

## **КОНФИГУРАТОР ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОФИСНОГО СКЛАДА ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗАКАЗОВ**

А.А. Люков<sup>1</sup>, А.М. Тюнина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. Статья посвящена разработке конфигуратора цифровых двойников офисного склада как модуля Java-системы автоматизации заказов. Представлена формализованная дискретно-событийная модель материальных потоков, позволяющая проводить имитационные эксперименты для оценки различных алгоритмов пополнения запасов до их фактического внедрения, снижая риски и повышая обоснованность проектных решений.

Ключевые слова: цифровой двойник, имитационное моделирование, складская логистика, автоматизация заказов, дискретно-событийная модель, управление запасами, Java-система, материальные потоки, САЕ, оптимизация

## **CONFIGURATOR OF DIGITAL TWINS FOR OFFICE WAREHOUSE FOR SIMULATION OF LOGISTICS PROCESSES IN THE ORDER AUTOMATION SYSTEM**

A.A. Lyukov<sup>1</sup>, A.M. Tyunina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The article is devoted to the development of a configurator of digital twins for an office warehouse as a module of a Java-based order automation system. A formalized discrete-event model of material flows is presented, which allows conduct-

ing simulation experiments to evaluate various inventory replenishment algorithms before their actual implementation, reducing risks and increasing the validity of design decisions.

Keywords: digital twin, simulation modeling, warehouse logistics, order automation, discrete-event model, inventory management, Java-based system, material flows, CAE, optimization

Внедрение автоматизированной системы управления заказами офисных расходных материалов неизбежно влияет на организацию складских процессов. Изменяются частота поставок, объём страхового запаса, нагрузка на кладовщика и интенсивность внутренних перемещений. Однако на этапе проектирования трудно точно предсказать, как новые алгоритмы пополнения отразятся на реальной логистике. Ошибки в расчётах могут привести к перегрузке склада, росту времени обработки заявок или, наоборот, к избыточному резервированию площадей и ресурсов. Таким образом, возникает необходимость в инструменте, позволяющем до фактического внедрения протестировать различные сценарии работы склада и оценить их последствия.

Решением данной задачи является разработка конфигуратора цифровых двойников офисного склада как модуля в составе корпоративной Java-системы автоматизации заказов. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физического объекта, отражающую его структуру, параметры и динамику функционирования. В контексте складской логистики цифровой двойник воспроизводит планировку помещения, зоны хранения, маршруты перемещения, характеристики номенклатуры, интенсивность потребления и параметры поставок. Такая модель позволяет проводить имитационные эксперименты в безопасной «песочнице», не вмешиваясь в реальный производственный процесс.

Создание цифрового двойника начинается с формализации исходных данных. В систему загружается план офиса или склада с указанием зон хранения, рабочих мест и логистических маршрутов. Дополнительно задаются параметры функционирования: средняя скорость потребления по каждой позиции, время поставки от поставщика, размер минимальной партии, допустимый уровень страхового запаса, производительность кладовщика и временные затраты на операции приёма и выдачи. На основе этих параметров конфигуратор автоматически генерирует имитационную модель, описывающую материальные потоки во времени.

Математической основой цифрового двойника служит формализованная модель материального потока, представленная в виде дискретно-событийной системы. Состояние склада в момент времени  $t$  может быть описано вектором

$$X(t) = \{I_i(t), Q_i(t), L_i(t), W_i(t)\} \quad (1)$$

где  $I_i(t)$  – текущий уровень запаса  $i$ -й номенклатурной позиции,  $Q_i(t)$  – объём заказанного, но ещё не поступившего товара,  $L_i(t)$  – случайная величина времени поставки, а  $W_i(t)$  – состояние обслуживающего персонала и очереди заявок. Переход системы из одного состояния в другое осуществляется при наступлении событий, таких как поступление партии товара, формирование заявки на выдачу, размещение нового заказа поставщику или завершение операции кладовщика. Каждое событие инициирует изменение параметров модели: обновление складских остатков по правилу:

$$I_i(t + 1) = I_i(t) + P_i(t) - D_i(t) \quad (2)$$

где  $P_i(t)$  – объём поступления,  $D_i(t)$  – спрос за интервал времени; изменение очереди задач кладовщика, перерасчёт времени выполнения операций с учётом производительности  $\mu$  и интенсивности входящего потока заявок  $\lambda$ . В простейшем приближении процесс обслуживания может быть описан как система массового обслуживания типа M/M/1, что позволяет оценить среднее время ожидания и вероятность образования очереди. При необходимости модель расширяется до многоканальной схемы с приоритетами операций. Спрос  $D_i(t)$  в модели может задаваться как детерминированной функцией прогноза, полученного из интеллектуального модуля, либо как случайный процесс с заданным распределением вероятностей, например пуассоновским или нормальным с сезонной компонентой. Время поставки  $L_i(t)$  моделируется как случайная величина с известным математическим ожиданием и дисперсией, что позволяет учитывать риски задержек. На основе этих зависимостей рассчитывается страховой запас  $S_i$  как функция от ожидаемого спроса на период поставки и допустимого уровня риска дефицита, например  $S_i = z * \sigma_i * \sqrt{L_i}$ , где  $z$  – коэффициент надёжности,  $\sigma_i$  – стандартное отклонение спроса. Благодаря формализованному описанию становится возможным анализ динамики системы в различных сценариях, включая пиковые нагрузки, рост интенсивности заявок или нарушение сроков поставок.

Особую ценность цифровой двойник представляет при сравнении различных алгоритмов пополнения запасов. В виртуальной среде можно протестировать классические методы, такие как ABC- и XYZ-анализ, фиксированный размер заказа или периодический пересмотр запасов, а также интеллектуальные

предиктивные алгоритмы, основанные на машинном обучении. Для каждого сценария рассчитываются показатели эффективности, формализованные в виде целевой функции оптимизации. К таким показателям относятся средний уровень запасов, вероятность дефицита, суммарные издержки хранения и заказа, время обработки заявок и коэффициент загрузки персонала. Минимизация данной функции в рамках имитационного эксперимента позволяет подобрать оптимальные параметры политики пополнения. Сравнительный анализ позволяет определить оптимальные параметры ещё до внедрения изменений в реальную систему.

Интеграция конфигуратора цифровых двойников в существующую Java-архитектуру осуществляется по модульному принципу. Модуль симуляции взаимодействует с базой данных системы заказов, получая актуальные сведения о номенклатуре и потреблении, а также с аналитическим блоком, который предоставляет прогнозные данные. Результаты моделирования визуализируются в пользовательском интерфейсе в виде графиков динамики запасов, тепловых карт загрузки склада и статистических отчётов. Это обеспечивает прозрачность проектных решений и облегчает коммуникацию между ИТ-специалистами и руководством.

Применение цифрового двойника позволяет существенно снизить риски внедрения новых алгоритмов автоматизации. Вместо экспериментирования на реальном складе организация получает возможность проверить гипотезы в виртуальной среде, оценить чувствительность системы к изменению параметров и выявить потенциальные узкие места. Например, можно определить, приведёт ли уменьшение страхового запаса к росту дефицита при определённой задержке поставки или насколько увеличится нагрузка на кладовщика при переходе на более частые, но мелкие поставки.

Кроме того, цифровой двойник способствует формированию адаптивной логистической стратегии. По мере накопления данных модель может уточняться и калиброваться, что повышает точность прогнозов и реалистичность симуляций. В перспективе возможно автоматическое обновление параметров двойника на основе фактических показателей, что создаёт замкнутый контур анализа и оптимизации. Таким образом, система автоматизации заказов приобретает свойства самообучающейся и предсказуемой среды управления материальными потоками.

С точки зрения методологии систем автоматизации проектирования, внедрение цифрового двойника реализует принципы CAE, предполагающие использование вычислительных экспериментов для обоснования инженерных решений.

Если традиционная система заказов ориентирована на эксплуатацию, то интеграция модуля симуляции переводит её в категорию инструментов проектирования. Руководитель получает возможность не только управлять текущими процессами, но и конструировать их конфигурацию, выбирая оптимальные параметры до физической реализации.

В результате конфигуратор цифровых двойников офисного склада становится важным элементом интеллектуальной экосистемы предприятия. Он обеспечивает обоснованность решений по настройке автоматизации, снижает финансовые и организационные риски, повышает прозрачность логистических процессов и способствует более рациональному использованию ресурсов. Интеграция принципов автоматизации проектирования в систему управления заказами позволяет создавать адаптивные и устойчивые модели материальных потоков, отвечающие требованиям современной цифровой экономики.

### **Список литературы**

1. Лычкина, Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. – Казань: Издательство АН РТ, 2023. – С. 139-149. – EDN ZAOYZG.
2. Помогаев, Н. Д. Использование технологии цифровых двойников в образовательном процессе: на примере цифрового двойника стада / Н. Д. Помогаев, В. М. Скосырева // Высшее образование для XXI века: Цифровая трансформация общества: новые возможности и новые вызовы : Доклады и материалы XVI Международной научной конференции: в 2 ч. (онлайн-формат), Москва, 18–19 ноября 2020 года. Том Часть I. – Москва: Московский гуманитарный университет, 2020. – С. 516-519. – EDN YQEFIP.
3. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин [и др.] // Вестник Восточно-Сибирской Открытой Академии. – 2019. – № 32. – С. 2. – EDN ZAXCOT.

### **References**

1. Lychkina, N. N. The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin / N. N. Lychkina, V. V. Pavlov // Simulation

modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023) : Proceedings of the Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its application in Science and Industry, Kazan, October 18-20, 2023. – Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2023. – pp. 139-149. – EDN ZAOYZG.

2. Pomogaev, N. D. The use of digital twin technology in the educational process: on the example of a digital twin herd / N. D. Pomogaev, V. M. Skosyreva // Higher Education for the 21st Century: The Digital Transformation of Society: new opportunities and new challenges : Reports and proceedings of the XVI International Scientific Conference: at 2 a.m. (online format), Moscow, November 18-19, 2020. Volume Part I. – Moscow: Moscow University of the Humanities, 2020. – pp. 516-519. – EDN YQEFIP.

3. Digital twins and the digital transformation of defense industry enterprises / A. I. Borovkov, Yu. A. Ryabov, K. V. Kukushkin [et al.] // Bulletin of the East Siberian Open Academy. - 2019. – No. 32. – p. 2. – EDN ZAXCOT.