

МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ. КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ**В.В. Киндинова, Е.О. Кринецкий, Е.В. Кузнецова (Москва)**

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 по поддержке принятия управленческих решений для ОСЛ через разработку моделей, алгоритмов и программ анализа логистических процессов как динамически развивающихся. Последняя задача наиболее эффективно решается методами системного анализа, важнейшим инструментом которого является компьютерное моделирование, включающее аналитическое моделирование, структурно-функциональное моделирование, 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 можно преодолеть путем совместного использования аналитического, структурно-функционального и имитационного моделирования в рамках концепции комплексного моделирования.

Коммерческие программные комплексы на основе ИМ [2] 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.

В работе предлагается концептуальное описание моделей, разработанных с использованием аналитического и имитационного моделирования и положенных в основу комплексной имитационной моделирующей системы (КИМ-системы), предназначенной для анализа и управления операционными процессами ОСЛ 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, 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. Рассмотрение ОСЛ осуществляется на примере склада авиазапчастей.

Согласно методологии системного анализа построению моделей предшествовали сбор и формализация данных об объекте моделирования – ОСЛ по хранению деталей авиационного технического имущества (АТИ). В этом плане разработаны схемы и диаграммы, описывающие структуру грузопотока, маршруты перемещения, геометрию ОСЛ; проанализирована экспертная и статистическая информация о существующих процессах функционирования ОСЛ; методами структурно-функционального моделирования разработаны диаграммы существующих технологических процессов.

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

- ОСЛ – многономенклатурный, транзитного типа, не предназначенный для длительного хранения. Назначение его – принять оптовые партии товара от поставщиков, комплектовать 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 ограниченный 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 зоны 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 сотрудники с заданной производительностью $p_{i,j}$, $i=1..3$, $j=1..2$.

В настоящее время КИМ-система включает две модели ОСЛ: аналитическую (**АН-модель**) и имитационную (**ИМ-модель**).

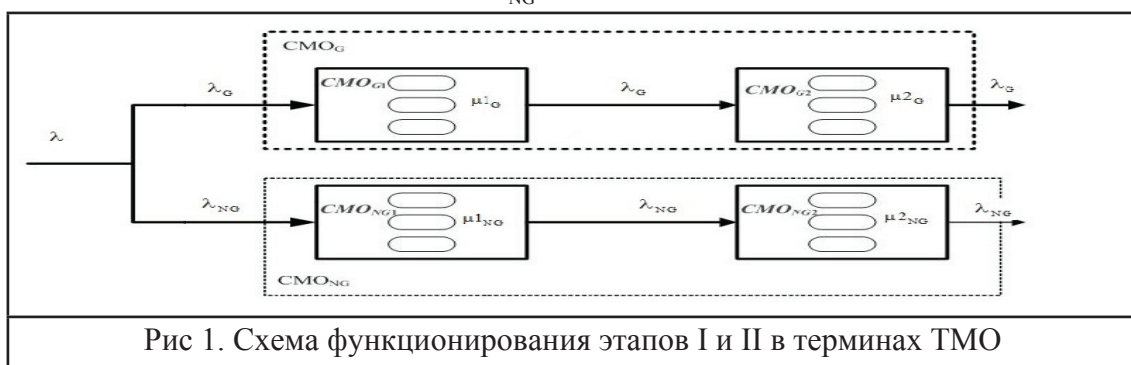
Для построения концептуального представления моделей КИМ-системы был применен агрегативный подход Н.П. Бусленко [1], использующий понятие *агрегата* как абстрактной схемы функционирования сложной системы, а также понятие агрегативной системы (*A – системы*) как сложной системы, которая сама является 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. 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_1^k – соответственно множество и количество агрегатов l -ой A-системы k -ого уровня абстракции, на которой выполняется построение модели, mM_1^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 $AM = \{A_i^k\}$, $i = mM_1^k.. mM_1^k + mn_1^k - 1$, $AM \subseteq A^k$; $QM = \{Q_{ij}^k\}$, где Q_{ij}^k – связь между агрегатами A_i^k и A_j^k , $i, j = mM_1^k.. mM_1^k + mn_1^k - 1$. $QM \subseteq Q^k$, $mM_1^k = 1..M^k$.

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 уточнить решения, найденные на модели верхнего уровня, а также решить задачи, недоступные для модели верхнего уровня.

Построение АН-модели. АН-модель уровня абстракции $k=1$, в соответствии с абстрактной схемой описывает функционирование ОСЛ на этапах 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 приоритета: $СМО_G$ 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 $i, j=1,2$.

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

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} .

Таблица 1
Параметры Пуассоновского распределения для потоков

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

Согласно введенному определению модели: $АН\text{-модель}=\{A_i^1, Q_j^1\}$. Каждую из четырех СМО, входящих в $АН\text{-модель}$, 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 $АН\text{-модели}$: $A_i^1=\{A_i^1\}$, $i=1..4$; $Q_j^1=\{Q_{ij}^1\}$, $i=1..2, j=i+2$ представлено связями Q_{13}^1 – между A_1^1 и A_3^1 ; Q_{24}^1 – между A_2^1 и A_4^1 :

Построение ИМ-модели. ИМ-модель имитирует на детальном уровне (уровень абстракции $k=2$) операционные процессы I этапа 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. 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 I этапа и зоны парковки представлена на рис.2.

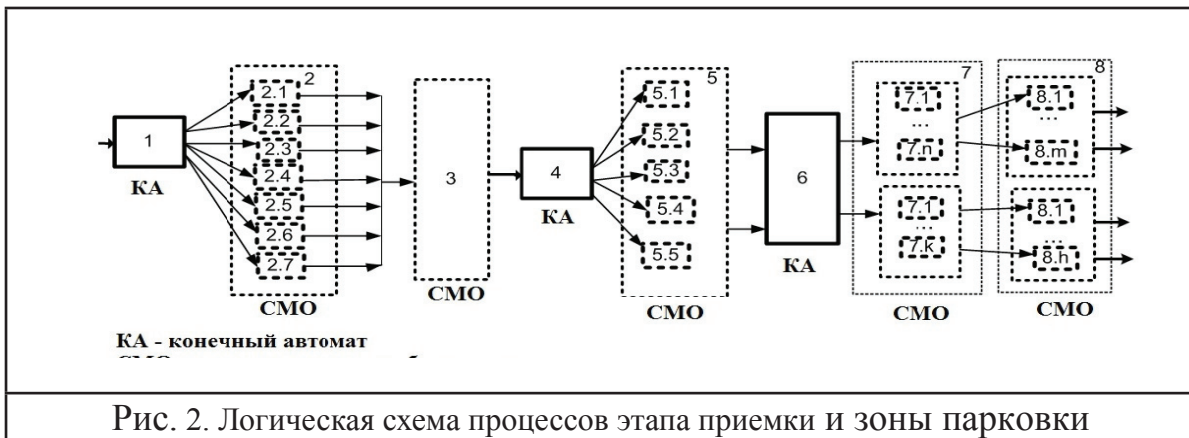


Рис. 2. Логическая схема процессов этапа приемки и зоны парковки

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

Таким образом, для $ИМ\text{-модели}$ 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. $Q_j^2=\{Q_{ij}^2\}$, $i=1..7, j=i+1$.

В соответствии с принципом взаимодействия АН-модель и ИМ-модель описывают процессы I этапа на разных уровнях абстракции. АН-модель позволяет быстро найти грубые оценки характеристик процессов I этапа, которые затем используются для настройки ИМ-модели. ИМ-модель позволяет уточнить оценки, найденные на АН-модели и решить задачи, недоступные для АН-модели. В частности, АН-модель применяется для управления персоналом при изменении интенсивности потока поставок вследствие, например, падения спроса (задача определения области допустимых значений параметра «количество людских ресурсов» и задача определения оптимального распределения людских ресурсов[3]). Полученное оптимальное решение используется для калибровки ИМ-модели. ИМ-модель применяется для оценки требуемой площади ожидания на пандусе для заданного входного потока[4], позволяет выбрать более эффективную технологию диспетчеризации паллет[4], позволяет оценить результаты возможного реинжиниринга процессов, связанных с обработкой деталей, коробок, паллет, поставок, документов, грузовиков, поскольку эти задачи не могут быть решены на уровне АН-модели.

Таблица 2
Формализация процессов логической схемы на основе агрегативного подхода

№	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 объектно-ориентированного подхода (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.

Литература

1. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
2. www.anylogic.com.
3. **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.
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.