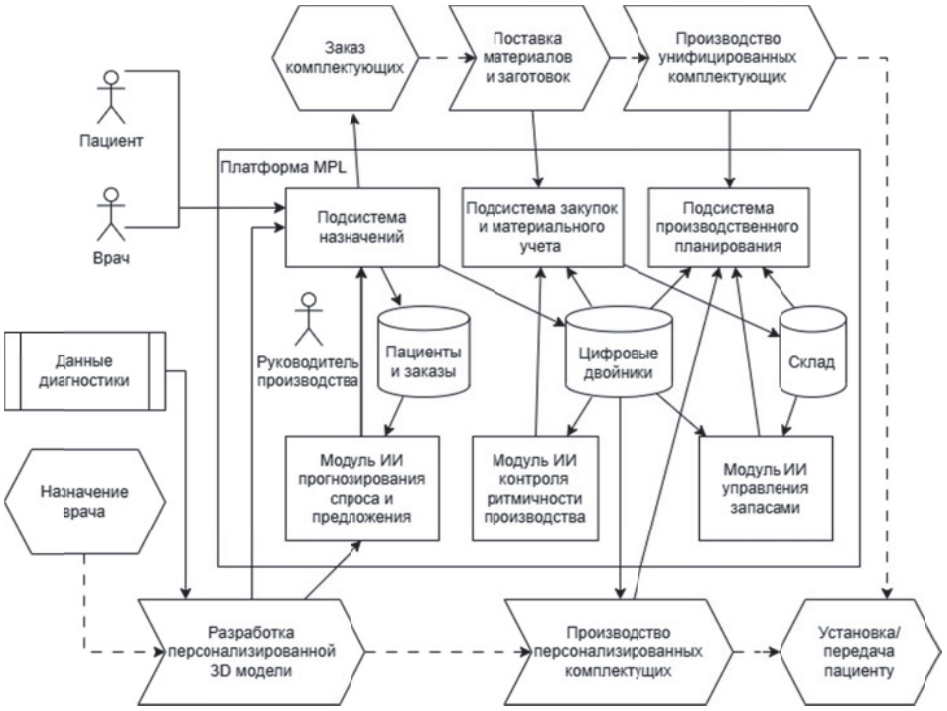

Рис. 1. Архитектура платформы MPL

Обобщенный вывод по направлениям интеллектуализации медицинской логистической цепи поставок приведен в Таблице 1.

На основе анализа практики построения логистических цепей поставок и организации производства медицинских изделий была сформирована система управления, построенная по принципу регулятора и включающая три взаимосвязанных компонента: интеллектуальное прогнозирование спроса, интеллектуальное управление запасами, а также балансировку серийного и единичного производства. Общая структура предлагаемой системы управления приведена на Рис. 2.

Выделение указанных подсистем основано на аналогии с пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором. В данной системе управление запасами рассматривается как центральный элемент, работающий с обратной связью. Его назначение состоит в компенсации отклонений фактической производительности производственной системы от требуемого уровня. По выполняемой функции данный компонент сопоставим с пропорциональным звеном регулятора.

Компонент балансировки серийного и единичного производства предназначен для предотвращения чрезмерного смещения производственной системы в сторону одного из двух режимов - массового выпуска или индивидуального изготовления. Полная ориентация на серийное производство позволяет повысить производительность, однако снижает способность системы учитывать требования персонализированной медицины. Напротив, преобладание индивидуальных заказов повышает чувствительность системы к изменениям спроса и предложения. В связи с этим данный компонент можно рассматривать как аналог интегрирующей составляющей регулятора, обеспечивающей выравнивание производственной стратегии во времени.

Прогнозирование спроса, в свою очередь, направлено на повышение устойчивости системы при воздействии внешних возмущений, временных задержек и иных факторов, способных нарушать

Таблица 1. Направления интеллектуализации медицинской логистической цепи поставок

Инструмент предиктивной аналитики (программный модуль)	**Исходная информация**	**Инструмент управления в MPL**	**Задача искусственного интеллекта**	**Технология искусственного интеллекта**
Прогнозирование колебаний спроса и предложения	Данные о пациентах и заказах	Планирование продаж и материального обеспечения	Краткосрочное и стратегическое прогнозирование показателей	Искусственная нейронная сеть
Контроль ритмичности производства	Данные системы управления инженерными данными и планирования производства	Баланс штучных и групповых операций в производственной программе	Планирование ресурсов	Мультиагентная технология
Управление запасами	Данные о заказах и складских запасах	Планирование производства и закупок	Поддержка принятия решений	Моделирование и оптимизация в ограничениях



Рис. 2. Система управления медицинской логистической цепью поставок

стабильность производственного процесса. По своей роли этот компонент соответствует дифференцирующему звену регулятора, поскольку позволяет заранее учитывать возможные изменения состояния системы.

Для практической реализации указанных компонентов было создано программное обеспечение, осуществляющее прогнозирование и моделирование производственной системы в составе единой цифровой платформы мониторинга и поддержки принятия решений. При решении задачи прогнозирования спроса наиболее обоснованным является применение искусственных нейронных сетей. Данный подход позволяет обрабатывать и обобщать статистические данные о колебаниях спроса на медицинские услуги, а также на необходимые для их оказания устройства и изделия. На этой основе возможно формирование краткосрочных и долгосрочных прогнозов по нескольким сценариям: оптимистичному, пессимистичному и реалистичному.

В рамках настоящего исследования нейросетевое прогнозирование рассматривается как функциональный компонент архитектуры MPL, предназначенный для формирования входного прогнозного сигнала для имитационной модели. Отдельное обучение нейронной сети и оценка качества прогноза по метрикам машинного обучения в данной работе не выполнялись, поскольку основной акцент сделан на проверке управляющей логики медицинской логистической цепи поставок. В имитационном эксперименте прогнозный компонент представлен через сценарное изменение входного потока заявок, что позволяет оценить влияние прогнозируемой динамики спроса на управление запасами и производственную нагрузку. Разработка и валидация самостоятельной нейросетевой модели прогнозирования спроса рассматриваются как направление дальнейших исследований.

Управление запасами относится к числу традиционных задач организации производства. Однако в рассматриваемом случае его специфика заключается в необходимости совместного анализа нескольких групп данных: результативности оказания медицинских услуг, динамики спроса, возможностей производственной системы, текущего состояния складских запасов и объёмов незавершённого производства. Для решения данной задачи была разработана имитационная модель, основанная на положениях теории ограничений. Такая модель может быть адаптирована к параметрам и условиям функционирования конкретной производственной системы.

Задача балансировки серийного и единичного производства заключается в определении рационального соотношения между различными типами производственных предприятий, участвующих в выпуске комплектующих и выполнении сборочных операций. При этом учитываются как специализация предприятий, так и возможности доступного производственного оборудования. Анализ существующих технологий разработки программных комплексов для производственного планирования показал, что перспективным направлением решения данной задачи является использование мультиагентных технологий.

В мультиагентной модели каждый участник производственно-логистического взаимодействия представляется в виде программного агента, обладающего собственными целями, ресурсами и ограничениями. Процесс планирования в этом случае интерпретируется как имитация взаимодействия агентов, в ходе которого они согласуют свои действия и приходят к компромиссному решению за счёт взаимных уступок. Преимущество данного подхода состоит в возможности гибкого и адаптивного планирования в условиях неопределённости. Вместе с тем его ограничением является вероятность получения локально оптимальных решений, не всегда соответствующих глобальному оптимуму всей системы.

При моделировании взаимодействия участников цепи поставок мультиагентная модель ограничивается составом известных участников рынка. Логика выбора компромиссного решения для каждого агента может быть формализована на основе текущих показателей эффективности его деятельности. В качестве механизма поиска коллективного компромисса был применён метод аукциона. Разработанное программное обеспечение позволяет воспроизводить процесс взаимодействия участников медицинской логистической цепи поставок и определять рациональный баланс между преимущественным привлечением серийных производителей и участием малых научно-производственных предприятий, ориентированных на единичное производство.

В рассматриваемой постановке мультиагентное взаимодействие включает три основных типа агентов: агент медицинской организации, формирующий потребность в продукции; агент серийного производителя, отвечающий за выпуск унифицированных компонентов; агент научно-производственного предприятия, обеспечивающий изготовление персонализированных компонентов. Координация между агентами реализуется как процедура согласования производственного задания, в ходе которой каждый агент передаёт сведения о доступной мощности, ожидаемом сроке выполнения и ограничениях по ресурсам. На основании этих данных формируется множество допустимых вариантов распределения заказа, после чего с использованием аукционного механизма выбирается вариант, обеспечивающий приемлемый компромисс между сроком выполнения, загрузкой участников и потребностью в персонализации изделия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная выше архитектура медицинской логистической цепи поставок была реализована и апробирована для ряда проектов по разработке и реализации медицинских изделий и медицинской техники. Апробация предложенного подхода выполнена средствами имитационного моделирования в среде AnyLogic. В примере разработки продуктовой линейки персонализированных имплантатов в рамках проведенного исследования было проведено тестирование и апробация предложенных способов интеллектуализации медицинской цепи поставок. Покажем, что предложенные способы интеллектуализации, взятые по отдельности, и совместно, позволяют гармонизи-

ровать потоки и операции медицинской логической цепи поставок и добиться согласования спроса и предложения, взятого в качестве основного параметра эффективности.

Реализованная модель имитирует логистическую цепь поставок персонализированных имплантатов, включая процессы получения данных пациента, проектирования индивидуализированных компонентов и последующего производства и установки. Проектные агенты в модели представляют собой пациентов, которые последовательно проходят этапы от диагностических процедур и разработки цифровой модели изделия до производства стандартных и персонализированных компонентов и финальной установки имплантата.

Основная логистическая процедура моделирует процесс производства персонализированного имплантата и его последующей поставки, представляя логистическую цепочку как совокупность взаимосвязанных этапов. Процесс включает разделение потока на изготовление индивидуализированных компонентов и производство унифицированных частей. После завершения производственных этапов выполняется сборка полного комплекта, необходимого для дальнейшей передачи в лечебное учреждение для установки. Модель учитывает логистические задержки, вариативность сроков операций, управление запасами и вероятность срывов поставок, что позволяет анализировать влияние неопределенностей на эффективность цепочки поставок.

Модель разработана для оценки эффективности логистической цепочки и управления запасами при различных условиях спроса и стратегии поставок. Исследование проводится в рамках трех сценариев:

- прогнозирование спроса и предложения: сценарий, в котором объем производства и закупок деталей определяется прогнозируемым спросом;
- управление запасами склада: сценарий, ориентированный на анализ механизмов пополнения комплектующих, чтобы складские ресурсы поддерживались на достаточном уровне, и не допускался их дефицит в процессе производства и поставок;
- регулярные поставки: сценарий, в котором заказы на комплектующие размещаются чаще, что позволяет сгладить колебания запасов, снизить пиковую нагрузку на логистику и повысить гибкость управления поставками.

Параметры имитационной модели заданы как условия вычислительного эксперимента, направленного на проверку работоспособности предложенной схемы управления. Указанные значения не рассматриваются как нормативные клинические или производственные показатели, а используются для воспроизведения типовой ситуации неопределённости спроса, вариативности длительности операций и риска нарушения поставок. При этом сопоставление моделей выполняется при одинаковых исходных параметрах, что позволяет оценивать не абсолютные значения показателей, а относительный эффект от внедрения управляющего контура. Временные характеристики операций заданы в виде вероятностных распределений, что обеспечивает учёт нестабильности сроков выполнения отдельных этапов логистической цепи поставок.

Исходные данные, параметры и характеристики модели представлены в таблицах 2 и 3. Горизонт имитационного моделирования составляет 120 дней. Временные параметры заданы в днях.

Таблица 2. Временные характеристики операций

Элемент	Название в модели	Продолжительность, дней
Моделирование изделия	delayModeling	Нормальное распределение, среднее 14, стандартное отклонение 1
Производство персонализированных компонентов	delayPerson	Нормальное распределение, среднее 30, стандартное отклонение 7
Поставка заготовок	waitStorage	Нормальное распределение, среднее 20, стандартное отклонение 3, с вероятностью на срыв поставки (10%)
Производство унифицированных компонентов	delayStandart	Нормальное распределение, среднее 30, стандартное отклонение 7

Принятые параметры позволяют воспроизвести условия, при которых логистическая цепь функционирует в режиме неопределённости: длительность операций имеет вероятностный характер, поставки могут нарушаться, а складские запасы ограничены заданными пороговыми значениями.

Таблица 3. Исходные параметры имитационной модели

Параметр	Название в модели	Значение / единица измерения	Обоснование использования
Точка перезаказа заготовок	*reorderPoint*	50 ед.	Пороговое значение складского остатка, при достижении которого инициируется пополнение запасов
Объём заказа заготовок	*orderQuantity*	100 ед.	Фиксированный объём пополнения в базовой модели
Вероятность срыва поставки	*failureChance*	0,1	Модельное значение, отражающее риск нарушения сроков поставки
Максимальный срок хранения заготовок на складе	*maxStorageDays*	60 дней	Ограничение на длительность хранения складских ресурсов
Вместимость блоков	*capacityModeling, capacityStandart, capacityPerson, capacityStorage*	200 заявок / ед.	Ограничение пропускной способности соответствующих блоков модели
Максимальный срок выполнения заказа	*deadlineTime*	80 дней	Целевой срок, используемый для оценки доли пациентов, обслуженных в срок

Поэтому дальнейшее сравнение сценариев направлено не на оценку конкретной производственной организации, а на проверку поведения модели при различных вариантах управления запасами и производственной нагрузкой.

Для оценки эффективности сценариев были построены графики сравнения сценариев покрытия спроса, представленные на Рис. 3.

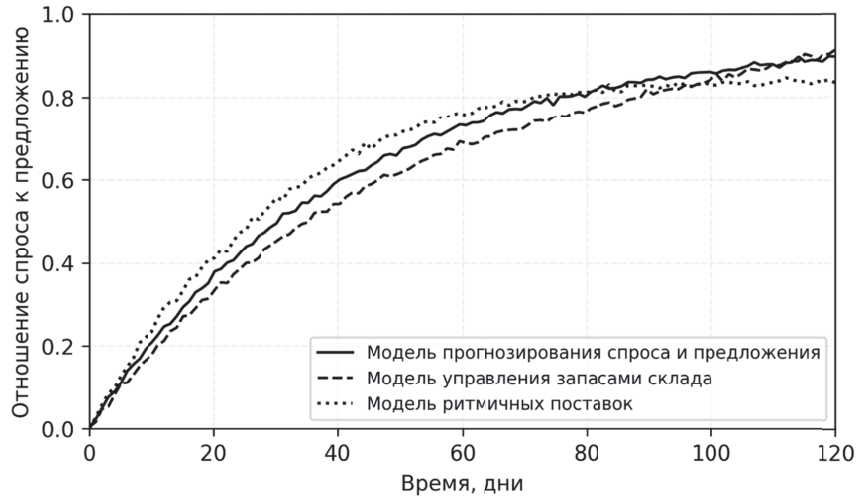

Рис. 3. Результаты имитационного моделирования

По оси X отложено время имитационного прогона в днях, по оси Y - отношение спроса к предложению, отражающее степень покрытия потребности в производимой продукции. Сопоставление трёх сценариев показало, что при заданных условиях моделирования различия между ними выражены недостаточно явно. Это свидетельствует не об эквивалентности рассматриваемых подходов, а об ограниченности статических правил управления, используемых в базовой модели. Полученный результат показал, что изменение сценария поставок или порядка пополнения запасов не обеспечивает выраженного повышения устойчивости логистической цепи при наличии неопределённости спроса и риска срыва поставок. Поэтому дальнейшая модификация модели была направлена на включение адаптивного управляющего контура, способного учитывать текущее отклонение запасов, накопленный дисбаланс производственных сценариев и тренд изменения спроса.

В целях повышения устойчивости имитационной модели логистики имплантатов была выполнена модификация базовой модели за счёт включения управляющего контура. В исходной версии модели управление потоком заказов и распределением производственной нагрузки осуществлялось преимущественно на основе фиксированных условий и пороговых значений. Такой подход позволял воспроизводить общий ход логистического процесса, однако ограничивал возможности адаптивной реакции модели на изменение спроса, накопление дефицита и дисбаланс между серийным и единичным производством.

Модифицированная имитационная модель представлена на Рис. 4. Обобщённая характеристика программной реализации компонентов контура управления приведена в Таблице 4. Таким образом, модель была переведена от статической логики управления к адаптивной схеме, учитывающей текущее состояние системы, накопленные отклонения и прогнозируемую динамику потребления.

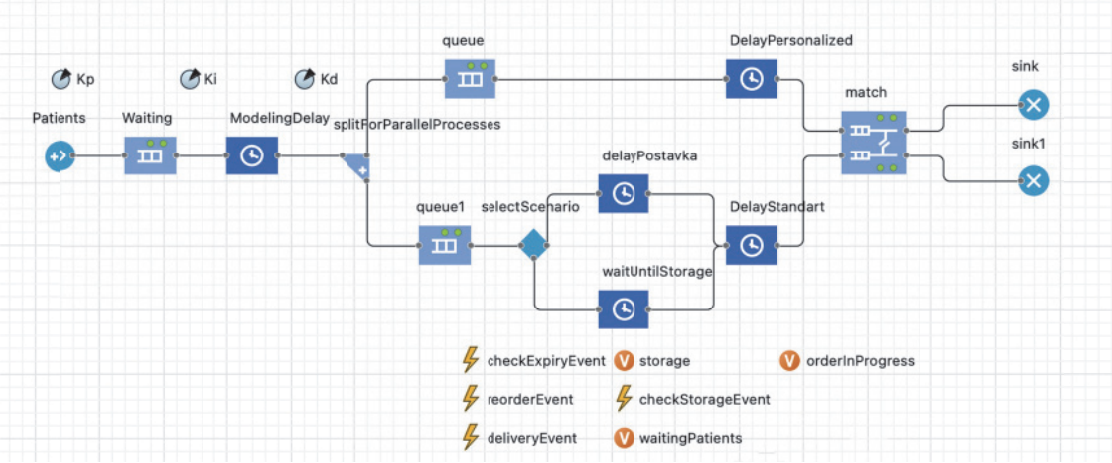

Рис. 4. Имитационная модель производственной системы медицинской логистической цепи поставок

В результате модификации модели были изменены ключевые события, отвечающие за проверку складских остатков, формирование заказа, поступление поставки и обновление статистики производственной нагрузки. В событие *reorderEvent* был добавлен расчёт тренда спроса, эффективной точки перезаказа и динамического объёма заказа. Событие *deliveryEvent* стало использовать объём заказа, рассчитанный пропорциональным звеном. В событие *productionLoadUpdate* был включён блок интегральной коррекции, отвечающий за накопление дисбаланса и изменение вероятности выбора сценария. Кроме того, в ежедневное обновление статистики была добавлена фиксация единиц произведенной продукции для последующего расчёта тренда спроса.

Таблица 4. Реализация компонентов контура управления

Реализация в модели	Основная функция
Параметр *Kp*, переменная *pendingOrderQty*, событие *reorderEvent*	Расчёт объёма заказа пропорционально величине текущего дефицита
Параметр *Ki*, переменные *imbalanceIntegral* и *scenarioProbability*, событие *productionLoadUpdate*	Накопление дисбаланса загрузки производств и коррекция вероятности выбора сценария
Параметр *Kd*, коллекция *dailyArrivals*, событие обновления статистики	Оценка тренда спроса и упреждающее изменение эффективной точки перезаказа
Поле агента *Patient.usePersonalized*	Фиксация сценария движения пациента в момент генерации агента

Для снижения влияния случайных отклонений оценка эффективности выполнялась не по единичному значению отдельного показателя, а по сопоставлению динамики ключевых характеристик в базовой и модифицированной моделях при одинаковых условиях имитационного эксперимента. Для сопоставления результатов были использованы три ключевых показателя: среднее время выполнения заказа, доля пациентов, обслуженных в срок, и динамика произведенных изделий. Графическое сравнение результатов реализации базовой модели и модели с регулятором представлено на Рис. 5.

Полученные результаты подтверждают работоспособность реализованной логики управления в рамках принятой имитационной модели. Согласно результатам моделирования, вероятность дефицитного сценария снизилась с 0,50 до 0,30, а эффективная точка перезаказа изменялась в диапазоне от 41 до 57 единиц, что отражает адаптацию модели к изменению скорости потребления.

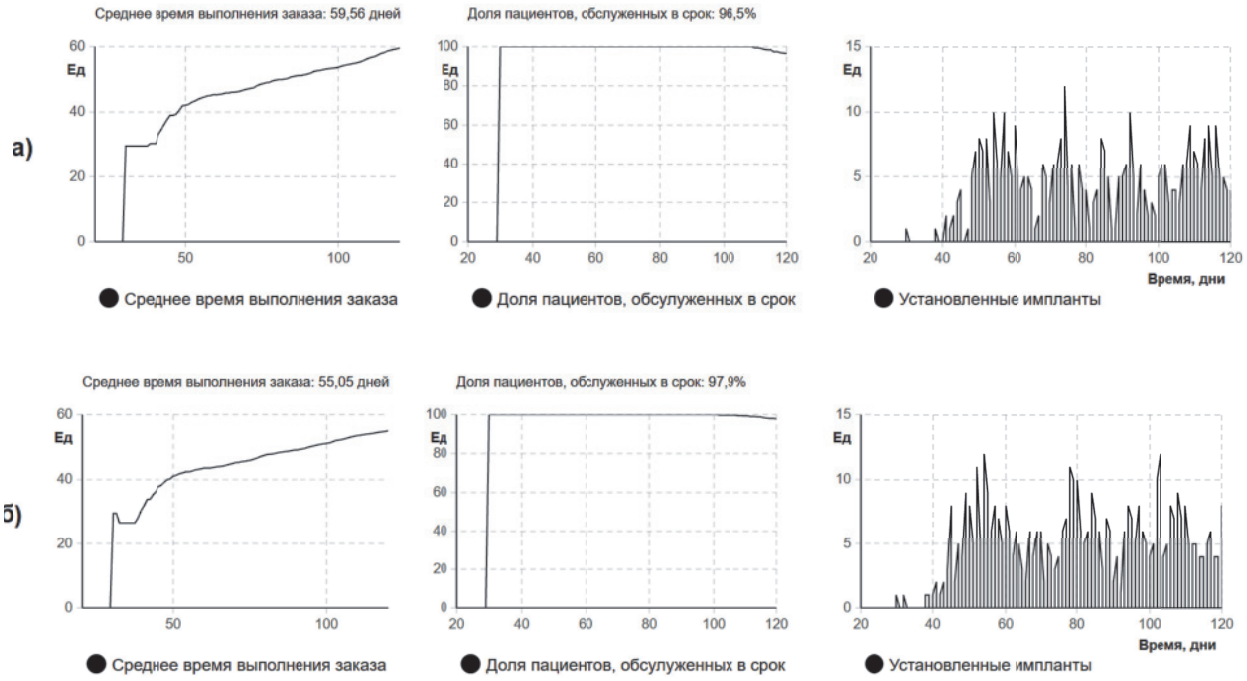

Рис. 5. Сравнение динамики ключевых показателей медицинской логистической цепи поставок:
а) базовая модель; б) модель с регулированием

Внедрение системы управления позволило улучшить основные показатели функционирования модели. Среднее время выполнения заказа сократилось с 59,56 до 55,05 дня, то есть на 4,51 дня, или на 7,57 %. Данный эффект связан с совместным действием пропорционального и дифференциального звеньев: первое обеспечивает более точный расчёт объёма заказа при возникновении дефицита, второе заранее корректирует точку перезаказа при изменении тренда спроса. Одновременно доля пациентов, обслуженных в срок, увеличилась с 96,5 до 97,9 %, что указывает на повышение устойчивости логистического процесса и более равномерное распределение производственной нагрузки.

Таким образом, объединение механизмов управления запасами, балансировки производственных сценариев и прогнозирования спроса в едином контуре управления позволяет повысить адаптивность медицинской логистической цепи поставок MPL. Полученные результаты показывают, что предложенная модификация снижает среднее время выполнения заказа и повышает вероятность своевременного обслуживания пациентов за счёт более устойчивого согласования спроса, складских запасов и производственных возможностей.

Следует отметить, что полученные результаты характеризуют вычислительный эксперимент, выполненный при заданных модельных параметрах и принятой структуре имитационной модели. Поэтому они не должны интерпретироваться как универсальная количественная оценка эффективности MPL для всех типов медицинских изделий. Практическое применение предложенного подхода требует дополнительной параметризации модели на основе данных конкретной медицинской организации, производственного предприятия и состава участников логистической цепи поставок. Вместе с тем результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенной управляющей схемы и возможность её дальнейшей адаптации к реальным условиям производственной кооперации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и апробирован подход к автоматизированному управлению медицинской логистической цепью поставок на основе сочетания прогнозирования спроса, управления запасами и балансировки производственных сценариев. Полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода для согласования спроса, складских запасов и производственных возможностей участников медицинской логистической цепи поставок. Проведённое исследование позволило определить основные узкие места и точки применения технологий искусственного интеллекта, связанных с прогнозированием спроса, управлением запасами и поддержкой принятия решений при балансировке серийных и единичных операций. Это особенно важно для высокотехнологичного здравоохранения, где производство медицинских изделий и медицинской техники должно учитывать требования персонализированной медицины и необходимость адаптации изделий к индивидуальным характеристикам пациента.

Архитектура медицинской логистической цепи поставок, основанная на концепции виртуального посреднического оператора, может быть использована при разработке систем поддержки принятия решений для управления производственной кооперацией. Внедрение технологий искусственного интеллекта и имитационного моделирования формирует основу для повышения устойчивости логистического процесса в условиях неопределённости спроса, предложения и производственных ограничений. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с параметризацией модели на основе данных конкретных медицинских организаций и производственных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vacar A.* Logistics and supply chain management: an overview // Studies in Business and Economics. – 2019. – Vol. 14, № 2. – P. 209–215. – DOI: 10.2478/sbe-2019-0035.
2. *Dadzie B. E., Amponsah R.* Evaluating the role of logistics in supply chain management // Dama Academic Scholarly Journal of Researchers. – 2025. – Vol. 10, № 1. – P. 112–133. – DOI: 10.4314/dasjr.v10i1.5.
3. *Новиков, Д. А.* Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : URSS : ЛЕНАНД, 2022. – 500 с.
4. *Anaba D. C., Kess-Momoh A. J., Ayodeji S. A.* Optimizing supply chain and logistics management: a review of modern practices // Open Access Research Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 11, № 2. – P. 020–028. – DOI: 10.53022/oarjst.2024.11.2.0083.
5. *Дедов, И. И.* Персонализированная медицина: современное состояние и перспективы / И. И. Дедов, А. Н. Тюльпаков, В. П. [и др.]. // Вестник Российской академии медицинских наук. – 2012. – Т. 67, № 12. – С. 4–12. – DOI: 10.15690/ Чехонин vramn.v67i12.474.
6. *Hofmann E., Osterwalder F.* Third-party logistics providers in the digital age: towards a new competitive arena? // Logistics. – 2017. – Vol. 1, № 2. – Article 9. – DOI: 10.3390/logistics1020009.
7. *Xiong G., Nyberg T. R., Dong X., Shang X.* Intelligent technologies and systems of material management // Intelligent Techniques in Engineering Management: Theory and Applications / ed. by C. Kahraman, S. Çevik Onar. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – P. 295–330. – DOI: 10.1007/978-3-319-17906-3_13.
8. *Иващенко, А. В.* Модель логистической цепи поставок для высокотехнологичной персонализированной медицины / А. В. Иващенко, И. В. Болвашенков // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 9. – С. 63–70. – DOI: 10.17513/snt.40487.
9. *Шарова, Д. Е.* Анализ мирового опыта в регулировании использования медицинских данных для целей создания систем искусственного интеллекта на основе машинного обучения / Д. Е. Шарова, А. А. Михайлова, А. В. Гусев [и др.]. // Врач и информационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 28–39. – DOI: 10.25881/18110193_2022_4_28.
10. *Teixeira A. R., Ferreira J. V., Ramos A. L.* Intelligent supply chain management: a systematic literature review on artificial intelligence contributions // Information. – 2025. – Vol. 16, № 5. – Article 399. – DOI: 10.3390/info16050399.

AUTOMATION OF THE LOGISTICS SUPPLY CHAIN FOR HIGH-TECHNOLOGY HEALTHCARE

© 2026 A.V. Ivashchenko[1], I.V. Bolvashenkov[1,2], M.A. Terekhin[1,2], D.A. Melnikov[1,2]

[1] Samara State Medical University, Samara, Russia
[2] Penza State Technological University, Penza, Russia

The organization of a logistics supply chain for the production of medical devices and medical equipment requires a special approach that takes into account the interaction between manufacturing enterprises, logistics companies, and healthcare organizations. To address this task, methods of organizational systems management, as well as information technologies for forecasting and decision support using elements of artificial intelligence, can be applied. The article proposes the further development of the architecture of the medical logistics supply chain MPL (Medical Party Logistics), aimed at adapting organizational management mechanisms to the conditions of high-technology healthcare and the requirements of personalized medicine. The main focus of the study is the development and simulation modeling of a control loop that integrates demand forecasting, inventory management, and decision support for balancing serial and unit operations. From the standpoint of organizational systems management theory and the theory of constraints, the main points of application of predictive analytics and artificial intelligence technologies in the management of the medical logistics supply chain are identified. Simulation modeling demonstrated the possibility of improving the stability of the logistics process, reducing the average order fulfillment time, and increasing the proportion of patients served within the established time limit. The proposed approach can be used in the development of decision support systems for organizing production cooperation in the creation of innovative medical devices and medical equipment.

Keywords: medical logistics supply chain, high-technology healthcare, personalized medicine, organizational systems management, artificial intelligence, simulation modeling, controller.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-130-140
EDN: RBRQVY

REFERENCES

1. *Vacar A.* Logistics and supply chain management: an overview // Studies in Business and Economics. – 2019. – Vol. 14, № 2. – P. 209–215. – DOI: 10.2478/sbe-2019-0035.
2. *Dadzie B. E., Amponsah R.* Evaluating the role of logistics in supply chain management // Dama Academic Scholarly Journal of Researchers. – 2025. – Vol. 10, № 1. – P. 112–133. – DOI: 10.4314/dasjr.v10i1.5.
3. *Novikov, D. A.* Teorija upravlenija organizatsionnymi sistemami / D. A. Novikov. – 4-e izd., ispr. i dop. – Moskva : URSS : LENAND, 2022. – 500 s.
4. *Anaba D. C., Kess-Momoh A. J., Ayodeji S. A.* Optimizing supply chain and logistics management: a review of modern practices // Open Access Research Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 11, № 2. – P. 020–028. – DOI: 10.53022/oarjst.2024.11.2.0083.
5. *Dedov, I. I.* Personalizirovannaja meditsina: sovremennoe sostojanie i perspektivy / I. I. Dedov, A. N. Tjulpakov, V. P. [i dr.]. // Vestnik Rossijskoj akademii meditsinskih nauk. – 2012. – T. 67, № 12. – S. 4–12. – DOI: 10.15690/ Chehonin vramn.v67i12.474.
6. *Hofmann E., Osterwalder F.* Third-party logistics providers in the digital age: towards a new competitive arena? // Logistics. – 2017. – Vol. 1, № 2. – Article 9. – DOI: 10.3390/logistics1020009.
7. *Xiong G., Nyberg T. R., Dong X., Shang X.* Intelligent technologies and systems of material management // Intelligent Techniques in Engineering Management: Theory and Applications / ed. by C. Kahraman, S. Çevik Onar. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – P. 295–330. – DOI: 10.1007/978-3-319-17906-3_13.
8. *Ivaschenko, A. V.* Model logisticheskoj tsepi postavok dlja vysokotehnologichnoj personalizirovannoj me-ditsiny / A. V. Ivaschenko, I. V. Bolvashenkov // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2025. – № 9. – S. 63–70. – DOI: 10.17513/snt.40487.
9. *Sharova, D. E.* Analiz mirovogo opyta v regulirovanii ispolzovanija meditsinskih dannyh dlja tselej so-zdanija sistem iskusstvennogo intellekta na osnove mashinnogo obuchenija / D. E. Sharova, A. A. Mihajlova, A. V. Gusev [i dr.]. // Vrach i informatsionnye tehnologii. – 2022. – № 4. – S. 28–39. – DOI: 10.25881/18110193_2022_4_28.
10. *Teixeira A. R., Ferreira J. V., Ramos A. L.* Intelligent supply chain management: a systematic literature review on artificial intelligence contributions // Information. – 2025. – Vol. 16, № 5. – Article 399. – DOI: 10.3390/ info16050399.

Anton Ivashchenko, Doctor of Technics, Professor, Director of the Advanced Medical Engineering School.
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com
Ivan Bolvashenkov, Assistant Lecturer at the Advanced Medical Engineering School, Postgraduate Student.
E-mail: i.v.bolvashenkov@samsmu.ru
Mikhail Terekhin, Assistant Lecturer at the Advanced Medical Engineering School, Postgraduate Student.
E-mail: terexin.m.a@yandex.ru
Denis Melnikov, Assistant Lecturer at the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Post-Graduate Student. E-mail: den.melnickov2001@yandex.ru