

На правах рукописи

Киндинова Виктория Валерьевна

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕКТА
СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ**

Специальность: 05.13.18

«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва — 2018

Работа выполнена на кафедре 806 «Вычислительной математики и программирования» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный кандидат физико-математических наук, доцент
руководитель: **Кузнецова Елена Владимировна**

Официальные **Малашенко Юрий Евгеньевич**
оппоненты: доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», заведующий сектором Исследования операций

Лупин Сергей Андреевич

кандидат технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
организация: Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Защита состоится «__» _____ 2018 г. в __ часов __ мин на заседании диссертационного совета Д 002.073.04 при Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 9(конференц-зал, 1-й этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по адресу: Москва, ул. Вавилова, д. 40.

Электронные версии диссертации и автореферата размещены на официальном сайте ФИЦ ИУ РАН по адресу: <http://www.frccsc.ru>.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ по адресу: <http://vak.ed.gov.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 9, ФИЦ ИУ РАН, диссертационный совет Д 002.073.04.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Телефон для справок: +7(499)135-51-64

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.073.04
доктор технических наук, профессор

В.Н. Крутько

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для эксплуатантов авиационной техники и авиаремонтных организаций актуальной является задача эффективного функционирования складов авиазапчастей, которая может быть решена с помощью информационных технологий в рамках концепции CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support).

Наиболее распространенными системами управления объектом складской логистики (ОСЛ), в том числе ОСЛ по хранению авиационно-технического имущества (АТИ), являются системы WMS (Warehouse Management system). Основное назначение WMS — выполнение учетных функций, включающих анализ текущей загрузки склада. Системы такого класса не позволяют анализировать логистические процессы в динамике, не помогают найти ответ на вопрос «что будет, если...», что делает их малоэффективными при выработке стратегических и тактических управленческих решений. Поэтому актуальной задачей является разработка инструментария по поддержке принятия управленческих решений для ОСЛ через разработку моделей, алгоритмов и программ анализа логистических процессов как динамически развивающихся.

Цель работы — разработать модели с использованием структурно-функционального, аналитического и имитационного моделирования и на их основе построить комплексную имитационную моделирующую систему (*КИМ-систему*) в качестве системы поддержки принятия решений (СППР) для анализа и управления операционными процессами объекта складской логистики на примере склада авиазапчастей. Это соответствует областям исследований, определенным в паспорте 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (п.5, п.8).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести статистический и структурный анализ входного и выходного потоков на ОСЛ АТИ. Формализовать на структурно-функциональном уровне существующие операционные процессы и выделить показатели качества функционирования.

2. Разработать концептуальное представление моделей ОСЛ и принципы их взаимодействия.
3. Разработать подход к моделированию входного потока, представляющего неординарный неоднородный поток, заявки которого претерпевают многократное расщепление.
4. Разработать подход к генерации неординарного входного потока.
5. Разработать *КИМ-систему*, реализующую предложенные модели и алгоритмы, и продемонстрировать использование *КИМ-системы* на практических примерах.

Объект исследования. В работе исследуются операционные процессы ОСЛ.

Предмет исследования — модели, алгоритмы и программное обеспечение, применяемые для анализа операционных процессов и управления сложными логистическими объектами.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы: системный анализ, статистический анализ, имитационное моделирование (ИМ), аналитическое моделирование, технологии программирования, технологии моделирования бизнес-процессов, теория планирования вычислительного эксперимента.

Научная новизна работы.

Предложен комплексный подход к анализу и управлению операционными процессами ОСЛ, предполагающий совместное использование структурно-функционального, аналитического и имитационного моделирования, что позволяет взаимно компенсировать объективно существующие недостатки и ограничения каждого из видов моделирования.

Выполнена проверка адекватности имитационной модели ОСЛ, что повышает убедительность результатов вычислительных экспериментов и степень обоснованности принятия управленческих решений.

В рамках абстрактной модели функционирования ОСЛ построено концептуальное представление моделей *КИМ-системы* на основе агрегативного подхода, позволяющее выявлять и единообразно описывать элементы моделей, их

взаимодействие между собой и с внешней средой, что упрощает реализацию моделей на ЭВМ с использованием объектно-ориентированного подхода (ООП).

Предложен принцип взаимодействия моделей в рамках *КИМ-системы*, позволяющий расширять *КИМ-систему* путем добавления новых моделей.

Предложен агентный подход к имитационному моделированию неординарного, неоднородного входного потока. Применение агентного подхода дает возможность быстро и с минимальными затратами адаптировать систему к изменяющимся условиям функционирования.

Предложен подход к генерации случайного входного потока, структура которого инвариантна к его интенсивности.

Практическая значимость.

- *КИМ-система* позволяет проводить оценку эффективности диспетчерских протоколов, прописанных в WMS (Warehouse Management system), используется для сравнения сценариев планируемых изменений в технологии обработки реального материального потока заявок, позволяет лицу, принимающему решение (ЛПР), выявлять узкие места технологических процессов и анализировать способы их устранения.
- *КИМ-система* позволяет ЛПР оперативно перенастраивать параметры функционирования складского комплекса в зависимости от основных характеристик грузопотока, таких как приоритетность в обработке поставляемых грузов и/или объемно-временных показателей.
- Использование *КИМ-системы* на ранних стадиях обработки списка заказов и планов поставок позволяет уменьшить время обработки и выполнения пользовательских заказов.
- В *КИМ-системе* предусмотрены интерфейсы, позволяющие задавать управляющие параметры и представлять результаты моделирования в информативном и наглядном виде.
- *КИМ-система* может быть использована как независимый программный модуль прототипирования операционных процессов складского комплекса для

иллюстрации в динамике всех этапов переработки входного потока заявок, а также для обучения и повышения квалификации персонала.

Внедрение результатов. Модели *КИМ-системы* внедрены в состав программно-аналитического обеспечения ряда логистических предприятий, а также в учебный процесс кафедры Вычислительной математики и программирования МАИ в виде базового средства обучения по курсу “Имитационное моделирование в экономике и финансах”.

Апробация работы. Результаты докладывались и обсуждались на V и VI Всероссийских конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Москва, 2008, 2009), на VII, VIII, IX, X, XI Международных конференциях по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016), на XVI и XVII международных школах-семинарах “Новые Информационные Технологии” (Судак, 2008, 2009), на XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта 2009, 2011, 2013, 2015, 2017), на Четвертой, Пятой, Шестой, Седьмой, Восьмой Всероссийских научно-практических конференциях по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург-2009, 2011, 2017, Казань-2013, Москва-2015), на VII Международной научной конференции “Перспективы развития логистики и управления цепями поставок” (Москва-2017). Работа прошла обсуждение на семинаре кафедры “Математики и моделирования социально-экономических процессов” РАНХиГС СЗИУ (Санкт-Петербург, 20.10.2011), на семинаре кафедры “Вычислительной математики и программирования” МАИ (Москва, 11.05.2012, 19.12.2012, 15.05.2017, 12.10.2017), на семинаре отдела “Математическое моделирование экономических систем” ВЦ РАН (Москва, 24.10.2012, 24.05.2017), на семинаре отдела “Имитационные системы и исследование операций” ФИЦ ИУ РАН (Москва, 10.10.2015), на научном семинаре Института прикладной математики им.

М.В. Келдыша РАН (20.06.2017), на научном семинаре ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова (05.07.2017), на научном семинаре СПИИРАН (06.07.2017).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 работ, из них четыре статьи в журналах из списка ВАК и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи и методические основы исследования, определена научная и практическая значимость работы, описана ее структура.

В первой главе дается обзор существующих логистических технологий и программных систем, реализующих эти технологии. Обзор работ отечественных и зарубежных ученых в области логистики: А.М. Гаджинского, Ю.М. Неруша, В.И. Сергеева, Ю.И. Толуева, С. Питеркина, Н. Оладова, Д. Исаева, Д. Бауэрсокса, Д. Вуда, Д. Вордлоу, Д. Джонсона, М. Дитриха, Д. Клосса, П. Мерфи, Д. Уотерса, - показал, что существующие подходы к реинжинирингу операционных процессов сводятся к расчетам, использующим статистический анализ работы ОСЛ. Обзор работ зарубежных и российских ученых в области математического моделирования: Н.П. Бусленко, В.В. Калашникова, Н.Н. Моисеева, М.Д. Месаровича, Ю.Н. Павловского, А.Д. Цвиркуна, Б.В. Соколова, Р.М. Юсупова, Ю.И. Рыжикова, С.В. Маклакова, Я. Такахара, А. Лоу, В. Кельтона, Р. Шеннона, - показал эффективность привлечения методов системного анализа для исследования процессов функционирования производственно-технологических объектов. Один из важнейших инструментов прикладного системного анализа – компьютерное моделирование, к которому относятся аналитическое, структурно-функциональное моделирование и имитационное моделирование.

Модели, разработанные с использованием аналитических методов, описывают функционирование ОСЛ с сильными ограничениями по уровню

детализации. Так, методы теории массового обслуживания (ТМО) не позволяют адекватно описать входной товарный поток, объективно неординарный, претерпевающий многократные расщепления, а затем слияния заявок. Методологии структурно-функционального моделирования позволяют описывать свойства и структуру ОСЛ в статике, при этом адекватное моделирование процессов достигается за счет роста структурных и функциональных описаний, что не облегчает процесс исследования объекта. Для исследования процессов ОСЛ наиболее часто используется имитационное моделирование, которое дает возможность исследовать функционирование процессов ОСЛ в динамике и оперативно анализировать последствия принимаемых решений. Однако данный подход имеет ряд недостатков, в числе которых отсутствие обоснованных принципов построения имитационных моделей для широкого класса систем; необходимость большого числа испытаний для получения вероятностных характеристик процессов ОСЛ; ограничения при решении задач оптимизации. Указанные недостатки перечисленных подходов приводят к необходимости совместного использования аналитического, структурно-функционального и имитационного моделирования в рамках концепции комплексного моделирования.

Коммерческие программные комплексы на основе ИМ носят закрытый характер – подходы и методы, используемые при построении имитационных моделей, известны лишь в общих чертах. Отчеты по результатам внедрения имитационных систем не опубликованы, что затрудняет оценку качества полученных решений. В связи с этим актуальной задачей является разработка моделей, алгоритмов и программ для системного анализа и управления операционными процессами ОСЛ с применением концепции комплексного моделирования с целью повышения эффективности функционирования. Показателями эффективности функционирования ОСЛ будем считать показатели, принятые в ТМО, характеризующие производительность и загрузку ОСЛ. Повышение эффективности функционирования ОСЛ должно достигаться за счет эффективного распределения людских ресурсов ОСЛ и совершенствования

алгоритмов логистических процессов. При решении задачи распределения людских ресурсов по этапам обработки возникает научно-техническая проблема, состоящая в разрешении конфликта между качеством и стоимостью обслуживания входного потока товара. В настоящее время *КИМ-система* включает две модели ОСЛ: аналитическую (*АН-модель*) и имитационную (*ИМ-модель*).

Во второй главе формализованы данные об объекте моделирования – ОСЛ АТИ. Разработаны схемы и диаграммы, описывающие структуру грузопотока, маршруты перемещения, геометрию ОСЛ. Проанализирована экспертная и статистическая информация о процессах функционирования ОСЛ, разработаны диаграммы технологических процессов методами структурно-функционального моделирования.

Согласно методологии системного анализа разработано описание абстрактной модели функционирования ОСЛ, включающее следующие положения:

- ОСЛ – многономенклатурный, транзитного типа, не предназначенный для длительного хранения. Основное назначение: принять оптовые партии товара от различных поставщиков, скомплектовать партии под заказ и отгрузить мелкооптовым покупателям.
- Пользовательский заказ содержит совокупность требуемых позиций номенклатурных единиц (неделимых единиц товара) в определенном количестве. Заказ поступает в условиях неопределенности, связанной с моментом поступления и составом заказа. Должен быть исполнен за регламентированный интервал времени.
- Пополнение ОСЛ осуществляется с изменяющейся интенсивностью в условиях неопределенности, связанной с моментом поступления поставки.
- Функционирование ОСЛ осуществляется в n последовательных этапов от прихода товара до отгрузки товара заказчику.

Для ОСЛ АТИ количество этапов обработки $n=3$: I этап – приемки, II этап – размещения на хранение, III этап – комплектации и отгрузки пользовательского

заказа. В работе исследуются процессы I этапа, которые начинаются с момента перемещения паллет с разгрузочного пандуса (начало зоны ответственности сотрудников этапа приемки). Процессы парковки (предшествующие I этапу) и размещения на хранение (II этап) рассматриваются как граничащие и взаимодействующие с процессами I этапа. Паллеты на разгрузочном пандусе ожидают начала обработки на I этапе.

По весогабаритным характеристикам каждая номенклатурная единица (далее деталь) относится к одному из двух видов: габаритная или негабаритная. Каждый вид деталей обрабатывается в своей области i -ого этапа в соответствии со своим технологическим процессом. Соответственно, входной поток перед поступлением на I этап разбивается на два подпотока $j=1,2$ габаритных/негабаритных деталей. Точнее, на разгрузочном пандусе паллеты образуют две очереди: очередь паллет с габаритными и очередь паллет с негабаритными деталями. Обработку j -ого подпотока на i -ом этапе выполняют определенные сотрудники с заданной производительностью $p_{i,j}$, $i=1..3, j=1..2$.

Разработано концептуальное представление моделей ОСЛ на основе агрегативного подхода Бусленко¹, использующего понятие *агрегата* как абстрактной схемы функционирования сложной системы, а также понятие агрегативной системы (A – системы) как сложной системы, которая сама является агрегатом и для которой существует расчленение на агрегаты.

ОСЛ как сложную систему (далее *S-систему*) можно рассматривать на разных уровнях абстракции: уровень $k=0$, когда система представлена как черный ящик; уровень $k \geq 1$, когда система представлена совокупностью $l=1, \dots, M^k$ взаимосвязанных подсистем. Каждую подсистему на k -ом уровне абстракции можно описать *A-системой*.

Определим модель S-системы $M(S)$ как l -ую *A-систему* на k -ом уровне абстракции. Другими словами, пусть A^k - множество агрегатов и Q^k - множество связей между агрегатами k -ого уровня абстракции; AM и mn_i^k – соответственно

¹ Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968,-356 с.

множество и количество агрегатов l -ой A -системы k -ого уровня абстракции, на которой выполняется построение модели, mM_l^k – номер первого выделенного агрегата, QM – множество связей между выделенными агрегатами l -ой A -системы k -ого уровня абстракции, тогда $M(S)$ – есть кортеж множеств $\{AM, QM\}$, где $AM = \{A_i^k\}$, $i = mM_l^k .. mM_l^k + mn_l^k - 1$, $AM \subseteq A^k$; $QM = \{Q_{ij}^k\}$, где Q_{ij}^k – связь между агрегатами A_i^k и A_j^k , $i, j = mM_l^k .. mM_l^k + mn_l^k - 1$. $QM \subseteq Q^k$, $mM_l^k = 1 .. M^k$.

Определим принцип взаимодействия моделей S-системы. Для двух моделей, описывающих один и тот же процесс на разных уровнях абстракции, модель верхнего уровня позволяет оперативно найти грубые оценки характеристик процесса, которые затем используются для настройки модели нижнего уровня. Модель нижнего уровня позволяет корректировать параметры модели верхнего уровня, а также решать задачи, недоступные для модели верхнего уровня.

Формализация АН-модели. *АН-модель* уровня абстракции $k=1$, в соответствии с абстрактной схемой, описывает функционирование ОСЛ на этапах I и II, что позволяет избежать конфликтов на границе этапов I и II. На этом уровне абстракции будем рассматривать входной поток как ординарный поток деталей. Построение модели выполняется с использованием аппарата ТМО. Поскольку входной поток на этапе приемки разделяется на два подпотока, *АН-модель* представляет собой две независимые двухфазные многоканальные системы массового обслуживания (СМО) с неограниченным блоком ожидания, без приоритетов $СМО_G$ и $СМО_{NG}$. (рис. 1). На вход $СМО_G$ подается поток заявок габаритных деталей, на вход $СМО_{NG}$ – поток заявок негабаритных деталей.

На интервале времени T тактического управления будем считать входной поток и поток обработки стационарными: λ_G, λ_{NG} – интенсивности входного потока заявок габаритов/негабаритов, $\mu_{1G}, \mu_{1NG}, \mu_{2G}, \mu_{2NG}$ – интенсивности потоков обработки на этапах I, II заявок габаритов/негабаритов. Каналы обслуживания – n_{ij} сотрудников i -ого этапа, обслуживающих j -ый подпоток $i, j=1,2$.

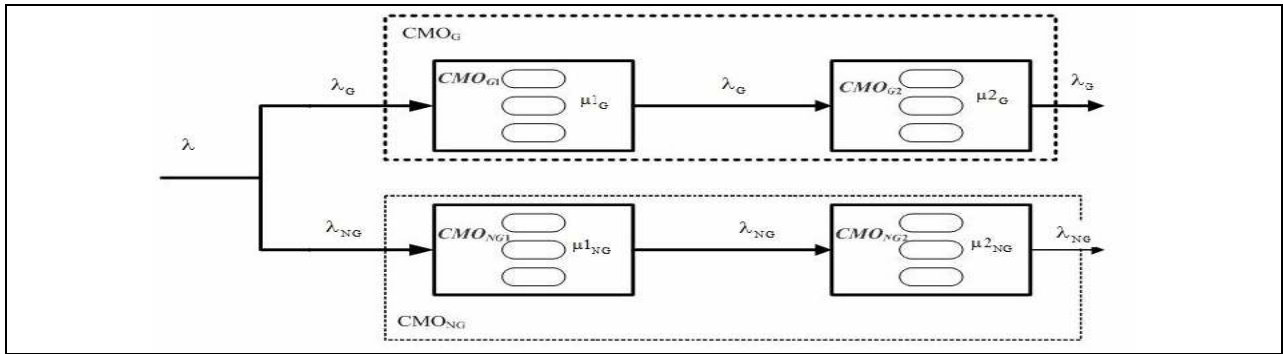


Рис 1.Схема функционирования этапов I и II в терминах ТМО

Выполнена идентификация входного потока и потоков обработки с использованием критерия χ^2 . С уровнем значимости $\alpha=0.05$ показано, что все потоки можно аппроксимировать пуассоновским потоком. Методом максимального правдоподобия получены оценки параметров, характеризующие их распределения (таблица 1).

Таблица 1. Параметры Пуассоновского распределения для потоков

Входной поток	Интенсивность входного потока (детали/час)	Интенсивность потока обработки (детали/ час)	
		Этап I	Этап II
Габаритные детали	$\lambda_G=196$	$\mu_{1G}=50$	$\mu_{2G}=30$
Негабаритные детали	$\lambda_{NG}=904$	$\mu_{1NG}=150$	$\mu_{2NG}=120$

Доказаны утверждения: **1.** Двухфазную СМО_G *АН-модели* с неограниченным блоком ожидания, на вход которой подается поток заявок габаритных деталей, можно рассматривать как две независимые однофазные СМО_{G1} и СМО_{G2}, типа М/М/п с пуассоновским входящим потоком заявок-габаритов с интенсивностью λ_G и показательным распределением времени обслуживания: СМО_{G1} с параметром μ_{1G} и СМО_{G2} с параметром μ_{2G} .

2. Двухфазную СМО_{NG} *АН-модели* с неограниченным блоком ожидания, на вход которой подается поток заявок-негабаритов, можно рассматривать как две независимые однофазные СМО_{NG1} и СМО_{NG2}, обе типа М/М/п с пуассоновским входящим потоком заявок-негабаритов с интенсивностью λ_{NG} и с показательным распределением времени обслуживания: СМО_{NG1} с параметром μ_{1NG} и СМО_{NG2} с параметром μ_{2NG} .

Согласно введенному определению модели: *АН-модель* = $\{A_i^1, Q_i^1\}$. Каждую из четырех СМО, входящих в *АН-модель*, можно описать агрегатом: СМО_{G1} –

агрегат A_1^1 , $СМО_{NG1}$ – агрегат A_2^1 , $СМО_{G2}$ – агрегат A_3^1 , $СМО_{NG2}$ – агрегат A_4^1 . Таким образом, на уровне абстракции $k=1$ для *АН-модели*: $A_i^1 = \{A_i^1\}$, $i=1..4$; $Q_i^1 = \{Q_{ij}^1\}$, $i=1..2, j=i+2$ представлено связями Q_{13}^1 – между A_1^1 и A_3^1 , Q_{24}^1 – между A_2^1 и A_4^1 .

Формализация ИМ-модели. *ИМ-модель* имитирует на детальном уровне (уровень абстракции $k=2$) операционные процессы этапа I и зоны парковки, предварительно формализованные на структурно-функциональном уровне и представленные в виде кросс-функциональных диаграмм. Построение модели осуществляется в предположении неординарного входного потока, что позволяет более адекватно описать процессы его обработки. Операционные процессы этапа I обрабатывают объекты, которые являются результатом расщепления объектов, порожденных в зоне парковки. Определим логическую схему процессов как графическую диаграмму, отражающую множество процессов, упорядоченных в соответствии с алгоритмом производственной технологии, для каждого из которых определена соответствующая математическая схема. Логическая схема процессов этапа I и зоны парковки представлена на рис.2.

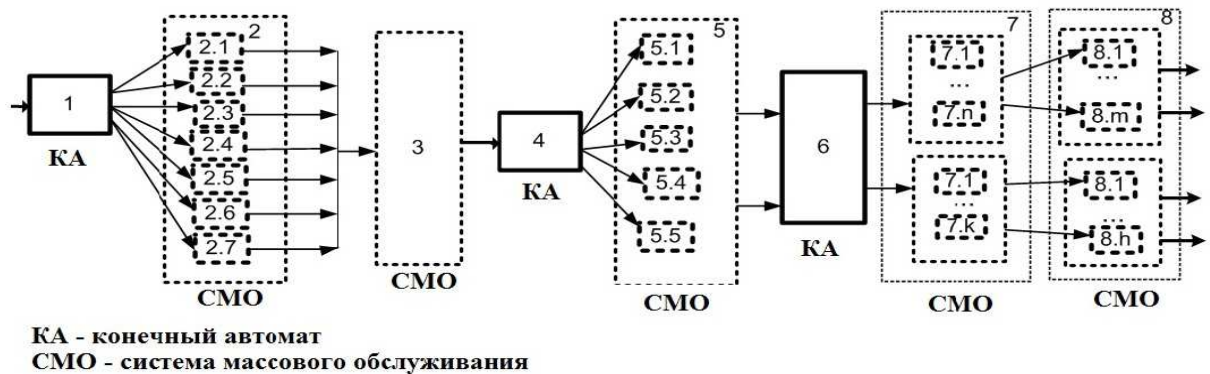


Рисунок 2. Логическая схема процессов этапа приемки и зоны парковки
Согласно введенному определению модели: *ИМ-модель* = $\{A_i^2, Q_i^2\}$. Характер низкоуровневых процессов определяет применение двух разнородных математических схем: СМО и конечные автоматы (КА). На уровне абстракции $k=2$ каждый из выделенных процессов этапа I и зоны парковки (рис.2) можно представить в виде агрегата (таблица 2).

Таким образом, для *ИМ-модели* множество агрегатов $A_i^2 = \{A_i^2\}$, $i=1..8$. Множество связей между агрегатами включает: Q_{12}^2 – между A_1^2 и A_2^2 , Q_{23}^2 –

между A_2^2 и A_3^2 , Q_{34}^2 – между A_3^2 и A_4^2 , Q_{45}^2 – между A_4^2 и A_5^2 , Q_{56}^2 – между A_5^2 и A_6^2 , Q_{67}^2 – между A_6^2 и A_7^2 , Q_{78}^2 – связь между A_7^2 и A_8^2 , т.е. $Q_I^2 = \{Q_{ij}^2\}$, $i=1..7, j=i+1$.

Таблица 2. Процессы логической схемы *ИМ-модели*

№	Технологическое соответствие	Агрегат	Вид агрегата
1	управление парковочными местами	A_1^2	КА
2	обслуживание грузовиков на парковке	A_2^2	СМО
3	обслуживание грузовиков в отделе документооборота	A_3^2	СМО
4	управление разгрузочными лотами	A_4^2	КА
5	разгрузка грузовика	A_5^2	СМО
6	диспетчеризация паллет по местам приема	A_6^2	КА
7	доставка паллет к месту разбора	A_7^2	СМО
8	прием паллет с габаритными и негабаритными деталями	A_8^2	СМО

Разработанное формальное представление моделей на основе агрегативного подхода, а также предложенный принцип взаимодействия моделей обеспечивают:

- совместное использование нескольких унифицированных модельных представлений ОСЛ, что позволяет изучать систему с нужным для исследователя уровнем детализации, проводить процедуру интеграции моделей разных уровней, представимых разными математическими классами, а также упрощает реализацию моделей на ЭВМ с использованием ООП.
- безболезненную реконфигурацию и расширение функционала *КИМ-системы*, направленные на решение возникающих задач производства;
- возможность масштабировать *КИМ-систему* — использовать разработанные модели для решения задач анализа и реинжиниринга схожих по принципам функционирования ОСЛ.

Третья глава. Реализация ИМ-модели. *ИМ-модель* имитирует на детальном уровне функционирование этапа приемки и зоны парковки с использованием гибридного подхода, сочетающего дискретно-событийное, агентное моделирование и ООП. *ИМ-модель* разработана в среде Anylogic, дополненной программно-инструментальными средствами процессного моделирования. *ИМ-*

модель включает две составляющих: модель входного потока и модель операционных процессов.

Моделирование входного потока. Для моделирования входного потока АТИ используется агентный подход, поскольку он позволяет моделировать неординарный, неоднородный поток, позволяет учесть способ доставки, приоритетность груза, вид упаковки, технологию обработки, сопроводительную документацию. Грузопоток на этапе приемки представляется на разных уровнях детализации сначала грузовиками, затем поставками, затем сопроводительной документацией, потом коробками и, наконец, деталями, что соответствует цепочке преобразующихся друг в друга объектов: Truck→Delivery→Catalog→Pallet→Cargo→Components. Каждый объект моделируется агентами соответствующего типа. Разработано шесть типов агентов: грузовики (AgentTr), поставки (AgentDel), каталоги (AgentCat), паллеты (AgentPal), коробки (AgentCar), детали (AgentCom). С использованием теоретико-множественного подхода формализуем модель агента:

$$\text{Agent} = \{\text{NameAgent}, \text{SetAtr}, \text{SetRel}, \text{SetState}, \text{SetEvent}, \text{SetCon}, \text{SetReac}\} \quad (1),$$

где NameAgent – идентификатор агента, SetAtr- множество атрибутов агента, SetRel – множество отношений агента, SetState – множество состояний агента, SetEvent- множество событий, воспринимаемых агентом, SetCon- множество условий реакции агента на события, SetReac- множества реакций агента на события.

Таким образом, модель входного потока АТИ $M(\text{Flow})$ представляется как конечное множество моделей взаимодействующих агентов:

$$M(\text{Flow}) = \{\text{Agent}_i\} \quad (2), \text{ где}$$

$$\{\text{Agent}_i\} = \text{AgentTr} \cup \text{AgentDel} \cup \text{AgentCat} \cup \text{AgentPal} \cup \text{AgentCar} \cup \text{AgentCom},$$

$i=1..countA$, $countA \subseteq Z$ - количество агентов в модели входного потока.

Подмножества агентов связаны бинарным отношением агрегации. Множество SetRel является объединением непересекающихся множеств

отношений: SetRel1 — грузовики-поставки; SetRel2 — поставки-каталоги; SetRel3 — каталоги-паллеты; SetRel4 — паллеты-коробки; SetRel5 — коробки-детали.

$$\text{SetRel} = \text{SetRel1} \cup \text{SetRel2} \cup \text{SetRel3} \cup \text{SetRel4} \cup \text{SetRel5} \quad (3)$$

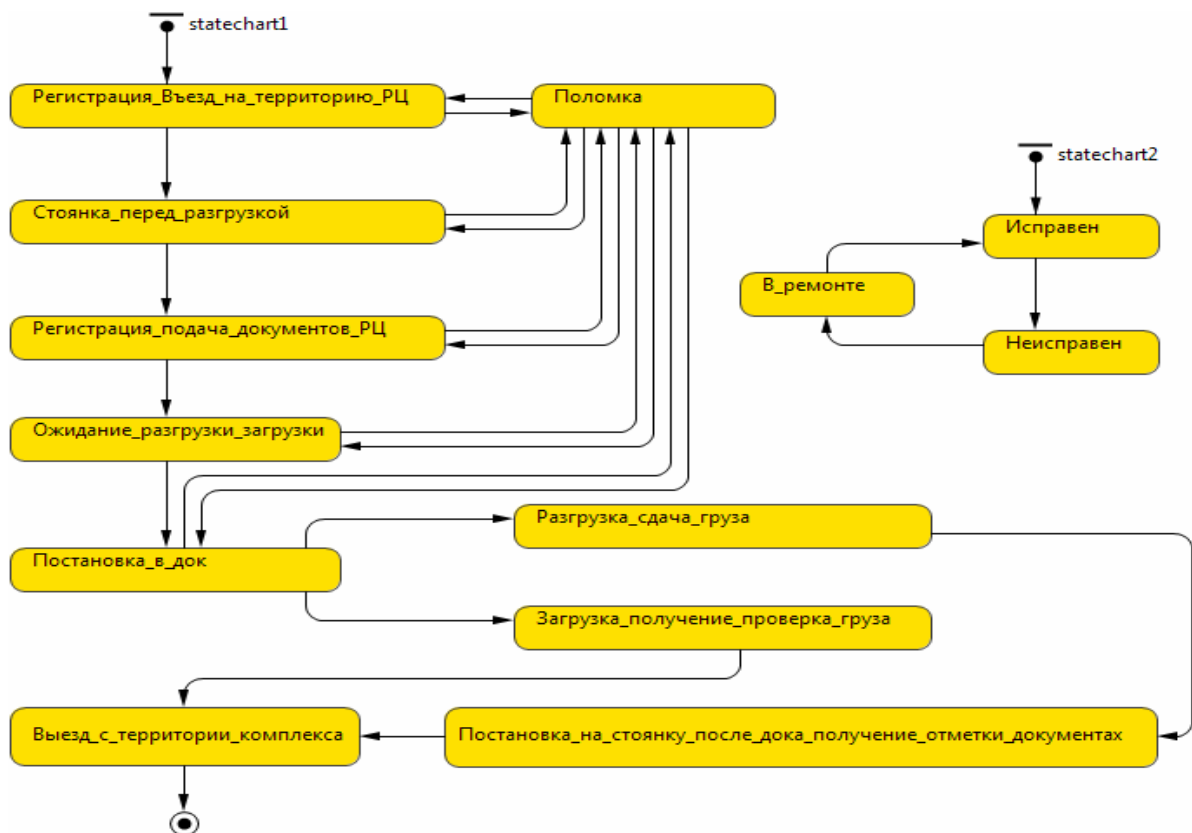


Рисунок 3. Диаграмма состояний агента Truck

Совокупность множеств {SetState, SetEvent, SetCon, SetReac} определяет динамическое поведение агента. При этом подмножество {SetCon, SetReac} рассматривается как множество логических выводов, где SetCon – посылки (условия), SetReac – заключения (действия).

Каждый тип агента реализуется соответствующим классом-агентом, который описывается диаграммой поведения и множеством параметров. Поведенческие диаграммы реализуются средствами AnyLogic, базирующимися на языке UML. Логические выводы кодируются на языке Java с использованием ООП. В качестве примера на рис.3 представлена диаграмма состояний класса-агента Truck (грузовик).

Идентификация и генерация случайного неординарного входного потока. Разработанная модель входного потока совместима с базой данных (БД) WMS. Данные БД WMS являются первичными, полученными в результате наблюдений за работой объекта. Применение таких данных в модели позволяет

максимально приблизить имитацию к наблюдаемому процессу. Однако при этом возникают следующие проблемы: не гарантируется типичность наблюдаемых данных; длительность моделируемого процесса ограничивается длительностью наблюдаемого периода; модель лишается прогностической силы. Проблема решается путем генерации исходных данных как случайных величин (СВ), задаваемых своими функциями распределения. Задача генерации исходных данных решается в два этапа: 1) обосновывается выбор законов распределения вида $\overline{F_1(x, \theta_1, \dots, \theta_s)} \dots \overline{F_k(x, \theta_1, \dots, \theta_s)}$ с s неизвестными параметрами распределения наблюдаемых СВ X_1, \dots, X_k . Методом максимального правдоподобия находятся оценки $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_s$ неизвестных параметров распределения $\theta_1, \dots, \theta_s$. 2) С использованием датчиков случайных величин из коллекции пакета AnyLogic воспроизводятся статистические аналоги СВ X_1, \dots, X_k с выбранными законами распределения и параметрами. Алгоритм генерации данных использован для моделирования случайного потока сложной структуры, заявки которого претерпевают многократное расщепление при переходе от одного технологического процесса к другому. На предварительном этапе разработано внешнее представление данных на основе БД WMS и соответствующее принятым в имитационной системе ограничениям (рис.4).



Рисунок 4. Представление БД на основе WMS (логический уровень пакета ErWin)

Из анализа данных входного потока следует, что каждая заявка имеет иерархическую структуру фиксированной глубины (глубина дерева – 6 уровней).

Входной поток данных представляет собой ординарный поток элементов 0-ого уровня иерархии (Грузовиков)(рис.5)

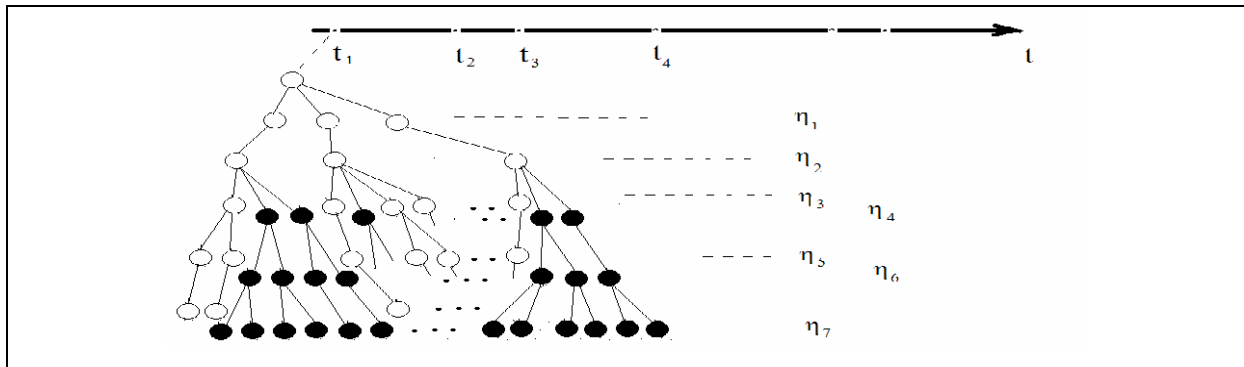


Рисунок 5. Схема моделирования случайного неординарного потока

Моменты поступления Грузовиков (элементов 0-ого уровня) определяются реализациями неотрицательной вещественной случайной величины t . Значения элементов первого и следующих уровней определяются реализациями неотрицательных целочисленных случайных величин $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_7$, где

η_1 – количество поставок в грузовике,

η_2 – количество сопроводительной документации в поставке,

η_3 – количество паллет, необходимых для габаритного груза, входящего в перечень сопроводительной документации,

η_4 – количество паллет, необходимых для негабаритного груза, входящего в перечень сопроводительной документации,

η_5 – количество коробок с габаритными деталями на паллете,

η_6 – количество коробок с негабаритными деталями на паллете,

η_7 – количество негабаритных деталей в коробке.

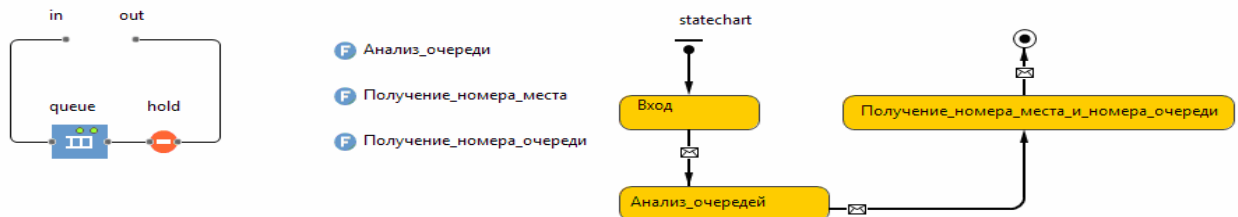
Поток заявок, начиная с первого уровня иерархии, является неординарным. Заявки поступают пакетами случайного объема (объем пакетов предполагается ограниченным, а входящий поток пакетов – простейшим). Введем допущения, касающиеся независимости СВ $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_7$ от времени t . Анализ данных показал, что СВ η_3 и η_4 зависят от СВ η_1 . Для моделирования реализаций СВ η_3 и η_4 был идентифицирован вид условных функции распределения $F_{\eta_{3,i}}(\eta_3 | \eta_{1,i})$, $F_{\eta_{4,i}}(\eta_4 | \eta_{1,i})$, где $i=1..m$. Без потери общности η_2 считаем константой равной единице. Все остальные СВ считаем независимыми друг от друга. Идентификация

законов распределения СВ η_1 , η_3 , η_7 , t на основе ретроспективных данных представлена в диссертации.

Предложенный подход позволяет изменять интенсивность случайного входного потока путем изменения только λ_{truck} -интенсивности потока грузовиков.

Моделирование операционных процессов. Для реализации операционных процессов склада на детальном уровне используются дискретно-событийный и объектно-ориентированный подходы. С каждым типом агентов входного потока связана последовательность технологических действий, которые сгруппированы в процессы.

Например, агент типа Truck обрабатывается процессами: въезд на территорию комплекса; бронирование места на стоянке; парковка на стоянке; регистрация в отделе документооборота; бронирование дока для разгрузки; парковка в док; разгрузка грузовика в доке и т.п. Процесс “Бронирование места на стоянке” реализуется классом **Parking_revisor** (рис. 6).



Анализ_очереди. Функция анализирует очереди к парковочным местам.

Получение_номера_очереди. Функция выбирает очередь с минимальной длиной, прибывающий грузовик помещается в эту очередь.

Получения_номера_места. Функция моделирует два сценария обслуживания очереди. I сценарий обслуживания FIFO “первый пришел, первый ушел”. II сценарий обслуживания в соответствии приоритетностью грузовика

Рисунок 6. Реализация класса Parking_revisor

Программная архитектура **ИМ-модели** представлена в диссертации. Паттерны и блоки имитационной модели реализованы с использованием графических средств процессного и агентного моделирования пакета Anylogic. Функции, используемые в блоках и паттернах, представлены программным кодом на языке Java.

Проверка адекватности ИМ-модели.

Для проверки адекватности **ИМ-модели** исследуются эмпирические данные по интенсивности обработки габаритных/негабаритных деталей на этапе I, использованные при построении **АН-модели**. При проверке адекватности

проверяется гипотеза о принадлежности одной выборке имеющихся эмпирических данных и соответствующих данных, рассчитанных на *ИМ-модели*. Расчеты на *ИМ-модели* производились для того же входного потока и производительности, которые использовались при построении *АН-модели*. Эмпирические и расчетные данные представлены в диссертации. Проверка однородности выборок производилась с помощью критерия Крамера-Уэлча, основанного на статистике T, которая вычисляется по формуле

$$T = \frac{\sqrt{mn}(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{ns_x^2 + ms_y^2}} \quad (4), \text{ где}$$

\bar{x} , \bar{y} - средние арифметические выборок, s_x^2 , s_y^2 - выборочные дисперсии, m, n – размеры выборок. Решающее правило - принятый уровень значимости α . С уровнем значимости $\alpha=0.05$ показано, что эмпирические и расчетные выборки однородны. Доказательство адекватности *ИМ-модели* повышает убедительность результатов вычислительных экспериментов.

В четвертой главе представлены примеры практического использования *КИМ-системы*.

Задачи, решенные на *АН-модели*

А1. Вычислить показатели функционирования этапов I и II при плановом режиме.

Из построения *АН-модели* следует, что составляющие ее $СМО_{G1}$, $СМО_{NG1}$, $СМО_{G2}$ и $СМО_{NG2}$ имеют тип $\langle M|M|n \rangle$ (с неограниченной очередью). По эмпирическим данным в главе 2 рассчитаны параметры, характеризующие входные потоки и потоки обработки для указанных СМО. Показано, что $СМО_{G1}$, $СМО_{NG1}$, $СМО_{G2}$, $СМО_{NG2}$ описываются системами уравнений Колмогорова-Чепмена и для них выполняются условия существования предельных вероятностей. По формулам² ТМО вычислены предельные вероятности и

² Венцель Е.С. Исследование операций. – М : “Советское радио”, 1972, 552 с.

показатели функционирования СМО *АН-модели*. Расчеты представлены в диссертации.

A2. Вычислить требуемое количество сотрудников на этапах I и II для зон габаритов/негабаритов. Рассчитать соответствующие показатели функционирования АН-модели.

Рассматривается СМО типа $\langle M|M|n \rangle$ (с неограниченной очередью), λ и μ фиксированы, где λ - интенсивность входного потока, μ - интенсивность обработки, n - количество каналов (целочисленное, положительное). Функция затрат $F(n) = C1 * Tsvo * n + C2 * Toch(n)$, где $C1$ - отнесенные к единице времени затраты на обеспечение функционирования одного обслуживающего канала; $C2$ - затраты, обусловленные вынужденным ожиданием в единицу времени в расчете на одну заявку; $Tsvo$ - среднее время обслуживания одного канала в расчете на одну заявку; $Toch(n)$ - среднее время ожидания начала обслуживания заявки. Определить n , при котором достигается минимум функции затрат F , при заданных положительных $C1$ и $C2$:

$$F(n) = C1 * Tsvo * n + C2 * Toch(n) \rightarrow \min_n \quad (5)$$

Из условия стационарности $\frac{\lambda}{\mu * n} < 1$ для заданных λ и μ определяется n_{\min} -

минимально возможное количество каналов:

$$n_{\min} = \left[\frac{\lambda}{\mu} \right] + 1 \quad (6)$$

Для систем *АН-модели* на основе экспертной оценки определены значения коэффициентов $C1=1$ и $C2=3$. Поиск n_{opt} осуществляется перебором на ограниченном множестве $n \in [n_{\min}, n_{\max}]$, где n_{\max} определяется из условий существующих физических ограничений на количество каналов.

По формуле 6 рассчитаны минимально возможные количества сотрудников для зон габаритов/негабаритов этапа I и этапа II: $n_{\min G1} = 4$, $n_{\min NG1} = 7$ и $n_{\min G2} = 7$, $n_{\min NG2} = 8$. Из условия оптимальности (5) определены требуемые количества сотрудников для зон габаритов/негабаритов этапа I и этапа II: $n_{opt G1} = 5$,

$n_{optNG1}=8$ и $n_{optG2}=8$, $n_{optNG2}=9$. В диссертации представлены рассчитанные показатели функционирования $СМО_{G1}$ и $СМО_{NG1}$ при n_{optG1} , n_{optNG1} , $СМО_{G2}$ и $СМО_{NG2}$ при n_{optG2} , n_{optNG2} .

Задачи, решенные на ИМ-модели

И1. Рассчитать площади, необходимые для поставок, ожидающих разбора.

На **ИМ-модели** при заданной интенсивности потока грузовиков λ_{truck} и заданной производительности составляющих операционных процессов рассчитывается L_{pochG} и L_{pochNG} - средняя длина очереди в паллетах для габаритных и негабаритных деталей на пандусе. При средней площади паллеты $S_{паллет}=1.2$ размер области ожидания на пандусе $S_{обл}$ вычисляется: $S_{обл} = L_{poch} * S_{паллет}$, $L_{poch}=L_{pochG}+L_{pochNG}$, где L_{poch} - средняя длина очереди в паллетах. По результатам экспериментов на **ИМ-модели** в плановом режиме функционирования вычислена $S_{обл}=22.8 \text{ м}^2$.

И2. При изменении алгоритма процедуры обработки детали исследовать изменение производительности каналов обработки этапа приемки.

Примеры возможных изменений в процессах обработки детали:

- а) Для увеличения скорости прохождения товара на этапе I предлагается ввести обязательные требования к поставщику маркировать негабаритные детали внутренними этикетками (стикерами) склада. В этом случае алгоритм обработки маркированной детали исключает операционные действия: распознавание оригинального штрих-кода детали, печать и наклеивание внутреннего стикера склада.
- б) При обработке бракованных деталей алгоритм обработки детали включает дополнительные операционные действия: наклеивание этикетки с логотипом поставщика, размещение комментария по браку в сопроводительных документах и перенаправление детали в накопитель «брака» для возврата поставщику. Пусть доля бракованных деталей возросла с 1% до 3% во входном потоке деталей.

Для случаев а) и б) требуется исследовать, как изменится производительность каналов обслуживания негабаритных деталей на этапе I.

Эксперименты на *ИМ-модели* показали:

- а) время обработки маркированной детали меньше времени обработки немаркированной в среднем в 1,5 раза.
- б) при увеличении брака на два процента обработка детали в среднем увеличивается на 0,5 секунды.

ИЗ. Выбрать более предпочтительную технологию приемки поставок.

На ОСЛ возможно применение одной из двух технологий параллельной разгрузки нескольких поставок, каждая из которых содержит по несколько паллет. В соответствии с технологией I сотрудники распределяются на группы, одна группа одна поставка, в каждой группе количество человек равно количеству паллет в поставке. Разбирается параллельно столько поставок, сколько получилось групп. В соответствии с технологией II предполагается, что каждая поставка разгружается одним сотрудником паллета за паллетой. Разбирается параллельно столько поставок, сколько имеется сотрудников на этапе приемки. Для выбора более предпочтительной технологии приемки в *ИМ-модели* рассматриваются оба варианта: технология II - большим количеством групп малой численности, технология I - меньшим количеством групп большей численности. На рис. 7 слева демонстрируется применение технологии I, справа — применение технологии II.

Вычислительный эксперимент продемонстрировал, что при прочих равных условиях при выборе **технологии II** на пандусе образуются «завалы». Таким образом, **технология I** предпочтительнее.

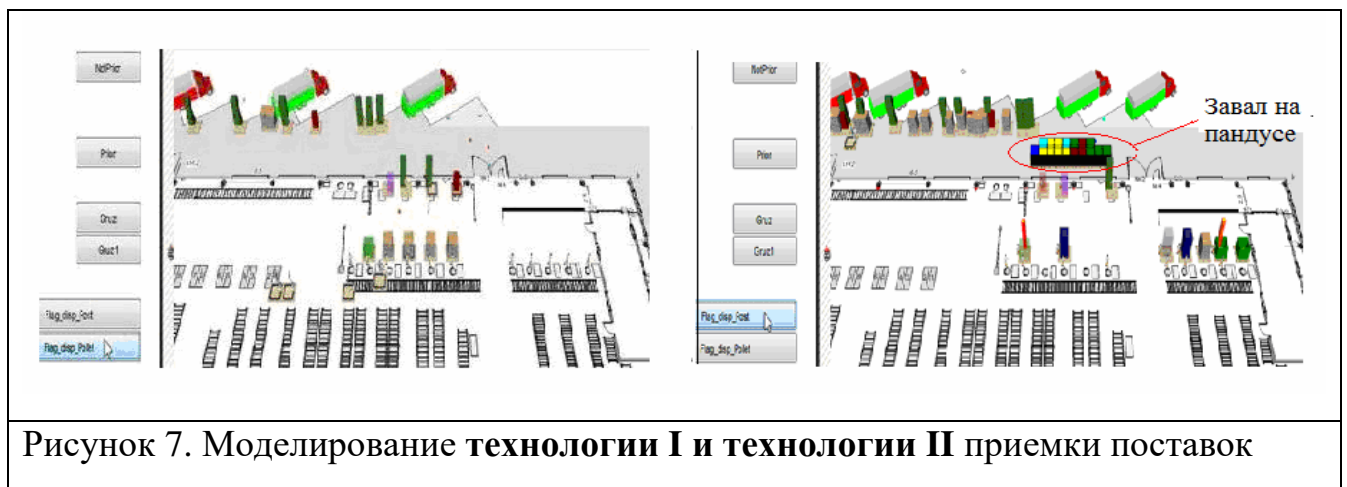


Рисунок 7. Моделирование **технологии I** и **технологии II** приемки поставок

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложения вынесены дополнительные материалы к главам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В рамках концепции системного анализа разработана абстрактная схема функционирования объекта складской логистики (ОСЛ) по хранению авиационно-технического имущества (АТИ).
2. Разработано концептуальное представление моделей комплексной имитационной моделирующей системы (**КИМ-системы**) на основе агрегативного подхода. Предложен и применен принцип взаимодействия моделей в рамках **КИМ-системы**.
3. Разработана имитационная модель неординарного, неоднородного входного потока на основе агентного подхода. Предложен и реализован подход к генерации случайного входного потока.
4. Разработана оригинальная имитационная модель низкоуровневых процессов обработки этапа приемки ОСЛ. Выполнена проверка адекватности имитационной модели, что повышает убедительность результатов вычислительных экспериментов.
5. Реализована **КИМ-система** ОСЛ АТИ на основе структурно-функционального, аналитического и имитационного моделирования в рамках концепции комплексного моделирования.
6. С использованием **КИМ-системы** решены практические задачи, результаты которых свидетельствуют об эффективности применения **КИМ-системы** в качестве СППР.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах перечня ВАК

1. Киндинова В.В., Кузнецова Е.В. Системная динамика в задачах имитационного моделирования рынка дуополии.// Вестник Московского Авиационного Института 2009, т. 16, № 7, с. 96-103

2. Киндинова В.В. Имитация, анализ и реинжиниринг операционных процессов складского комплекса авиазапчастей.// Вестник Московского Авиационного Института 2012, т. 19, № 3, с. 212-220
3. Киндинова В.В., Шебеко Ю.А. Имитационное моделирование бизнес-процессов управления товарными потоками многономенклатурного склада авиазапчастей.// Вестник Московского Авиационного Института 2013, т.20, №1, с.170-178
4. Киндинова В.В. Модель анализа проблем объекта складской логистики в авиации.//Труды МАИ, 2017, № 94:http://trudy.mai.ru/upload/iblock/d01/kindinova_rus.pdf (31.05.2017).

Публикации в других изданиях

5. Киндинова В.В. Имитационная модель складского комплекса// Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Тр. V Всерос. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Центральный регион. Москва,–М. : Вузовская книга, 2008, с.199-201
6. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О. Мультиагентная имитационная модель самоорганизации торговых сетей // "Новые информационные технологии". Тезисы докладов XVIII Международной студенческой школы-семинара - М.: МИЭМ, 2010, с. 366-368
7. Киндинова В.В., Кузнецова Е.В. Вопросы анализа имитационной модели и планирования имитационного эксперимента. Материалы XVII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011),–М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011, с. 92-94
8. Киндинова В.В., Кузнецова Е.В. О методе построения имитационной модели на примере задачи исследования конкуренции двух фирм // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник докладов пятой юбилейной всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2011. Том 1. СПб.: ОАО «ЦТСС». 2011. – с.162-167.

9. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Компьютерное моделирование в задачах имитации комплексных логистических активностей. Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), –М.: Изд-во МАИ, с. 601-603
10. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В., Технология управления складскими процессами с помощью комплекса имитационных моделей. Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013),–М.: Изд-во МАИ, 2013, с. 201-204.
11. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В., Шебеко Ю.А. Имитация сложных систем и логистический реинжиниринг // Сборник докладов шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013). Том 1. Издательство «ФЭН» Академии наук РТ, Казань, 2013, с. 170-173.
12. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В., Шебеко Ю.А. От математического моделирования работы склада как системы массового обслуживания к имитационной модели. Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015),–М.: Изд-во МАИ, 2015, с. 142-143
13. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Сопоставление аналитического и имитационного моделирования процессов складской логистики. Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф., 21-23 окт. 2015 г., Москва. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2015. –С.145-150.
14. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Формализация имитационной модели. Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016),–М.: Изд-во МАИ, 2016, стр. 556-558
15. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О. Имитационная модель анализа процессов складской логистики. Материалы XVII Всероссийской конференция молодых

учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, г. Новосибирск, Россия, 30 октября – 3 ноября 2016 г. — Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2016, стр. 90

16. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Имитационная модель анализа проблем функционирования логистической системы. Перспективы развития логистики и управления цепями поставок: сб. науч. трудов VII Международной научной конференции (18 апреля 2017, Москва): в 2 частях. –М: Изд. “Эс-Си-Эм Консалтинг”, 2017. – с. 657-669

17. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Обработка и аппроксимация исходных данных имитационной модели анализа логистических процессов. Материалы XX Юбилейной Международной конференции по Вычислительной Механике и Современным Прикладным Программным Системам (ВМСППС'2017),–М.: Изд-во МАИ, 2017, с. 780-782

18. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Модели комплексного исследования объекта складской логистики. Концептуальное представление. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017): Труды конф., 18-21 окт. 2017 г., Санкт-Петербург, – с. 405-410

Свидетельство об официальной регистрации программных продуктов

19. Киндинова В.В., Имитационная модель для принятия управленческих решений на рынке дуополии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20116108800. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 14 января 2011г.