

УДК 519.673

Модель анализа проблем объекта складской логистики в авиации

Киндинова В.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия.:

e-mail: hamstervill@mail.ru

Аннотация

Разработан модельный программный комплекс в виде имитационной системы, предназначенной для системного анализа и управления объектом складской логистики. Имитационная модель анализа проблем является важной составляющей имитационной системы, позволяет исследовать низкоуровневые операционные процессы обработки. Предложен подход к моделированию неординарного входного потока сложной структуры, заявки которого претерпевают многократное расщепление. Разработаны алгоритмы генерации исходных данных для моделирования случайного входного потока.

Ключевые слова: имитационная система, гибридный подход, агентный подход, паттерн, диаграмма состояний, идентификация, критерий согласия, эксперимент.

Введение

Успешность функционирования авиакомпании в значительной степени определяется состоянием ее летного парка, что обеспечивается своевременным обслуживанием машин, а это, в свою очередь, зависит от обеспеченности сервисных служб необходимыми комплектующими с минимальными затратами, в нужном количестве и “точно в срок”. Таким образом, 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).

Управление современными объектами складской логистики (ОСЛ) невозможно без привлечения специализированной программно-аналитической поддержки. WMS (Warehouse Management system) — наиболее распространенные системы управления складскими процессами. Основное назначение WMS-систем — 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 выработки эффективных управленческих решений для ОСЛ через разработку моделей, алгоритмов и программ анализа логистических процессов как динамически развивающихся. Для решения указанной задачи в работе предлагается имитационная система (ИмС), сочетающая аналитическое и имитационное моделирование [1][2]. Эту ИмС предполагается использовать в качестве основы

системы поддержки принятия решений (СППР) для повышения эффективности функционирования ОСЛ. Показателями эффективности функционирования ОСЛ будем считать показатели, принятые в теории массового обслуживания (ТМО) [3], характеризующие производительность и загрузку ОСЛ.

ИмС позволяет обеспечить повышение эффективности функционирования ОСЛ за счет эффективного распределения людских ресурсов ОСЛ, управления входным потоком товара 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.

Все рассмотрение производится на примере ОСЛ по хранению авиационного технического имущества (АТИ), где количество этапов обработки $n=3$: I этап – приемки, II этап – размещения и хранения, III этап – комплектации и отгрузки пользовательского заказа. Детали помимо названия и количества характеризуются свойствами: способом доставки, поставщиком, заказчиком, размером, весом, маркировкой, приоритетностью. По весогабаритным характеристикам каждая деталь относится к одному из двух видов габариты/негабариты. Соответственно входной поток разбивается на два подпотока габариты/негабариты, каждый из которых на каждом этапе обрабатывают сотрудники соответствующего этапа с заданной производительностью p_{ij} , $i=1..3, j=1..2$ [2].

Имитационная модель анализа проблем (МодельАП) является наиболее важной составляющей ИмС. МодельАП имитирует на детальном уровне функционирование зоны приемки (I этап) с использованием гибридного подхода,

сочетающего дискретно-событийное, агентное моделирование и объектно-ориентированное программирование (ООП). Модель АП разработана в среде Anylogic, дополненной программно-инструментальными средствами процессного моделирования. Модель АП 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 и 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 $M(Flow)$ представляется как конечное множество агентов:

$$M(Flow) = \{Agent_i\} \quad (2),$$

где $\{Agent_i\} = AgentTr \cup AgentDel \cup AgentCat \cup AgentPal \cup AgentCar \cup AgentCom$, $i=1..N$, $N(t) \subseteq Z$ - количество агентов в модели входного потока.

Подмножества агентов связаны бинарным отношением агрегации. Множество SetRel является объединением непересекающихся множеств отношений (формула 3): SetRel1 — грузовики-поставки; SetRel2 — поставки-каталоги; SetRel3 — каталоги-паллеты; SetRel4 — паллеты-коробки; SetRel5 — коробки-детали.

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

Совокупность множеств $\{SetState, SetEvent, SetCon, SetReac\}$ определяет динамическое поведение агента. При этом, подмножество $\{SetCon, SetReac\}$ рассматривается как множество продукций, где SetCon – посылки (условия продукций), 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. Продукции кодируются на языке Java с использованием ООП. Соответствующие классы-агенты: Truck, Delivery, Catalog, Pallet, Cargo, Component. Между классами-агентами, программно реализующими модель входного потока, установлено

отношение агрегация. Вид отношения между классами-агентами был выбран с учетом решения проблем связанных с вычислительной сложностью агентных моделей. При отработке на своем абстрактно-логическом уровне экземпляр класса-агента уничтожается.

В качестве примера на рис.1 представлена диаграмма состояний класса-агента Truck (грузовик).

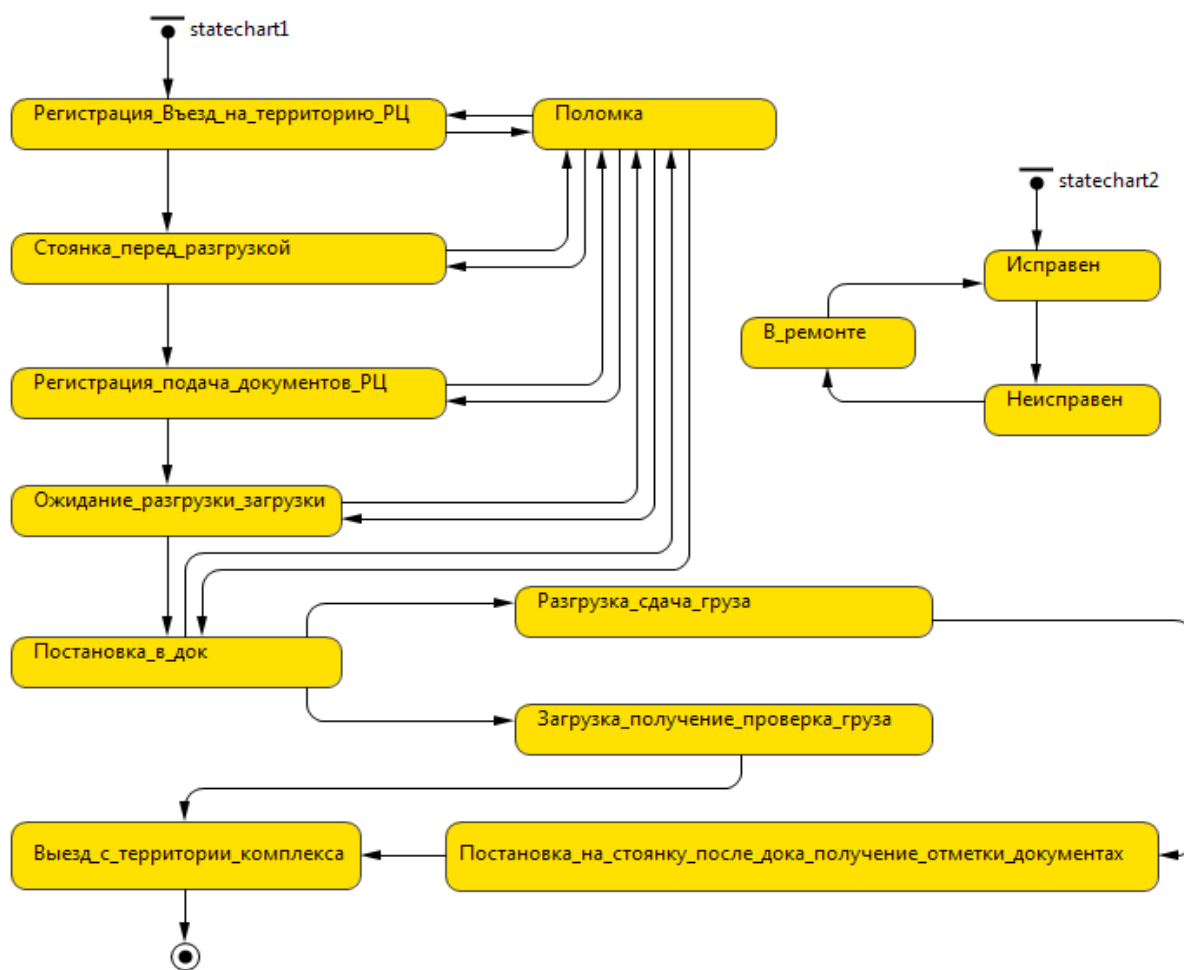


Рисунок 1. Диаграмма состояний агента Truck

Объект Грузовик, далее групповая заявка — это первичный вид единицы грузопотока, в который инкапсулирована вся имеющаяся информация о поставках и их содержимом, которое доставлено грузовиком. Загрузка информации о количестве

поставок и их содержанием для каждого объекта Грузовик производится при инициализации объекта.

Разработанная таким образом модель входного потока реализует неординарный поток, каждая заявка которого имеет иерархическую структуру глубиной 5 уровней, начиная с объекта Поставка.

Идентификация и генерация исходных данных для инициализации неординарного входного потока

Разработанная модель входного потока АТИ 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, поскольку данные, необходимые для накопления статистики, могут отсутствовать[1]. Возникает проблема генерации исходных данных как случайных величин (СВ), задаваемых своими функциями распределения. Функция распределения должна: не противоречить статистическому аналогу плотности распределения наблюдаемой СВ; обоснована с использованием статистического критерия согласия. Задача генерации исходных данных, как случайных величин, решается в два этапа:

- на первом этапе 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 по имеющимся реализациям $z1_n, \dots, zk_n$ выборок $Z1, \dots, Zk$, порожденных случайными величинами X_1, \dots, X_k . Для проверки гипотез о виде функций распределения СВ X_1, \dots, X_k используется статистический критерий хи-квадрат (критерий Пирсона). По реализациям $z1_n, \dots, zk_n$ выборок $Z1, \dots, Zk$, методом максимального правдоподобия находятся оценки $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_s$ неизвестных параметров $\theta_1, \dots, \theta_s$.

- на втором этапе воспроизводятся статистические аналоги СВ X_1, \dots, X_k с выбранными законами распределения и параметрами, характеризующими их. Формирование реализаций статистических аналогов осуществляется с использованием датчиков случайных величин из коллекции пакета AnyLogic.

В работе рассматриваются особенности применения этой схемы для моделирования случайного потока сложной структуры, заявки которого претерпевают многократное расщепление, соответствующее переходу 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.2).

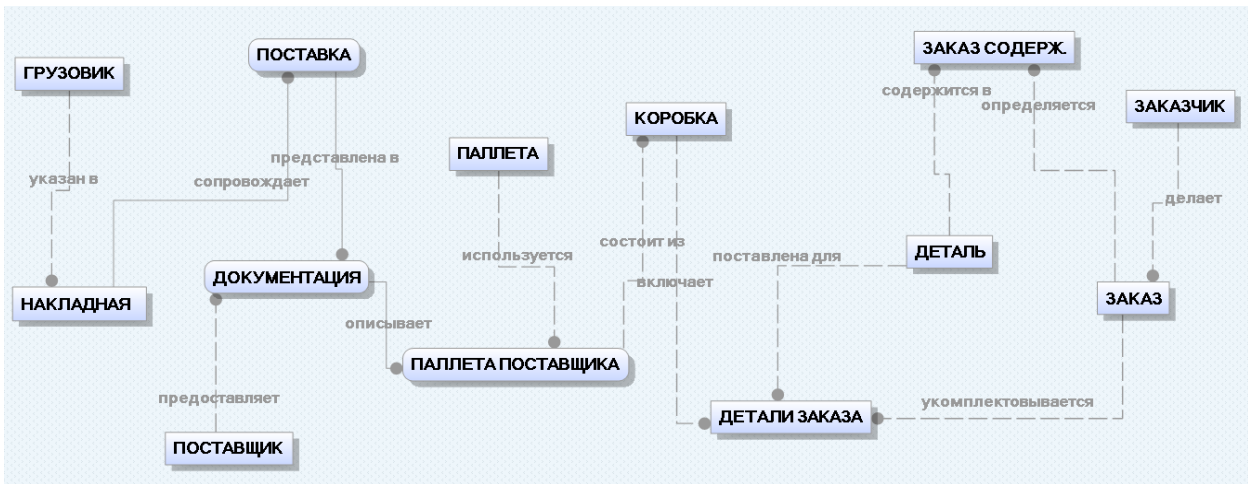


Рисунок 2. Представление БД на основе WMS, на логическом уровне в пакете ERwin

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.3)

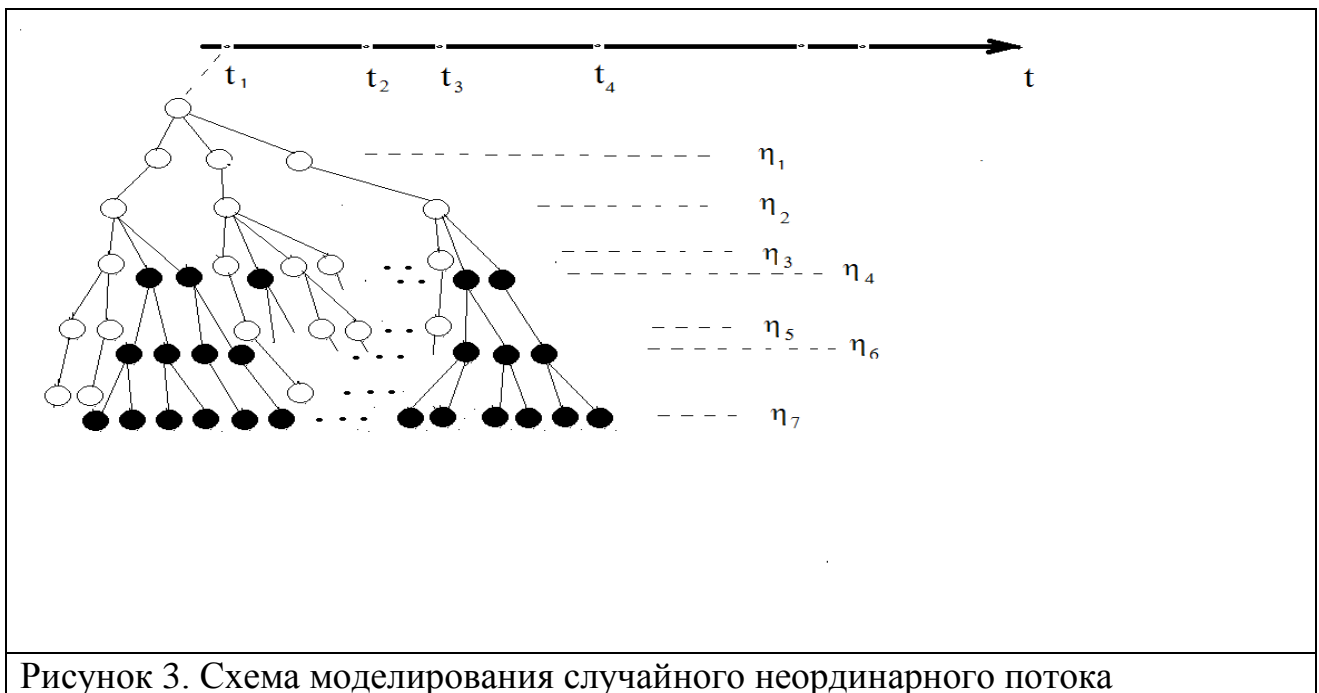


Рисунок 3. Схема моделирования случайного неординарного потока

Будем считать, что:

- Элементы 1-ого уровня являются реализациями неотрицательной целочисленной случайной величины η_1 (количество поставок) (СВ η_1).

- Элементы 2-ого уровня являются реализациями неотрицательной целочисленной СВ η_2 (количество документов для каждой поставки).

- Элементы 3-его уровня подразделяются на два подмножества элементов:

- элементы первого подмножества являются реализациями неотрицательной целочисленной СВ η_3 (количество паллет габаритов в каждом документе),

- элементами второго подмножества - реализации неотрицательной целочисленной СВ η_4 (количество паллет негабаритов в каждом документе).

Каждое из этих подмножеств может быть пустым, но все множество должно содержать не менее одного элемента. Каждый элемент третьего уровня порождает свое поддерево элементов: элементы первого подмножества - поддерево габаритов, элементы второго подмножества - поддерево негабаритов.

- Элементами 4-ого уровня являются реализации неотрицательной целочисленной СВ η_5 (количество коробок с габаритными деталями), если элементы принадлежат поддереву габаритов и реализациями неотрицательной целочисленной СВ η_6 (количество коробок с негабаритными деталями), если элементы принадлежат поддереву негабаритов.

- Элементами 5-ого уровня являются реализациями неотрицательной целочисленной СВ η_7 (количество элементов в коробке с негабаритами), если элементы принадлежат поддереву негабаритов. Элементы четвертого уровня, входящие в поддерево габаритов, порождают по одному элементу 5-ого уровня (количество габаритных деталей в коробке равно 1 штуке).

Поток заявок, начиная с первого уровня иерархии, является неординарным. Заявки поступают пачками случайного объема (объем пачек предполагается ограниченным,

а входящий поток пачек – простейшим). Введем допущения касающиеся независимости СВ $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_7$ от времени t . Анализ данных показал, СВ η_3 и η_4 , характеризующие соответственно количество паллет необходимых для габаритного груза и негабаритного груза, 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 $i=1..m$. В ходе анализа данных выборки, порожденной СВ η_2 было определено, что практически во всех наблюдениях величина η_2 принимала значение один, поэтому значение этой величины считаем константой равной единице. Все остальные СВ считаем независимыми друг от друга. Таким образом, задача моделирования статистических данных сводится к получению:

- реализаций совокупности дискретных случайных величин $\{\eta_1, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7\}$, каждая из которых характеризует объемы групповых заявок определенного вида (поставки в каждом грузовике; документация для каждой поставки; паллеты габаритов/негабаритов для каждого экземпляра документов; коробки на каждой паллете; детали в каждой коробке), соответствующих своему этапу технологического процесса;
- реализации непрерывной случайной величины T - интервалов между моментами поступления заявки или между моментами поступления элементов 0-ого уровня иерархии (Грузовиков).

По выборкам, порожденным СВ $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_7, T$ выполнена процедура идентификации законов распределения СВ с использованием критерия согласия хи-

квадрат (критерий Пирсона) с уровнем значимости $\alpha=0.05$. Методом максимального правдоподобия определены оценки параметров, характеризующие распределения см. Таблица 1.

Таблица 1

Случайная величина	Вид вероятностного распределения	Параметры распределения	
η_1	Равномерное	a=1	b=3
$\eta_3 \eta_1=1$	Равномерное	a=0	b=5
$\eta_3 \eta_1=2$	Равномерное	a=0	b=4
$\eta_3 \eta_1=3$	Равномерное	a=0	b=3
$\eta_4 \eta_1=1$	Равномерное	a=3	b=7
$\eta_4 \eta_1=2$	Равномерное	a=2	b=5
$\eta_4 \eta_1=3$	Равномерное	a=2	b=4
η_5	Нормальное	m=4.49	d=1.17
η_6	Нормальное	m=7.43	d=4.66
η_7	Нормальное	m=10.5	d=1.18
T	Показательное	$\lambda=2.07$	

Моделирование операционных процессов

Модель АП реализует процессы зоны приемки, предварительно формализованные на структурно-функциональном уровне и представленные в виде кросс-функциональных диаграмм[4]. Характер низкоуровневых процессов определяет применение разнородных математических схем, таких как: системы массового обслуживания и конечные автоматы [5]. Определим логическую схему процессов как графическую диаграмму, отражающую множество процессов, упорядоченных в соответствии с производственной технологией, для каждого из которых определена соответствующая математическая схема[6]. Логическая схема процессов зоны приемки на детальном уровне представлена на рис.4.

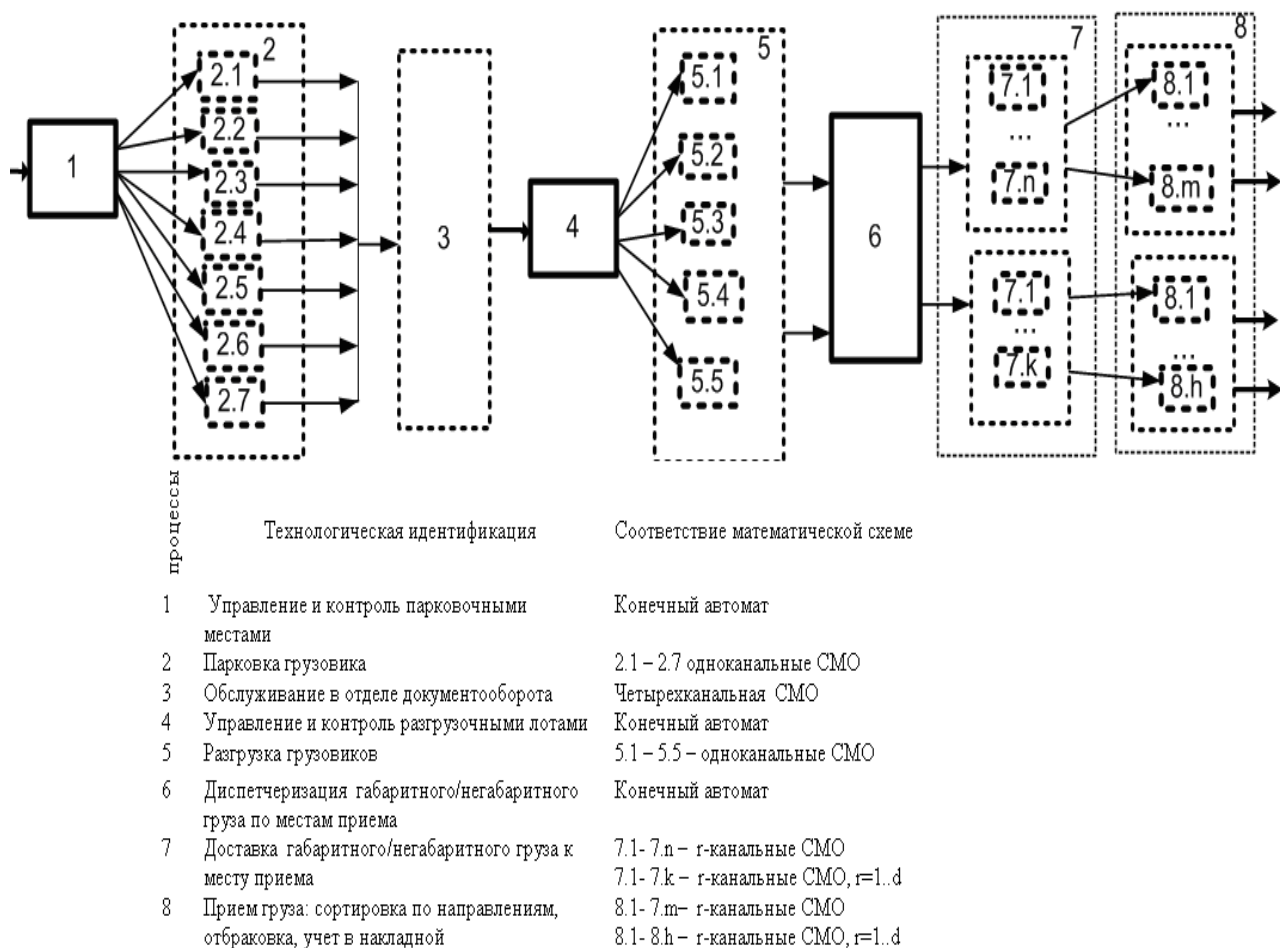


Рисунок 4. Логическая схема процессов этапа приемки

С каждым типом объектов входного потока АТИ связана последовательность технологических действий, которые сгруппированы в процессы и промоделированы с использованием дискретно-событийного и объектно-ориентированного подходов. Программная архитектура прототипа модели анализа проблем представлена на рис.5. 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.

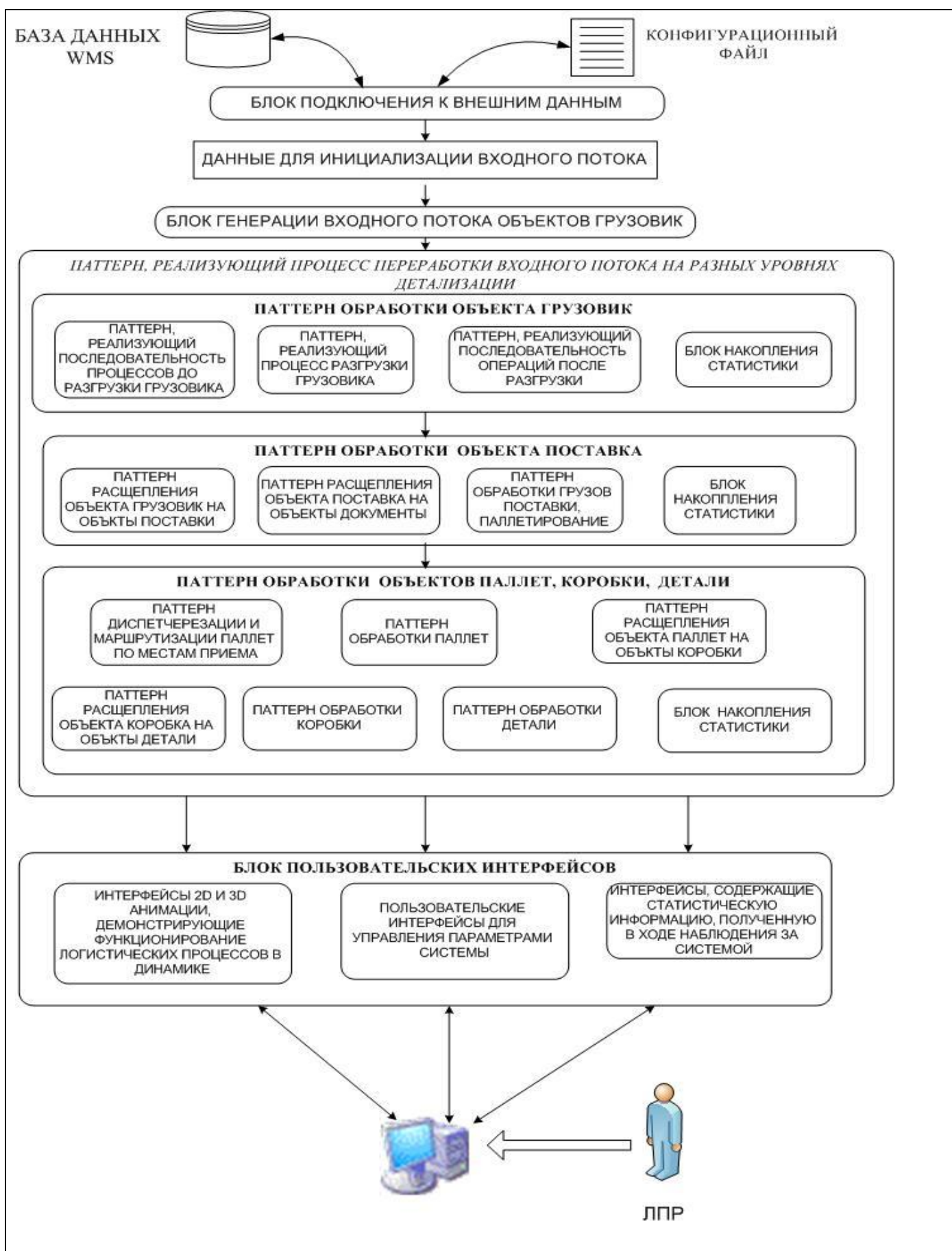


Рисунок 5. Архитектура прототипа модели анализа проблем

На рис. 6 представлена реализация блока генерации входного потока объектов грузовик в виде класса *Truck_agents_generator*.

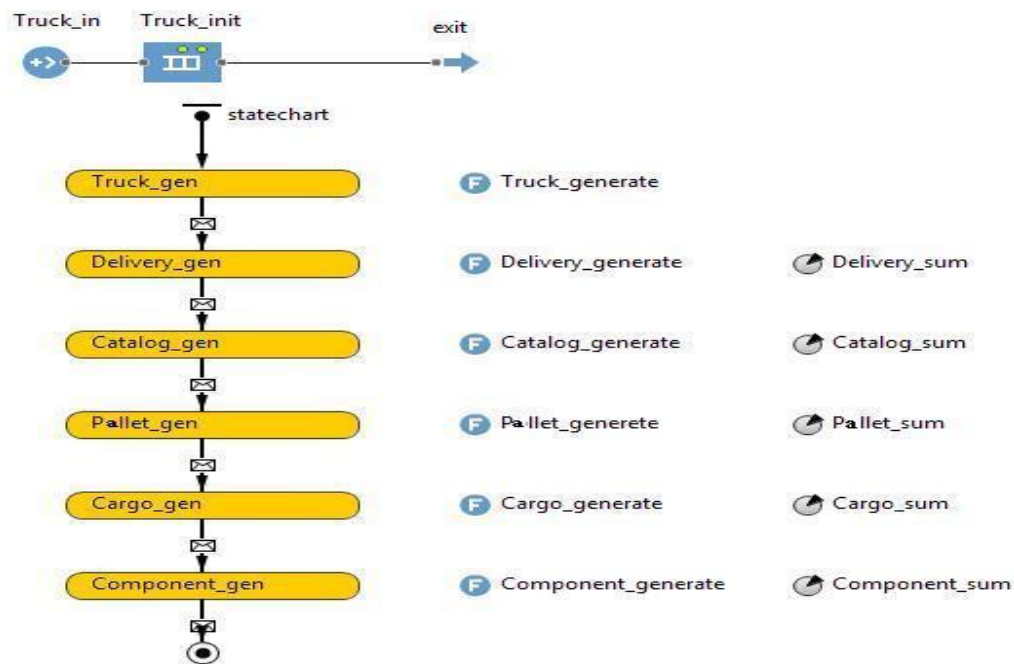


Рисунок 6. Реализация класса *Truck_agents_generator* (Инициализации входного потока грузовиков)

В качестве примера приводится описание паттерна, реализующего последовательность процессов, предшествующих разгрузке грузовика. Паттерн входит в “паттерн обработки объекта грузовик”, состоит из программных блоков на рис. 7.

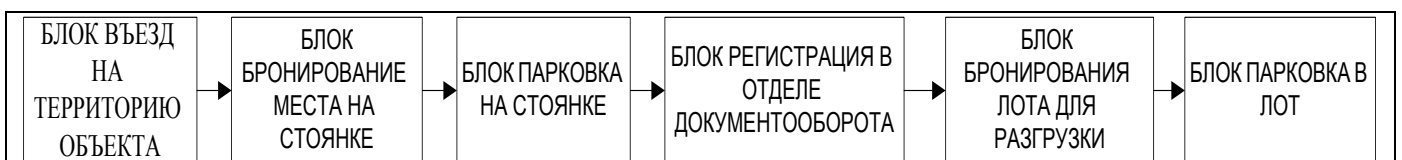


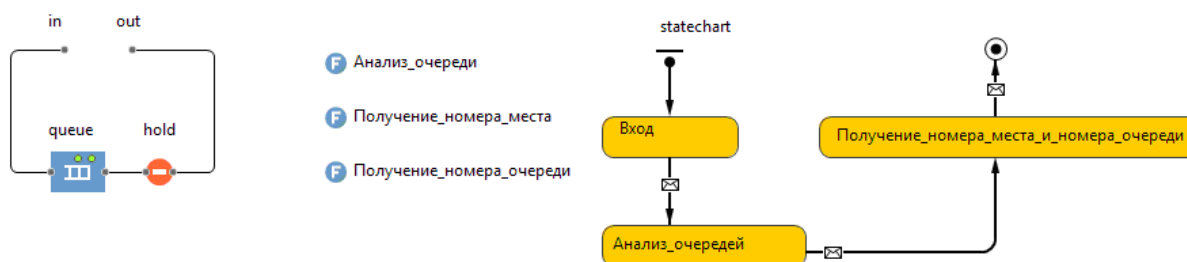
Рисунок 7. Состав паттерна, моделирующего последовательность процессов связанных с объектом грузовик до его разгрузки

Блок “Въезд на территорию объекта”.

Блок моделирует движение грузовика по территории. В нем производится анализ образования очереди на въезде к ОСЛ.

Блок “Бронирование места на стоянке”.

В блоке анализируется наличие свободного места для стоянки и реализуется алгоритм обслуживания очереди. Блок “Бронирование места на стоянке” реализуется классом *Parking_revisor* (рис. 8).



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

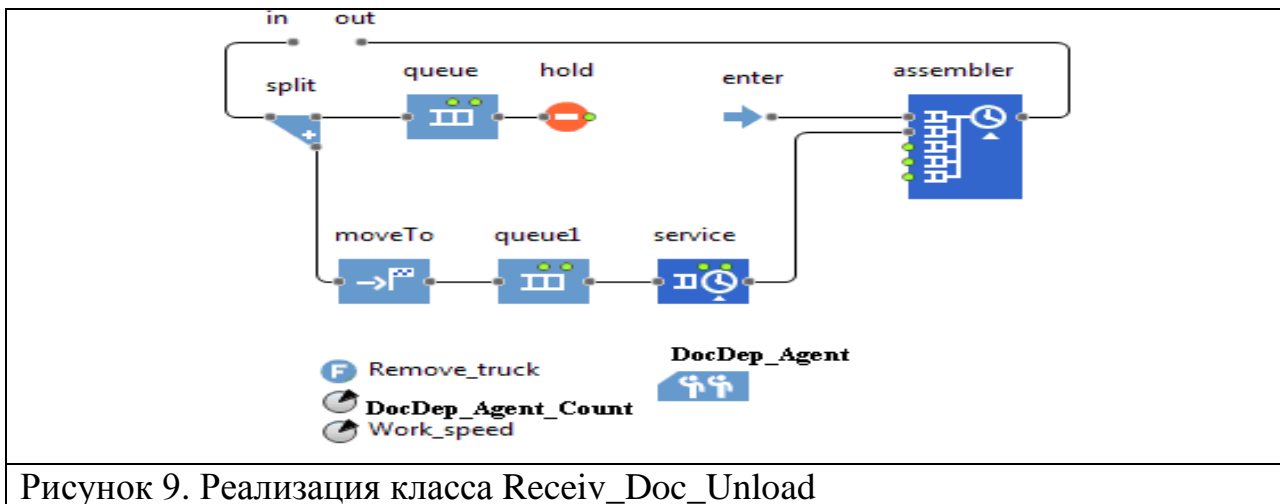
Рисунок 8. Реализация класса *Parking_revisor*

Блок “Парковка на стоянке”.

Блок моделирует алгоритм захвата статического ресурса динамической заявкой (объект грузовик захватывает парковочное место).

Блок “Регистрация в отделе документооборота (ДО)”.

Блок моделирует процесс регистрации документов и рассчитывает время ожидания грузовика. Блок реализован в виде класса *Receiv_Doc_Unload* (рис. 9).



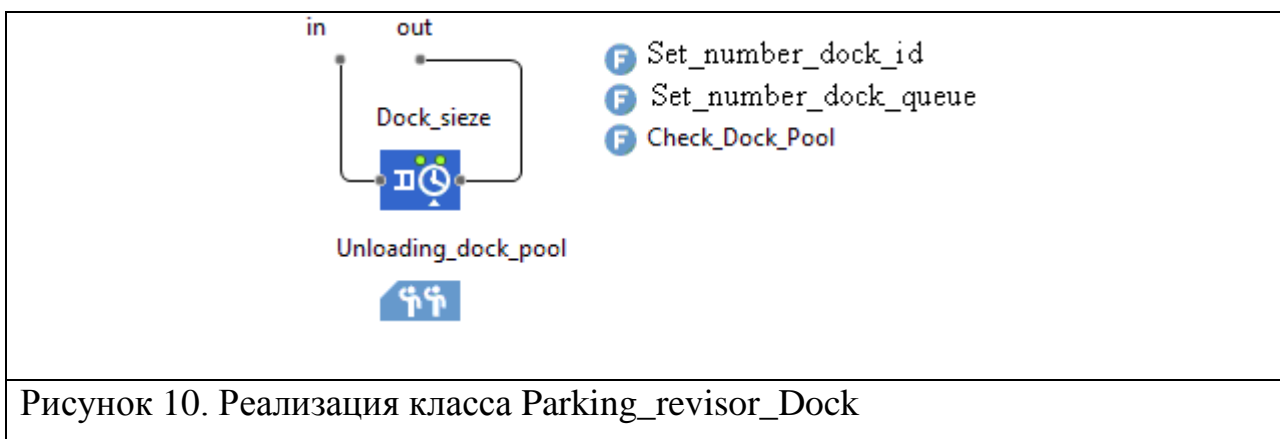
Блок “Бронирование лота для разгрузки”.

В блоке анализируется наличие свободного статического ресурса (разгрузочного лота) и реализован алгоритм бронирования. Блок реализован классом *Parking_revisor_Dock* (рис. 10). В нем использованы функции:

Функция *Check_Dock_Pool* анализирует очереди к разгрузочным лотам.

Функция *Set_number_dock_id* назначает номер лота для разгрузки заявки типа Truck.

Функция *Set_number_dock_queue* назначает номер в очереди на разгрузку к указанному лоту.



Блок “Парковка в лот”.

Блок привязки анимации к моделируемому процессу. Блок реализован классом *Parking_in_Dock* (рис. 11). В нем используется функция *Set_number_delivery_point* бронирования статического ресурса (место на пандусе) для объекта поставка.

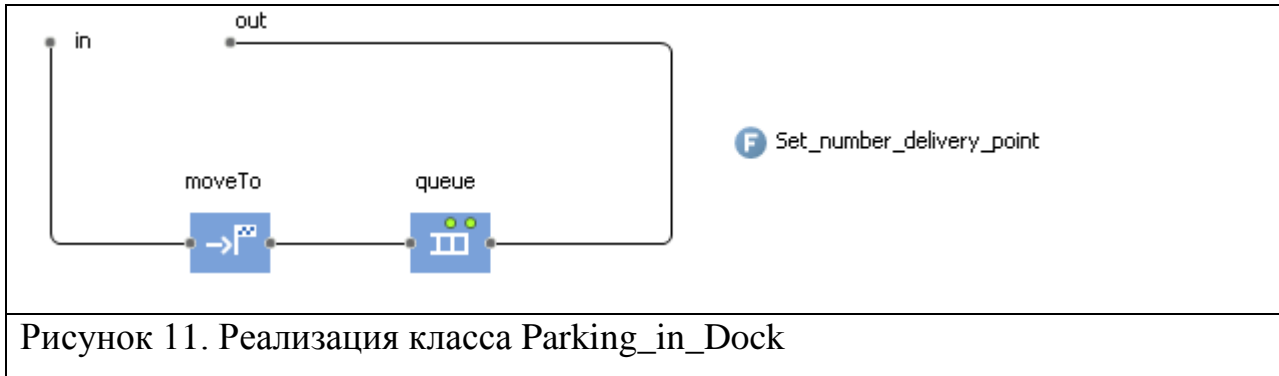


Рисунок 11. Реализация класса *Parking_in_Dock*

Вычислительные эксперименты

На МоделиАП выполнены вычислительные эксперименты:

- по получению динамической оценки загруженности и простоев персонала;
- по выбору более эффективной из двух технологий разгрузки паллет;
- по получению оценки предельной пропускной способности зоны приемки.

Рассмотрим эксперимент по выбору более предпочтительной из двух возможных технологий разгрузки паллет. *Описание эксперимента.* 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 в зоне приемки. В МоделиАП моделируются оба варианта технологий. С помощью панели управления *Интерфейса по выбору технологии разгрузки* устанавливается режим работы модели, соответствующий технологии I или технологии II. На рис.12 слева демонстрируется применение технологии I, справа — применение технологии II.

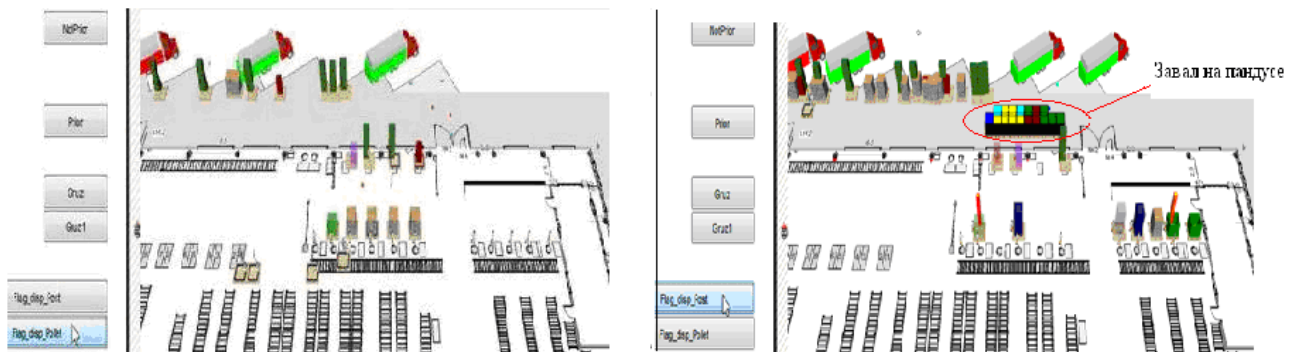


Рисунок 12. Моделирование **технологии I** и **технологии II** диспетчеризации

Визуальные результаты (рис.12) подтверждены расчетами средних значений СВ А и В, где А- длина очереди на пандусе, В- длина очереди к обработчикам. Количество реализаций эксперимента N для вычисления средних значений СВ А и В с заданной точностью $\epsilon=0.1$ и достоверностью $\alpha =0.95$ вычисляется по формуле

$$N = t_{\alpha}^2 \frac{S_{CB}^2}{\epsilon^2} \quad (4),$$

где t_{α} - значение функции Лапласа, для заданного α , S_{CB}^2 - оценка дисперсии случайной величины (А или В). При $S_A^2 = 0.44$ значение $N_A=170$, $S_B^2 = 0.33$ значение $N_B=120$. $N=\max(N_A, N_B)$, $N=170$. Представлены *интерфейсы, содержащие статистическую информацию*, отражающие результаты моделирования в виде гистограмм (рис.13, рис. 14).

$$A_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i = 57$$

$$B_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i = 14$$



Рисунок 13. Моделирование технологии I диспетчеризации

$$A_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i = 212$$

$$B_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i = 21$$

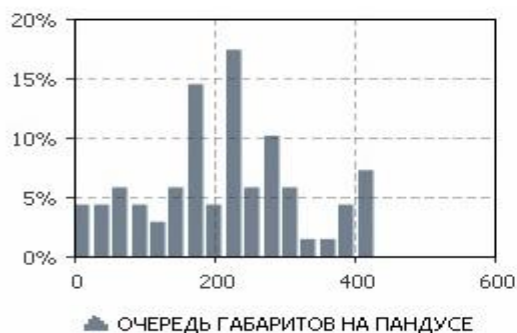


Рисунок 14. Моделирование технологии II диспетчеризации

Вычислительный эксперимент продемонстрировал, что при прочих равных условиях при выборе **технологии II** на пандусе образуются «завалы» (соответствует увеличению среднего времени обработки детали, образованию и росту очереди).

Таким образом, **технология I** предпочтительнее.

Заключение

В работе представлена имитационная *Модель АП*, разработанная по модульному принципу с использованием объектно-ориентированного подхода, что позволяет интегрировать в рамках одной модели элементы, описываемые разнородными математическими схемами[5][6], такими как системы массового обслуживания и конечные автоматы, а также обеспечивает возможность безболезненной реконфигурации программной архитектуры.

Модель входного потока позволяет моделировать как детерминированный, так и случайный поток с групповыми неоднородными заявками[7]. Имитационное моделирование является единственным инструментом, позволяющим исследовать динамику обработки неординарного входного потока сложной структуры при многоканальной обработке [8]. Генерация случайного потока с групповыми неоднородными заявками позволяет накапливать статистику при выполнении вычислительных экспериментов по исследованию функционирования зоны приемки, уточнять оценки функционирования зоны приемки при стратегическом и тактическом планировании.

Модель АП позволяет анализировать деятельность ОСЛ в динамике и отвечать на вопросы «что будет, если...». Таким образом, модель АП позволяет повысить качество управления процессами ОСЛ на этапе приемки, снизить затраты на осуществление производственно-хозяйственной деятельности ОСЛ[4].

Библиографический список

1. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. - М.: Альтекс-А, 2004. - 384 с.
2. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Сопоставление аналитического и имитационного моделирования процессов складской логистики // Труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). Москва, 21-23 октября 2015. С.145-150.
3. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. – М.: Высшая школа, 1982. - 256 с.
4. Киндинова В.В. Имитация, анализ и реинжиниринг операционных процессов складского комплекса авиазапчастей // Вестник Московского Авиационного Института. 2012. Т. 19. № 3. С. 212-220.
5. Бусленко Н.П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах. – М.: Наука, 1964. - 361 с.
6. 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). Алушта, 25-31 мая 2016. С. 556-558
7. Болдинов В.А., Коршунов А.В., Скрынников А.А., Федотов А.Ю. Моделирование авиационных систем обслуживания неделимых групповых заявок // Труды МАИ. 2011. №49. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28260>
8. Рыжиков Ю.И. Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок // Информационные каналы и среды. 2007. № 2. С. 39-49.