

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич  
Должность: Ректор  
Дата подписания: 02.10.2026 10:51:18  
Уникальный программный ключ:  
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**С. М. Каратун**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

Методические указания по выполнению курсовой работы

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Тюмень

Сертификат: 6FA44C50384686A8E7BD5E27735179BC  
Владелец: Ефремова Вероника Васильевна  
Действителен: с 14.06.2022 до 07.09.2023

ТИУ  
2022

Изложены способы использования компьютерных приложений для решения задач имитационного моделирования транспортно-технологических систем при обучении. Компьютерная среда при моделировании обладает достоинствами, свойственными любой информационной системе. Высокая скорость расчетов и обработки информации, большой объем хранения результатов исследования, быстрый поиск и предоставление нужной информации в удобной для человека форме (текст, формулы, графика, видео) и в необходимом объеме. Программная система, описанная в учебном пособии для имитационного моделирования, позволяет планировать проведение эксперимента, получать статистические показатели качества работы для оценки эффективности функционирования системы, проводить факторный анализ и идентификацию законов распределения. Студент, как пользователь, может этими знаниями манипулировать, создавая новые для себя знания, сохраняя их в удобной форме и осуществляя их обработку по заданным преподавателем сценариям. В учебном пособии приведены также некоторые сведения по теории вероятностей и статистике и по планированию эксперимента.

## Предисловие

Использование компьютерных приложений для решения задач в области моделирования транспортно-технологических систем при обучении имеет ряд достоинств, свойственных любой информационной системе. Наиболее важными из них являются высокая скорость расчетов и обработки информации, большой объем хранения результатов работы, быстрый поиск и предоставление нужной информации в удобной для человека форме (текст, формулы, графика, видео) и в необходимом объеме. Облегчение труда преподавателя за счет использования технических средств должно ускорять и улучшать процесс обучения, сделать его более информативным. В случае имитационного моделирования транспортно-технологических систем компьютерные средства единственный безальтернативный вариант.

При использовании того или иного компьютерного приложения присутствует проблема выбора между сложностью процесса обучения работы с программой и ее функциональностью. Чем больше возможностей закладывается в интерфейс компьютерного приложения, расширяющего его функциональность, тем, как правило, труднее и дольше идет процесс получения навыков работы с ним. Преподавателю, как пользователю, требуется значительное время, чтобы разобраться во всех деталях работы с компьютерной средой. Научить использованию среды каждого студента тем более непростая задача. Часто наибольшая часть времени, выделяемого на обучение, уходит не на получение конкретных знаний, а на освоение методов работы с компьютерной средой. Использование универсальных программ в процессе обучения часто неэффективно. Выбор приложения как средства обучения логично связать с минимизацией временных затрат на освоение технологии работы с ним.

В некоторых случаях преподаватели вообще отказываются от использования компьютерных приложений, так как их опыт и методика преподавания дисциплины позволяет им потратить время, необходимое для освоения программной среды, гораздо более эффективно для обучения самого предмета. Но такое решение не позволяет использовать современные средства для достижения высокого качества обучения с точки зрения объема усвоенной информации, количества рассмотренных задач и временных затрат на каждый изучаемый блок. Аспект минимизации времени, необходимого для освоения программных сред, таким образом, является важным.

В современной высшей школе знания хорошо структурированы и документированы, но методика их представления зависит от конкретного преподавателя, его таланта и опыта. При обучении могут быть использованы множество компьютерных приложений, позволяющих проводить исследования в разных предметных областях. Большинство из

них универсальны, рассматриваются как инструмент манипулирования с объектами предметной области, облегчающих работу человека, и не включают разнообразие экспертного опыта преподавателей, их методик предоставления материала. Было бы более эффективно включить знания о методической составляющей процесса обучения в элементы компьютерной среды, сужая при этом возможную область исследований самой предметной области.

Задача состоит в обеспечении для пользователя - студента максимального комфорта, функционального и временного, в получении навыков работы с компьютерной средой.

В этом случае необходима выработка подхода к унификации процесса обучения, приведение его к единообразной форме, позволяющей создать приложения, выполненные по единому сценарию для различных предметных областей, как это реализовано, например, в линейке IDEF для моделирования информационных процессов [2]. Такой подход включения экспертного опыта преподавателей в систему управления компьютерной средой значительно ускорил бы получение навыков работы с конкретной программой.

Одним из путей унификации процесса обучения лежит в создании интерфейса программ, выполненных по единому стандарту. На панель управления выводятся объекты и функции, необходимые для реализации, как самих объектов конкретных знаний, так и методик обучения преподавателя как эксперта в области образования. Реализуется система представления знания, опыт работы преподавателя-эксперта в которой включается в виде объектов в панель управления. Студент, как пользователь, может этими знаниями манипулировать, создавая новые для себя знания, сохраняя их в удобной форме и осуществляя их обработку по заданным преподавателем сценариям.

Рассмотрим вариант создания и использования симулятора, реализующего вышеописанную идею для исследования транспортно-технологических систем с помощью имитационного моделирования сложных систем.

# 1. Имитационное моделирование.

## 1.1. Понятия имитационной модели.

Моделирование является одним из инструментов системного анализа. Модель позволяет исследовать работу системы, не реализуя систему реально, а имитируя ее структуру и связи. При современном проектировании технических систем моделирование является обязательным действием, позволяющим оптимизировать и ускорить весь процесс проектирования. Моделирование - творческий процесс, который предполагает высокий уровень знаний о моделируемом объекте [17].

Задачи построения моделей и использования их для принятия решений при исследовании работы систем сложны и требуют для своего разрешения не только применения формального аппарата, но также опыта, интуиции и знаний лица, принимающего решения [6].

Понятие модели формально определяют как способ представление объекта, системы или понятия в некоторой форме, отличной от их реального существования [17].

Моделирование является средством для объяснения, понимания и совершенствования системы. Сама модель может быть точной копией объекта или отображать некоторые характерные свойства объекта в абстрактной форме. Поэтому моделирование позволяет прогнозировать последствия действий входных сигналов на систему и повышать эффективность выводов проектировщиков.

Модели представляют собой упрощенное и абстрактное представление технических систем. Обычно выбирают для исследования наиболее важные характеристики изучаемой системы.

В математике под моделью понимают множество  $M$ , состоящее из элементов произвольной природы, на которых определено конечное множество отношений  $R1, R2, ..., Rn$  [5].

Степень изоморфизма характеризует сходство модели с системой. Чтобы быть полностью изоморфной, модель должна удовлетворять двум условиям: должно существовать взаимно однозначное соответствие между элементами модели и элементами представляемой системы и должны быть сохранены точные соотношения (взаимодействия) между элементами [17]. Большинство моделей гомоморфны. Они сходны по форме, но являются результатом упрощения и абстракции.

При разработке гомоморфной модели систему обычно разбивают на более мелкие части. Необходимо найти составные части, не зависящие друг от друга. С таким анализом связан процесс упрощения реальной системы (пренебрежения несущественными деталями, принятие предположения о более простых соотношениях). При проектировании определяют что процессы, протекающие в системе, могут быть

детерминированы, либо их поведение описывается известными вероятностными функциями распределения.

Большинство моделей абстрактны и представляют существенные черты поведения объекта, в другой форме и не так детально, как в системе.

При моделировании после анализа частей системы осуществляют их синтез, с учетом всех взаимосвязей между частями. Моделирование не сводится к одному базовому варианту построения модели. Начав с простой модели, продвигаются к более близкой к системе форме, отражающей ситуацию значительно точнее. Между процессом модификации модели и процессом обработки данных имеется непрерывное взаимодействие.

Процесс имитационного моделирования включает следующие этапы:

- система разделяется на ряд более простых частей;
- формулируются цели моделирования;
- подбираются универсальные варианты представления системы;
- задаются обозначения переменных;
- определяются детерминированные или стохастические соотношения.

Разработка модели не сводится к одному базовому виду. Когда модель не поддается математическому описанию, её упрощают. В процессе разработки модели и экспериментирования с ней появляется новая информация о работе системы, что позволяет добиться как можно большего соответствия модели и системы.

При выборе универсальных вариантов моделей для представления системы обеспечивают получение наиболее удачной имитационной модели, с использованием структурных схем, применением системы уравнений и другими математическими приемами. Затем модель приводится к дискретной форме, при этом необходимо строго соблюсти временные соотношения в синтезируемой имитационной модели. В конце проводят испытание, проверка и отладка синтезируемой модели.

Имитационное моделирование, таким образом, представляет собой поэтапный процесс. Вначале определяются основные объекты модели и формулируются законы их связывающие. Затем проводится исследование задач, которые могут быть решены при моделировании. Прямая задача состоит в получении в результате исследования модели выходных данных, их анализ и сравнение с результатами работы существующих реальных систем. Если результаты сравнения адекватны, можно принять выбранную модель и использовать ее для прогноза характеристик системы при различных условиях функционирования.

Обратные задачи состоят в задании характеристик модели таким образом, чтобы выходная информация была сопоставима с необходимыми

результатами наблюдений. При накоплении информации имитационная модель может быть усовершенствована.

## 1.2. Классификация моделей

Единая классификация видов моделирования затруднительна в силу многозначности понятия «модель» в науке и технике. Классификацию можно проводить по различным основаниям: по характеру моделируемых объектов, по сферам приложения и т.п. Моделирование в настоящее время приобрело общенаучный характер и применяется в исследованиях живой и неживой природы [17].

Определим типовые группы моделей, которые могут быть положены в основу системы классификации: модели статические и динамические; стохастические и детерминированные; дискретные и непрерывные; натурные, аналоговые, символические. Представим классификацию моделей в виде шкалы, с одной стороны которой располагаются модели более точно соответствующие системе, а с другой – модели, в качестве компонентов которых используются абстрактные символы (рис.1).

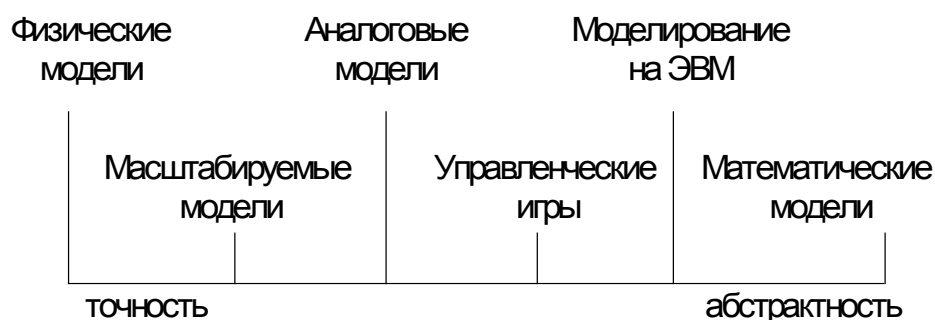


Рис.1. Классификация моделей

Физические модели часто называют натурными, т.к. внешне они напоминают изучаемую систему. Они могут быть в уменьшенном масштабе (модель солнечной системы) или в увеличенном (модель атома), тогда они называются масштабируемые модели [17].

Аналоговые модели - это модели, в которых свойство реального объекта представляется другим свойством, аналогичным по поведению объекта. Графики могут представлять аналоговую модель. График показывает соотношение между различными количественными характеристиками системы и может предсказывать, как будут изменяться одни величины при изменении других. Графические решения возможны также для определения игровых задач, которые могут быть использованы совместно с математическими моделями. Различного рода схемы также являются аналоговыми моделями, например, структурная схема какой-либо организации.

В тех случаях, когда во взаимодействие вступают люди и компьютерные компоненты, моделирование называют играми (управленческими, военными и др.). В конечном итоге принятие решений остается за человеком. Программы только моделируют условия существования системы и предлагают варианты решений.

В математических моделях для представления процессов системы используют символы, а не физические свойства (дифференциальные уравнения и т.п.). Математические модели это совокупность математических объектов и отношений между ними, которая адекватно отображает некоторые свойства объекта. Деление математических моделей происходит по нескольким принципам [17]. В зависимости от характера отображаемых свойств объекта модели могут быть функциональные и структурные. Функциональные отображают процессы функционирования объекта. Они имеют чаще всего форму системы уравнений. Структурные модели могут иметь форму матриц, графов, списков векторов и выражать взаимное расположение элементов в пространстве. Они отражают структурные свойства проектируемого объекта и используются в случаях, когда задачи структурного синтеза удастся ставить и решать, абстрагируясь от физических процессов в объекте.

По способам получения функциональных математических моделей они могут быть теоретические и формальные. Теоретические получают на основе изучения физических закономерностей. Структура уравнений и параметры моделей имеют определенное физическое толкование. Формальные получают на основе проявления свойств моделируемого объекта во внешней среде. Системы изучаются в виде кибернетического «черного ящика».

Математические модели могут линейные и нелинейные в зависимости от вида уравнений и непрерывные и дискретные в зависимости от множества значений переменных.

По форме связей между выходными, внутренними и внешними параметрами выделяют математические модели алгоритмические и аналитические. Алгоритмические модели представляют в виде систем уравнений, а аналитические представляют в виде зависимостей выходных параметров от внутренних и внешних.

В зависимости от того, учитывают уравнения модели инерционность процессов в объекте или не учитывают, выделяют динамические или статические модели.

Моделирование на ЭВМ часто является имитационным моделированием. Имитационное моделирование (ситуационное моделирование) это метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы, которые можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. Результаты будут определяться статистически в зависимости от случайных характеристик процессов.

Экспериментирование с моделью называют имитацией, которая позволяет изучить суть явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте.

Имитационное моделирование является частным случаем математического моделирования, когда не разработаны аналитические модели, либо не разработаны методы решения полученной модели.

Можно выделить несколько видов имитационного моделирования. Агентное моделирование используется для исследования децентрализованных систем, функционирование которых определяется не глобальными правилами, а наоборот глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей состоит в получении представления об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении её отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент является некоторой сущностью, обладающей активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться.

Дискретно-событийное моделирование имеет сферу приложений от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем. В таких моделях динамика системы представляется последовательностью операций таких как «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка», «прибытие», «задержка», «захват ресурса» и другие. Дискретно-событийное моделирование используется для "процессного" моделирования, в котором рассматривают основные события моделируемой системы как операции над некими сущностями - заявками, представляющими клиентов, документы, звонки, пакеты данных, транспортные средства. Эти сущности пассивны, они сами не контролируют свою динамику, но могут обладать определёнными атрибутами, влияющими на процесс их обработки (например, тип звонка, сложность работы) или накапливающими статистику (общее время ожидания, стоимость). Процессное моделирование используется на среднем или низком уровне абстракции. Каждый объект моделируется индивидуально, как отдельная сущность стандартными компонентами модели, но множество деталей "физического уровня" (геометрия, ускорения/замедления) опускается.

Модели системной динамики строят графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени. Созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере для исследования системы. Такой вид моделирования помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. С помощью системной динамики строят модели бизнес-процессов, развития города, модели производства, динамики популяции и экологии.

### 1.3. Функции моделей

Идея представления системы с помощью модели носит общий характер. Дать полную классификацию всех функций модели затруднительно. Общие требования, предъявляемые к моделям, состоят в том, что модель должна быть простой и понятной пользователю, целенаправленной, надежной в смысле гарантии от абсурдных ответов, удобной в управлении и общении с ней, полной с точки зрения решения главных задач [17]. Модель должна адаптивной, позволяющей легко переходить к другим модификациям или обновлять данные, допускающей постепенные изменения, т.е., будучи сначала простой, она может во взаимодействии с пользователем становиться все сложнее.

Рассмотрим пять случаев, которые наиболее широко распространены в качестве исходного материала для определения функций модели [17].

1. Модели могут помочь нам упорядочить нечеткие или противоречивые понятия. Например, представив работы по проектированию систем в виде сетевой модели можно решить, какие шаги и в какой последовательности необходимо предпринимать. Модель позволяет выяснить взаимозависимости, временные соотношения, требуемые ресурсы и др.

2. Все языки содержат неопределенности, определяемые контекстом, и оказываются неточными, когда дело доходит до сложных понятий и описаний. Модели позволяют решить проблему неопределенности и неточности, предоставляя формальные способы общения. Преимущество модели перед словесными описаниями состоит в сжатости, наглядности и точности представления понятий.

3. Модели часто применяются как средство обучения лиц, которые должны уметь справляться со всевозможными случайностями до возникновения критической ситуации, например тренажеры для обучения водителей.

4. Прогнозирование поведения моделируемых объектов является одним из важных применений моделей. Строить ультразвуковой реактивный самолет экономически нецелесообразно, а для предсказания его летных характеристик используют средства моделирования, такие как испытание конструкций в аэродинамической трубе.

5. Модели позволяют производить контролируемые эксперименты в ситуациях, где экспериментирование на реальных объектах экономически нецелесообразно или практически невозможно.

Правильно спланировав эксперимент можно изменять параметры модели, сохраняя остальные параметры и наблюдать результаты эксперимента. Моделируя систему, можно узнать значительно больше о ее внутренних взаимосвязях, чем оперируя с реальной системой. Это становится возможным благодаря измеряемости структурных элементов

модели и тому, что можно контролировать ее поведение и легко изменять ее параметры.

Модель может служить для достижения двух целей: описательной, если модель служит для объяснения и лучшего понимания объекта, и предписывающей, когда модель позволяет предсказать или воспроизвести характеристики объекта, определяющие ее поведение. Модель предписывающего типа может быть описательной, но не наоборот.

Различна степень полезности моделей, применяемых в технике и в социальных науках. В технике модели служат в качестве вспомогательных средств создания новых и модификации построенных ранее систем. В социальных науках модели объясняют существующие системы.

Одним из наиболее мощных средств моделирования, применяемых при исследовании сложных систем, является имитационное моделирование. Оно состоит из процессов создания логико-математической модели исследуемой системы и проведение с ней компьютерных экспериментов. Имитационная модель включает набор инструкций по изменению значений множества характеристик системы, выполнение которых позволяет воссоздать с некоторым приближением процесс функционирования реальной системы. Изучение объекта на его модели можно рассматривать как особый вид эксперимента: модельный эксперимент, отличающийся от обычного эксперимента тем, что в процесс познания включается промежуточное звено – модель, являющаяся одновременно и средством, и объектом экспериментального исследования, заменяющим изучаемый объект [17].

Имитационные модели не способны формировать решение в таком виде, как в аналитических моделях, а служат лишь средством для анализа поведения системы в условиях, которые определяются экспериментатором. Имитационное моделирование имеет целью описать поведение системы; построить теории и гипотезы, которые могут объяснить наблюдаемое поведение; использовать эти теории для предсказания будущего поведения системы. Имитационное моделирование является одним из нескольких методов решения проблем проектирования сложных систем. Поэтому необходимо приспособлять метод к решению конкретной задачи. Имитационное моделирование целесообразно применять при наличии одного из следующих условий [17].

1. Не существует законченной математической постановки данной задачи.
2. Аналитические методы имеются, но очень сложны и трудоемки, и имитационное моделирование дает более простой способ решения.
3. Аналитические решения имеются, но их реализация невозможна из-за отсутствия грамотных математиков.

4. В случае необходимости осуществлять наблюдение за ходом процесса в течение определенного периода, а не только оценки определенных параметров.

5. Имитационное моделирование может быть единственно возможным вследствие трудности постановки эксперимента и наблюдения явлений в реальных условиях.

6. Может понадобиться сжатие шкалы времени как замедление, так и ускорение.

Однако использование имитационного моделирования имеет ряд сложностей. Разработка хорошей имитационной модели часто обходится дорого и требует много времени и высококвалифицированных специалистов в области математики и компьютерного программирования. Кроме этого, имитационное моделирование в действительности не отражает реального положения вещей.

#### **1.4. Этапы процесса имитационного моделирования**

При имитационном моделировании можно выделить следующие этапы процесса разработки модели и проведения с ней эксперимента (рис.2).

Определение границ системы является установление границ, ограничений и измерителей эффективности системы, подлежащей исследованию. Формулирование модели состоит в переходе от реальной системы к логической схеме (абстрагирование). Подготовка данных включает отбор данных, необходимых для построения модели, и представление их в соответствующей форме. Трансляцией модели является программирование или использование компьютерной среды для представления модели на машинном языке.

Оценка адекватности модели реальной системе заключается в повышении степени уверенности, с которой можно судить о корректности выводов, касающихся реальной системы. Стратегическое планирование состоит в планировании эксперимента, чтобы получить необходимую информацию. Тактическое планирование состоит в определении способа проведения каждой серии испытаний, предусмотренных планом эксперимента.

Экспериментирование заключается в процессе осуществления имитации с целью получения желаемых результатов. Интерпретация включает построение выводов по данным, полученным путем имитации. Реализация представляет практическое использование модели и результатов моделирования. Документирование включает регистрацию хода осуществления имитационного моделирования и его результатов.

Имитация требует применения мощных компьютеров при большой выборке данных, поэтому издержки при моделировании велики по сравнению с аналитическими моделями.



Рис. 2. Процесс имитации

### 1.5. Структура моделей

Математические и физические модели могут быть сложны, но основы их построения всегда просты. В общем виде структуру любой модели можно представить в математическом виде следующим образом:

$$E = f ( X_i , Y_i ) , \quad (1)$$

где  $E$  - результат действия системы;

$X_i$  – управляемые переменные и параметры;

$Y_i$  - неуправляемые переменные и параметры;

$f$  – аналитическая или алгоритмическая зависимость между  $X_i$ ,  $Y_i$ .

Модель представляет собой комбинацию следующих составляющих: компонент, параметров, переменных, функциональных зависимостей, ограничений и целевых функций.

Компоненты являются составными частями, которые при соответствующем объединении образуют систему. Компонентами могут быть как ее части (подсистемы) так и элементы системы. Система определяется как группа или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного воздействия [17]. Компоненты в этом случае могут рассматриваться как объекты.

Параметрами являются величины, которые могут выбираться произвольно, в отличие от переменных, которые могут принимать значения, определяемые видом заданной функции. Параметры после того, как они установлены, являются постоянными величинами.

Для модели переменные могут быть экзогенными и эндогенными. Экзогенные (входные) переменные порождаются вне системы и являются результатом воздействия внешних причин. Эндогенные переменные возникают в системе в результате воздействия внутренних причин (это переменные состояния). Они могут являться выходными переменными.

Аналитическая или алгоритмическая зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компоненты или выражают соотношения между компонентами системы. Соотношения могут быть стохастическими или детерминированными. Детерминированные соотношения представляют собой тождества или определения, которые устанавливают зависимости между определенными параметрами и переменными в случаях, когда процесс на выходе системы однозначно определен. Стохастические соотношения представляют переменные, которые при данной входной информации дают неопределенный результат.

Ограничения устанавливают пределы изменения значений переменных или ограничивающие условия распределения тех или иных переменных. Искусственные ограничения могут вводиться разработчиком. Естественные ограничения определяются самой системой вследствие присущих ей свойств.

Целевая функция (функция критерия) включает отображение целей и задач системы и необходимых правил оценки их выполнения. Цели могут быть сохранение и приобретение. Цели сохранения связаны с сохранением или поддержанием каких-либо ресурсов (энергетических) или состояний (безопасности). Цели приобретения связаны с приобретением новых ресурсов или достижением определенных состояний.

## **1.6. Процесс формализации функционирования сложной системы**

Любая модель реальной системы является абстрактным, формально описанным объектом. Модель, описывающая формализованный процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные, характерные его закономерности, оставляя в стороне несущественные, второстепенные факторы [17].

Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. В результате этого появляется содержательное описание процесса. Содержательным описанием является первая попытка изложить закономерности, характерные для исследуемого процесса, и поставить задачу. Содержательное описание дает сведения о физической природе и количественных характеристиках объектов системы, о характере взаимодействия между этими объектами, о месте каждого объекта в системе. Содержательное описание может быть составлено после детального изучения процессов, протекающих в системе.

Кроме описания самой системы в содержательное описание включают цели моделирования, которые содержат перечень искомых величин. Эта часть формализации может быть выполнена без участия специалистов по моделированию.

Постановка задачи создания модели должна содержать четкое изложение идеи предполагаемого исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования и установить те факторы, которые учитываются при построении модели. Сюда же включаются данные, необходимые для исследования: численные значения известных характеристик и параметров процесса. Содержательное описание служит для построения формализованной схемы и модели процесса.

Формализованная схема процесса разрабатывается в том случае, когда из-за сложности процесса или трудностей формализации некоторых его элементов непосредственный переход от содержательного описания к модели невозможен или нецелесообразен.

Для построения формализованной схемы необходимо выбрать характеристики процесса, установить систему параметров, определяющих процесс, определить все зависимости между характеристиками и параметрами с учетом факторов, которые принимаются во внимание при формализации. На этом этапе прилагается уточненная совокупность всех исходных данных, известных параметров и начальных условий. Содержательное описание может не дать необходимых сведений для построения формализованной схемы. В этом случае необходимы дополнительные эксперименты и наблюдения за исследуемым процессом.

В имитационном моделировании для преобразования формализованной схемы в модель необходимо записать в аналитической

или алгоритмической форме все соотношения, которые еще не были записаны, выразить условие в виде системы неравенств, а также придать аналитическую форму другим сведениям, содержащимся в формализованной схеме.

Обычно в компьютере числовой материал используют в виде аппроксимирующих выражений, удобных для вычислений. Для значений случайных величин выбирают функции плотности типичных законов распределений.

Существует системный подход к изучению сложных проблем, т.е. изучают поведение системы в целом, а не концентрируют внимание на отдельных ее частях. На этапе содержательного описания при формировании представления о системе устанавливают признаки существования подсистем. Разработчик устанавливает, какие компоненты системы будут включены в модель, какие элементы будут исключены или будут считаться частью окружающей среды и какие структурные взаимосвязи будут установлены между ними. В этом процессе формировании имитационной модели решающую роль играют экспертные оценки и интуиция.

Первый шаг при создании модели состоит в определении ее целевого назначения. Можно моделировать систему разными способами. Элементы модели и их взаимосвязи, поэтому должны быть выбраны с учетом спецификации задачи, которую должна решать каждая система. Если рассматривать автомобильный сервисный центр, то мастер рассматривает его как объект обслуживания автомобилей, а социолог рассматривает его как окружающую среду.

При моделировании систем или отдельных компоненты и элементов сталкиваются с задачами нескольких типов. Так как у компонент выделяют три основных объекта: вход, внутренняя структура и отклик (выход), чтобы моделировать работу, необходимо знать два из этих трех объектов.

Если известно уравнение, описывающее функционирование или структуру системы, можно узнать отклик на входной сигнал, решая прямую задачу моделирования. Уравнение можно вывести в ходе проектирования системы либо на основе исследования подобных систем.

Если по отклику и математическому описанию системы находят входной сигнал, решается обратная задача. Эта задача относится к классу задач управления.

Гораздо сложнее задача, если известны входные и выходные сигналы системы, а необходимо найти математическое описание работы самой системы. Эта задача идентификации или структурного синтеза системы. Трудность состоит в том, что состояние между входами и выходами компонент может быть описано различными математическими выражениями.

## 2. Формирование значений случайных величин

### 2.1. Область применения метода Монте-Карло

Основой для проведения компьютерных экспериментов с использованием имитационного моделирования является метод Монте-Карло, который также называется методом статистического моделирования. До появления компьютеров методом статистического моделирования не мог получить широкого распространения, так как моделирование случайных величин вручную очень трудоемкий процесс [3].

Сущность метода заключается в том, что вместо того, чтобы описывать исследуемый случайный процесс аналитически, составляется алгоритм, имитирующий этот процесс. В алгоритм включаются специальные процедуры для моделирования случайностей. Конкретное осуществление алгоритма складывается каждый раз по-иному, со своими результатами. Множество реализаций алгоритма используется как некий искусственно полученный статистический материал, обработав который методами математической статистики, можно получить любые характеристики: вероятности событий, математические ожидания, дисперсии случайных величин.

Рассмотрим в качестве примера квадрат со стороной  $r$ . Его площадь равна  $S_1 = r^2$ . Если в него вписана четверть круга радиуса  $r$  с площадью

$S_2 = \frac{\pi r^2}{4}$ , то отношение  $\frac{S_2}{S_1} = \frac{\pi}{4}$ . Это отношение и число  $\pi$ , можно

приблизительно получить, проделав следующие статистические испытания. Будем бросать на лежащий лист бумаги мелкие крупинки так, чтобы они рассыпались по поверхности листа случайным образом. Крупинки вне квадрата учитывать не будем. Подсчитаем  $N_1$  - число крупинок, попавших в квадрат  $S_1$  и  $N_2$  - число крупинок в пределах области  $S_2$ . Поскольку крупинки имеют одинаковую вероятность попасть в любой участок рисунка, то отношение  $N_2 / N_1$  при достаточно большом числе бросаний будет приблизительно равным отношению площадей, то есть  $\pi / 4$ .

По результатам статистических испытаний отыскивается определенное число. Случайность в распределении крупинок используется в качестве инструмента, при помощи которого получается детерминированный результат: приближенное значение числа  $\pi$ .

Методом Монте-Карло решаются многие детерминированные математических задачи. Для них можно придумать вероятностную модель, позволяющую решать эти задачи, как показано в примере выше. Кроме этого, метод позволяет моделировать любой процесс, на протекание которого влияют случайные факторы. В сущности метод Монте-Карло

универсален. Однако его нет смысла применять к простым задачам, имеющим аналитическое решение. Целесообразным применением метода Монте-Карло становится, когда процедура его реализации проще аналитического расчета.

Метод статистического моделирования может быть применим для исследования стохастических процессов, не поддающихся в силу своей сложности аналитическому описанию.

## 2.2. Общие сведения о случайных числах

Случайные числа являются реализациями последовательности взаимно независимых и одинаково распределенных случайных величин. В основе получения случайных чисел может лежать любое распределение  $F$ .

Для получения случайных чисел экспериментатор может воспользоваться специальными таблицами теории вероятностей, либо применить аналитический метод, который будет называться генератором случайных чисел.

Рассмотрим свойства равномерно распределенной случайной величины [6]. Непрерывная случайная величина  $\xi$  имеет равномерное распределение на интервале  $[a, b)$ , если на этом интервале плотность распределения случайной величины постоянна, а вне интервала равна нулю.

Закон равномерного распределения аналитически можно задать в виде плотности и функции распределения, следующим образом:

$$f_{\xi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \notin [a, b); \\ \frac{1}{b-a} & \text{при } x \in [a, b); \end{cases} \quad \text{или} \quad F_{\xi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a; \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x < b; \\ 1 & \text{при } x \geq b. \end{cases} \quad (2)$$

Математическое ожидание равномерного распределения находится посередине интервала  $[a, b)$ :  $M(x) = \frac{a+b}{2}$ . Дисперсия и среднеквадратическое отклонение соответственно равны:

$$D(\xi) = \frac{(b-a)^2}{12}; \quad \sigma(\xi) = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Случайную величину с равномерным распределением на интервале  $[0,1)$  обозначим через  $R$ ; плотность и функция распределения ее примут вид (4)

$$f_R(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \notin [0,1); \\ 1 & \text{при } x \in [0,1); \end{cases} \quad \text{или} \quad F_R(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ x & \text{при } 0 \leq x < 1; \\ 1 & \text{при } x \geq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Математическое ожидание  $M(R) = 1/2$ , дисперсия  $D(R) = 1/12$ . Графики плотности  $f_R(x)$  и функции распределения  $F_R(x)$  изображены на рис.3. Необходимым и достаточным условием равномерного распределения на интервале  $[0,1)$  является следующее: вероятность попадания случайной величины в любой подинтервал интервала  $[0,1)$  равна длине этого подинтервала.

Из вышеизложенного ясно, что если имеется возможность получать значения случайной величины  $\xi$  или  $R$ , то записанная последовательность этих значений и составит множество случайных чисел с равномерным распределением. Процесс получения значений случайной величины называют ее моделированием. Рассмотрим возможные способы получения последовательностей случайных чисел с равномерным распределением, которые были использованы для составления таблиц.

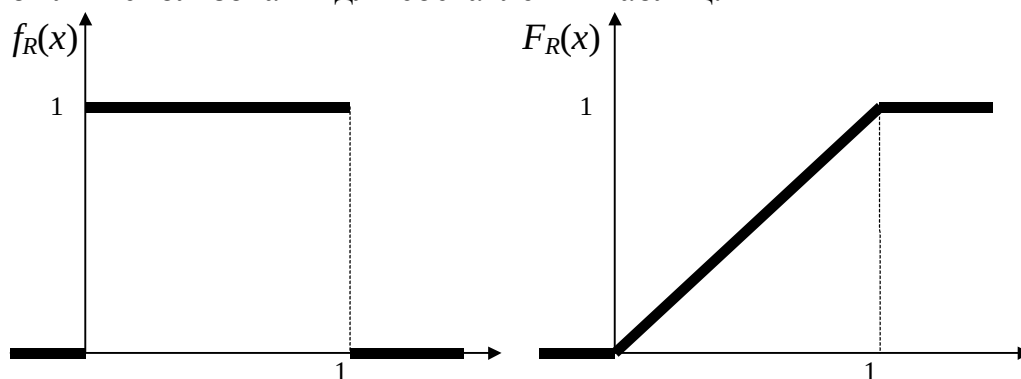


Рис. 3. Плотность и функция равномерного распределения

Для выработки случайных чисел привлекаются генераторы случайных чисел, которые созданы как соответствующие компьютерные программы. С помощью этих программ по некоторому алгоритму получают последовательности чисел. Алгоритм построен так, что знаки 0 и 1 появляются в среднем одинаковое число раз и отсутствует зависимость между появлениями этих знаков и сформированными из них многозначными числами.

Числа, являющиеся результатами соответствующей вычислительной процедуры, в отличие от случайных чисел, получающихся при подбрасывании монеты или вытаскивании карточек из урны, называются **псевдослучайными**, или **квазислучайными**. Генераторы, созданные как соответствующие компьютерные программы, называются программными генераторами. Большинство алгоритмов для получения псевдослучайных чисел имеют вид

$$x_{n+1} = F(x_n), \quad (5)$$

где  $F$  означает совокупность операций, которые надо проделать над числом  $x_n$ , чтобы получить  $x_{n+1}$ . Наиболее распространенный алгоритм для получения псевдослучайных чисел был предложен Д. Лемером.

В алгоритме Лемера берутся два целых числа: множитель  $a$  и модуль  $m$ . Последовательность случайных чисел вычисляется следующим образом:

1) число  $x_1$  известно с предыдущего шага; вычисляется произведение  $ax_i$ ;

2) число  $ax_i$  делится на  $m$ ; получается целое число  $q$  и целочисленный остаток  $x_{i+1}$ , что можно представить в виде

$$\begin{aligned} ax_i &= qm + x_{i+1}; \\ 0 \leq x_{i+1} &\leq m-1; \end{aligned} \quad (6)$$

3) так как  $x_{i+1}$  - число между 0 и  $m$ , то нужно его еще разделить на  $m$ , чтобы получить число между 0 и 1:

$$r_{i+1} = x_{i+1} / m. \quad (7)$$

Соотношение (6) записывается обычно в виде

$$x_{i+1} = ax_i \pmod{m} \quad (8)$$

При этом говорят, что числа  $ax_i$  и  $x_{i+1}$  сравнимы по модулю  $m$ , т.е. они являются равноостаточными при делении на  $m$ . Формулу (8) называют сравнением по модулю, а остаток  $x_{i+1}$  - наименьшим положительным вычетом по модулю  $m$ . Этим объясняются названия алгоритма: метод мультипликативного сравнения или метод вычетов.

Последовательности случайных чисел, полученные методом мультипликативного сравнения, периодически повторяются. Это связано с тем, что числа  $x_i$  могут принимать только значения 0, 1, 2, ...,  $m-1$ . Самое большее через  $(m-1)$  шагов полученное число должно появиться опять. За ним повторяется и вся последовательность. Таким образом, длина периода при модуле  $m$  не может превышать  $m-1$ .

Статистические свойства последовательности зависят от выбора начального значения  $x_0$  и  $a$ . Выбор  $m$  не зависит от системы счисления, а только от длины машинного слова. Так, для 32-разрядного машинного слова можно выбрать  $m = 2^{31} - 1$  и множитель  $a = 16807$ . Число  $2^{31} - 1$  является простым. При его выборе последовательность случайных чисел достигает максимально возможной длины периода.

Наиболее часто применяемые в настоящее время генераторы равномерно распределенных случайных величин в общем виде можно представить таким образом:

$$x_{n+1} = \sum_{i=0}^j a_i x_{n-i} + \mu \pmod{m}, \quad (9)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_j, \mu$  и  $m$ , а также получаемые числа  $x_1, x_2, \dots$  являются целыми числами. Генераторы этого вида называются линейными (конгруэнтными). Образование равномерно распределенных чисел на интервале можно представить так:

$$r_{n+1} = x_{n+1} m^{-1}. \quad (10)$$

Рассмотренный выше пример получения случайных последовательностей методом мультипликативного сравнения является частным случаем линейного генератора. Подставляя в (9)  $\mu = a_1 = \dots = a_j = 0$  и положив, что  $a_0 > 0$ , получим

$$x_{n+1} = a_0 x_n \pmod{m}. \quad (11)$$

Генератор вида (11) называется **мультипликативным**. Если в (9) положить  $a_0 > 0, \mu > 0$ , а  $a_1 = a_2 = \dots = a_j = 0$ , то получим выражение для смешанного генератора

$$x_{n+1} = a_0 x_n + \mu \pmod{m}. \quad (12)$$

И наконец, если в (9) положить  $\mu = a_2 = \dots = a_j = 0$  и  $a_0 = a_1 = 1$ , то генератор такого вида называется **аддитивным** или генератором Фибоначчи:

$$x_{n+1} = x_n + x_{n-1} \pmod{m}. \quad (13)$$

Генератор вида (9), где все  $a_i = 0$  или все  $a_i = 1, i = \overline{0,1}$ , называется **обобщенным аддитивным** генератором, или обобщенным генератором Фибоначчи.

С помощью рекуррентных соотношений невозможно получить независимые реализации случайной величины  $R$ . Это связано с тем, что число используемых двоичных или десятичных разрядов в ЭВМ ограничено. Получаем так называемые квазиравномерные случайные числа. При достаточно большом числе разрядов квазиравномерная случайная величина хорошо аппроксимирует равномерную случайную величину.

С помощью программного генератора получают числа  $x_1, \dots, x_n$ , которые рассматриваются как случайные. Для проверки параметров распределения применяют статистические критерии проверки гипотез. Эти критерии в основном охватывают проверку тех свойств, которыми должны обладать случайные числа.

С помощью критериев согласия проверяется гипотеза о том, что выборка  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  произведена из генеральной совокупности с определенным распределением вероятностей. Наиболее часто применяются для этой цели критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  (критерий

частот) и критерии, учитывающие различные свойства данной генеральной совокупности.

Случайные числа, равномерно распределенные на интервале от 0 до 1, удовлетворяют следующим свойствам.

Среднее значение чисел  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$ , т.е.  $\bar{x} = \sum_{i=0}^{N-1} x_i / N$  не должно существенно отличаться от значения  $1/2$ .

Среднее значение квадратов чисел  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  не должно существенно отличаться от  $1/3$ .

Дисперсия чисел  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  не должна существенно отличаться от  $1/12$ .

Коэффициенты асимметрии и эксцесса чисел  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  не должны существенно отличаться соответственно от 0 и -1.2.

Разделим интервал  $[0,1]$  на  $s$  частей:  $0 = a_0 < a_1 < \dots < a_s = 1$ .

Доля чисел в последовательности  $x_0, x_1, \dots$ , которая попадает в интервал  $[a_j, a_{j+1})$ , должна несущественно отличаться от величины  $a_{j+1} - a_j, j = 0, 1, \dots, s-1$ .

Критерий  $\chi^2$  используется во многих местах. Независимость чисел, появляющихся друг за другом в вырабатываемой последовательности, проверяется с помощью коэффициента автокорреляции, теста перестановок, коллекционера, и других.

## 2.4. Моделирование случайных величин с заданным законом распределения

Существуют различные методы преобразования случайной величины  $R$ , равномерно распределенной на интервале  $[0,1]$ , в случайную величину  $X$  с заданным законом распределения. Один из них - метод обратных функций [4].

Пусть случайная величина  $X$  непрерывна и имеет заданную плотность вероятности  $f(x)$ .  $F(x)$  - функция распределения  $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$ .

Можно доказать следующее утверждение. Если случайная величина  $X$  имеет плотность распределения  $f(x)$ , то случайная величина  $R = \int_{-\infty}^x f(u)du$  имеет равномерное распределение на интервале  $[0,1]$ .

На основании этого утверждения получаем следующее правило. Для того, чтобы найти возможное значение  $x_j$  непрерывной случайной величины  $X$ , зная ее плотность вероятности  $f(x)$ , надо выбрать случайное

число  $r_j$  и решить относительно  $x_j$  уравнение  $\int_{-\infty}^x f(u)dx = r_j$  или уравнение

$$\int_a^x f(u)dx = r_j, \text{ где } a - \text{наименьшее конечное возможное значение } X.$$

Справедливо и обратное утверждение. Если  $F(x)$  - функция распределения некоторой непрерывной случайной величины, а  $R$  - случайная величина с равномерным распределением на интервале  $[0,1]$ , то случайная величина

$$X = F^{-1}(R) \quad (14)$$

имеет функцию распределения  $F(x)$ , где  $F^{-1}$  - функция, обратная по отношению к  $F$ . Если закон распределения задан функцией распределения, то правило получения значений случайной величины  $X$  заключается в следующем.

Получим случайную величину  $R$ , равномерно распределенную на интервале  $[0, 1]$ . Затем вычислим значение случайной величины  $X$  по формуле  $X = F^{-1}(R)$ .

Пример 1. Случайная величина  $X$  имеет экспоненциальный (показательный) закон распределения

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}; x \geq 0; \lambda > 0; \quad (15)$$

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda x}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  – параметр распределения,  $M(x) = 1/\lambda$ .

Требуется найти формулу для моделирования случайной величины  $X$  с помощью равномерно распределенной случайной величины  $R = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ .

Находим обратную по отношению к  $F$  функцию. Имеем

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - R). \quad (17)$$

Так как  $1-R$  имеет то же самое распределение, что и  $R$ , то удобнее при нахождении значений случайной величины  $X$  пользоваться формулой

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln R \quad (18)$$

Случайные числа с экспоненциальным распределением вычисляются по формуле

$$x_n = -\frac{1}{\lambda} \ln r_n. \quad (19)$$

Пример 2. Функция равномерного распределения случайной величины  $X$  на интервале  $[a, b]$  равна  $F(x) = (x - a) / (b - a)$ . Составим уравнение согласно (14):  $(x - a) / (b - a) = r$ . Откуда

$$x = a + r(b - a). \quad (20)$$

Обращение функции распределения во многих случаях представляет собой сложную численную задачу. Поэтому метод не всегда применим. Однако для обратной функции  $F^{-1}$  иногда можно найти достаточно хорошую аппроксимацию.

Другой метод моделирования случайной величины, предложенный Дж. Нейманом, называется методом отбора [1,4]. Метод отбора применим для получения реализаций только таких случайных величин, закон распределения которых может быть задан с помощью функции плотности.

Рассмотрим моделирование этим методом одномерной случайной величины  $X$ , определенной на интервале  $(a, b)$  с плотностью  $f(x)$ . Вне этого интервала  $f(x) = 0$ , и, кроме того, плотность распределения ограничена сверху, т.е.  $f(x) \leq c$ , где  $c$  - величина постоянная. Процедура получения значений случайной величины  $X$  заключается в следующем.

Получаем два независимых значения  $r_1$  и  $r_2$  случайной величины  $R$  с равномерным распределением на интервале  $[0, 1]$ . Затем строим точку с координатами  $(z_1, z_2)$ , где  $z_1 = a + r_1(b - a)$ ,  $z_2 = r_2 c$ , по (20). Если  $z_2 < f(z_1)$ , то полагаем, что случайная величина  $X$  приняла значение  $z_1$ ; если  $z_2 \geq f(z_1)$ , то точка  $z = (z_1, r_2)$  отбрасывается, и вычисления повторяются с получением новой пары случайных чисел  $\{r_n\}$  по пункту 1. Полученные таким образом значения являются реализациями случайной величины  $X$  с плотностью  $f(x)$ .

Пример3. Рассмотрим получение случайных чисел, представляющих собой реализацию случайной величины  $X$  с функцией распределения  $F(x) = x^2$  на интервале  $[0, 1]$ . Плотность этого распределения  $f(x) = 2x$  ограничена сверху, например  $c = 2$ . Алгоритм моделирования сводится к следующему.

Получаем два случайных числа  $r_1$  и  $r_2$ , равномерно распределенных на интервале  $[0, 1]$ . Строим точку с координатами  $(z_1 = r_1, z_2 = 2r_2)$ . Если  $2r_2 < r_1$ , то полагаем, что случайная величина  $X$  приняла значение  $x_1 = r_1$ . В противном случае повторяем пункт 1 и т.д.

Третий метод моделирует нормально распределенные числа. При моделировании различных явлений возникает потребность иметь в распоряжении последовательности случайных чисел, отвечающих нормальному закону распределения.

На первом этапе выполняют реализацию случайной величины с плотностью нормального распределения  $N(0, 1)$ . При помощи линейного преобразования

$$y_i = \mu + \sigma x_i, i=1, 2, \dots, \quad (21)$$

при любом  $\mu$  и  $\sigma > 0$  можно затем получить последовательность случайных чисел  $\{y_n\}$ , отвечающих распределению  $N(\mu, \sigma^2)$ .

Один из самых известных методов реализации нормально распределенной случайной величины при использовании ЭВМ основан на центральной предельной теореме: распределение суммы независимых случайных величин  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) приближается к нормальному распределению при неограниченном увеличении  $n$ , если выполняются следующие условия: все величины имеют конечные математические ожидания и дисперсии. Ни одна из величин по своему значению резко не отличается от всех остальных [1].

Согласно этой теореме можно сконструировать алгоритм реализации случайной величины  $X$  на основе аппроксимации распределения  $N(0, 1]$  суммой независимых случайных величин  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , равномернораспределенных на интервале  $[0, 1)$ . Так как каждая из них имеет  $M(R_i)=1/2$  и  $D(R_i)=1/12$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , то

$$M\left(\sum_{i=1}^n R_i\right) = \frac{n}{2}, \quad D\left(\sum_{i=1}^n R_i\right) = \frac{n}{12}. \quad (22)$$

Распределение нормированной нормальной случайной величины

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n R_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \quad (23)$$

по центральной предельной теореме при достаточно больших значениях  $n$  приближается к  $N(0,1)$ . Практика показывает, что при  $n=12$  аппроксимация уже довольно удовлетворительна. Тогда формула (21) принимает вид

$$X = \sum_{i=1}^{12} R_i - 6. \quad (24)$$

Таким образом, алгоритм получения последовательности случайных чисел, отвечающих распределению  $N(0,1)$ , сводится к моделированию случайных величин  $R_i$  ( $i=1, \dots, 12$ ), операции сложения этих величин и вычитания из полученной суммы 6.

### **3. Имитационное моделирование транспортно-технологических систем**

#### **3.1 Описание моделей транспортно-технологических систем как сетей обслуживания**

Проблема исследования процессов функционирования систем, которые мгновенно изменяют свое состояние под воздействием внешних и внутренних событий, является достаточно актуальной. При описании функционирования технической системы на модели, можно описать структуру системы с определенными параметрами, входными и выходными связями системы со средой. Главной причиной множественности входов и выходов в модели является то, что всякая реальная система, как и любой объект, взаимодействует с объектами окружающей среды неограниченным числом способов.

Строя модель системы, из бесчисленного множества связей отбирают конечное их число для включения в список входов и выходов. Для того, чтобы дать единое математическое описание всем элементам сложной системы и тем самым добиться решения важных теоретических и практических вопросов системного анализа, необходимо создавать некоторые абстрактные схемы для формализации реальных объектов.

Важнейшим моментом процесса моделирования является выбор способа представления модели исследуемого объекта. Если целью исследования являются временные характеристики работы системы, то в качестве математической модели часто выбирается одна из абстрактных схем функционирования сложных систем в виде системы или сети обслуживания. Абстрактные системы массового обслуживания (СМО) [4] используют дискретный подход к созданию моделей в качестве формализованных представлений объектов моделирования, которые для простоты назовем сети обслуживания (СО). На сегодняшний день теория систем массового обслуживания является одним из основных средств анализа функционирования самых разнообразных систем.

В терминах систем массового обслуживания описываются многие реальные системы: вычислительные системы, узлы сетей связи, системы посадки самолетов, магазины, производственные участки - любые системы, где возможны очереди и отказы в обслуживании. К ним относятся моделирование экономических, производственных, социальных, транспортных, вычислительных систем и т.д. В терминах сетей обслуживания могут быть представлены многие транспортные задачи, такие как работа погрузочно-разгрузочных комплексов (порты, товарные станции), работа предприятий и организаций сферы обслуживания транспорта, производственные участки и т. д.

Сети обслуживания отличаются высокой визуальной наглядностью отображения моделируемых объектов и вследствие этого сравнительной простотой перехода от реальных объектов к моделям.

Универсальным методом исследования сетей обслуживания является имитационное моделирование, т. е. написание компьютерной программы, имитирующей процесс функционирования системы, и проведение экспериментов на этой программе с целью получения статистических оценок характеристик моделируемой системы. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическими методами является возможность решения более сложных задач и построение более сложных моделей. Имитационные модели позволяют учитывать такие факторы, как нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и другие, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. Используя результаты имитационного моделирования, можно описать поведение системы, оценить влияние различных параметров системы на ее характеристики, выявить преимущества и недостатки предлагаемых изменений, прогнозировать поведение системы

Широко распространено имитационное моделирование в области моделирования транспортно-технологических систем, реализующее универсальные модели сетей обслуживания и требующее значительных объемов вычислений, генерации случайных чисел и проведение статистической обработки. Построение и исследование подобных моделей, как и любых компьютерных приложений, можно проводить на основе универсальных языков программирования или специализированных языков моделирования и компьютерных оболочек. К специализированным языкам можно отнести язык моделирования очередей GPSS. Компьютерная среда AnyLogic позволяет визуализировать процесс моделирования. Все специализированные языки моделирования и компьютерные оболочки сложны в использовании, что требует больших временных затрат на освоение технологий работы с ними. Универсальные же языки программирования требуют кроме знаний в области имитационного моделирования, высокой квалификации программирования.

Как указывалось ранее построение имитационных моделей сложных систем и проведение машинных экспериментов с этими моделями представляют собой достаточно трудоемкий процесс. Использование существующих языков моделирования позволяет преодолеть лишь часть

трудностей, требует от пользователей специальных знаний и навыков. Эффективным способом снижения трудоемкости при увеличении сложности моделируемых систем является автоматизация процедур, охватывающих построение и реализацию моделей и проведения с ними экспериментов.

В данной работе рассматривается автоматизированная система, предназначенная для создания имитационных моделей в виде сетей обслуживания и для проведения экспериментов с ними без написания каких-либо программных реализаций. Разработанная программа представляет собой интерактивную среду моделирования, предоставляющую возможности проектирования моделей сетей обслуживания, планирования эксперимента с построенной моделью, получения стохастических характеристик модели. Применение подобной среды при имитационном моделировании носит в основном **учебный** характер.

Работа сети обслуживания заключается в обслуживании поступающего на нее потока требований, или заявок. Заявками могут быть заказы на производство изделий, перевозку грузов, поступающих на транспортировку, проведение технического обслуживания и ремонта и так далее. Заявки поступают на систему одна за другой в некоторые случайные моменты времени, генерация которых была рассмотрена во второй главе. Обслуживание поступившей заявки продолжается какое-то время, после чего система освобождается для обслуживания очередной заявки [4]. Рассмотрим структуру самой сети обслуживания. Обобщенная схема СО изображена на рисунке 4.



Рис. 4 – Обобщенная схема СО.

Основными компонентами сетей являются следующие объекты.

1) Входящий поток заявок представляет собой некоторую последовательность моментов поступления заявок в систему (событий). Если интервал времени между событиями является постоянной величиной или определяется по формуле, то такой поток называется детерминированным. На практике чаще всего имеют место случайные потоки. Случайные потоки характеризуются некоторыми важными параметрами. Ординарные потоки имеют вероятность двух и более событий равную нулю. В стационарных потоках частота появления событий постоянная. В потоках без последствия вероятностные

характеристики появления события не зависят от моментов совершения предыдущих событий.

2) Выходящий поток заявок – поток заявок, покидающих систему.

3) Система обслуживания состоит из фаз обслуживания, каждая из которых характеризует различные типы обслуживания. Фазы в свою очередь включают накопители и один или несколько каналов. Каналы предназначены для обслуживания заявок. Накопители предназначены для моделирования очереди, в которой заявки ожидают обслуживания. Каждая заявка должна поступить в один из каналов, чтобы пройти обслуживание. Может оказаться, что заявкам придется ожидать, пока каналы освободятся. В этом случае заявки находятся в накопителе, образуя очередь. Будем полагать, что переход заявки из накопителя в канал происходит мгновенно.

Для создания модели сети обслуживания и проведение с ней прямого эксперимента необходимы знания о двух компонентах системы: потоке запросов на обслуживание на входе и о структуре самой системы. Для поиска оптимальных параметров функционирования системы должна быть решена обратная задача моделирования. При этом необходимо найти такие параметры структуры, чтобы обеспечить работу системы в соответствии с заданными критериями.

### 3.1.1. Потоки событий

Потоком событий называется последовательность однородных событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени. Такими потоками являются поток вызовов на телефонной станции; поток отказов (сбоев) компьютера или любого технического устройства, поток железнодорожных составов, поступающих на сортировочную станцию, поток частиц, попадающих на счетчик Гейгера, и т.д. Поток событий можно наглядно изобразить рядом точек на оси времени  $Ot$  (рис. 5).

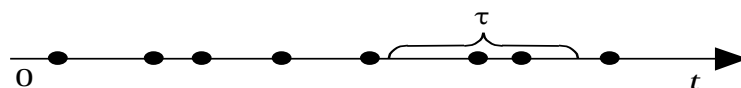


Рис. 5. Поток ординарных событий

Положение каждой точки случайно, и на рис. 5 изображена только какая-то одна реализация потока.

События, образующие поток, сами по себе вероятностями не обладают. Вероятностями обладают другие, производные от них события, например, “на участок времени  $t$  (рис. 5) попадет ровно два события”, или “на участок времени  $Dt$  попадет хотя бы одно событие”, или “промежуток времени между двумя соседними событиями будет не меньше  $t$ ”.

Важной характеристикой потока событий является его интенсивность  $\lambda$ . Это среднее число событий, приходящееся на единицу

времени. Интенсивность потока может быть как постоянной ( $\lambda = \text{const}$ ), так и переменной, зависящей от времени.

Поток событий называется регулярным, если события следуют одно за другим через определенные, равные промежутки времени. На практике чаще встречаются потоки не регулярные, со случайными интервалами времени появления заявок на обслуживание.

Поток событий называется стационарным, если его вероятностные характеристики не зависят от времени. В частности, интенсивность  $\lambda$  стационарного потока должна быть постоянной на рассматриваемом отрезке.

Поток событий называется потоком без последствия, если для любых двух непересекающихся участков времени  $t_1$  и  $t_2$  (см. рис.6) число событий, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой.

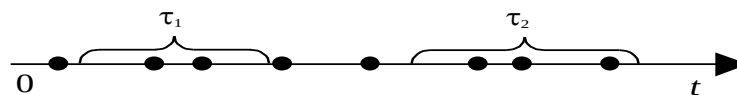


Рис. 6. Поток событий без последствия

По сути это означает, что события, образующие поток, появляются в те или другие моменты времени независимо друг от друга, вызванные каждое своими собственными причинами.

Поток событий называется ординарным, если события в нем появляются поодиночке, а не группами по несколько сразу. Например, поток клиентов, автомашин на ремонт или техническое обслуживание, обычно ординарен. Поток поездов, подходящих к станции, ординарен, а поток вагонов неординарен. Если поток событий ординарен, то вероятностью попадания на малый участок времени  $Dt$  двух или более событий можно пренебречь.

Поток событий называется простейшим (или стационарным пуассоновским), если он обладает сразу тремя свойствами: стационарен, ординарен и не имеет последствия. Название “простейший” связано с тем, что процессы, связанные с простейшими потоками, имеют наиболее простое математическое описание.

Простейший поток играет среди других потоков особую роль, в чем-то подобную роли нормального закона среди других законов распределения. А именно, при наложении (суперпозиции) достаточно большого числа независимых, стационарных и ординарных потоков (сравнимых между собой по интенсивности) получается поток, близкий к простейшему.

Легко доказать, что для простейшего потока с интенсивностью  $\lambda$  интервал  $T$  между соседними событиями имеет так называемое показательное распределение с плотностью (26)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0). \quad (26)$$

Величина  $\lambda$  в формуле (26) называется параметром показательного закона. Для случайной величины  $T$ , имеющей показательное распределение, математическое ожидание  $m_T$  есть величина, обратная параметру, а среднее квадратическое отклонение  $s_T$  равно математическому ожиданию:

$$m_T = \sigma_T = 1 / \lambda. \quad (27)$$

Поток событий называется рекуррентным (“поток Пальма”), если он стационарен, ординарен, а интервалы времени между событиями представляют собой независимые случайные величины с одинаковым произвольным распределением.

Приведем пример рекуррентного потока. Технический элемент (скажем, двигатель) работает непрерывно до своего отказа (выхода из строя); отказавший элемент заменяется новым. Если отдельные экземпляры элемента выходят из строя независимо друг от друга, то поток отказов (он же “поток замен” или “восстановлений”) будет рекуррентным.

Формулы для формирования потоков на основе равномерного, показательного и нормального закона распределения приведены во 2 разделе (18, 20, 24)

### 3.1.2. Структура сети обслуживания

В практике моделирования систем, имеющих более сложные структурные связи и алгоритмы, для формализации используются не отдельные обслуживающие системы, а структурные схемы сетей обслуживания, образуемые композицией многих каналов и накопителей. Сеть обслуживания представляет собой совокупность конечного числа обслуживающих узлов: источников заявок, накопителей и каналов. В сети циркулируют заявки, переходящие в соответствии с маршрутной матрицей из одного узла в другой. Так если каналы обслуживающей системы соединены параллельно, то имеет место многоканальное обслуживание, а если параллельные композиции каналов соединены последовательно, то имеет место многофазное обслуживание. Связи между элементами таких схем изображают в виде стрелок, отражающих направление движения заявок [10].

На рис. 7 представлена структурная схема многофазной сети обслуживания, где  $H_i$  - накопитель  $i$ -ой фазы,  $i=1 \div n$ ,  $K_{ij}$  -  $j$ -ый канал  $i$ -ой фазы,  $j=1 \div r_i$ ,  $I$  - некоторый источник заявок, реализующий входящий поток.

Кроме структуры сети обслуживания, в описание процесса обслуживания должно входить и описание правил обслуживания, т.е.

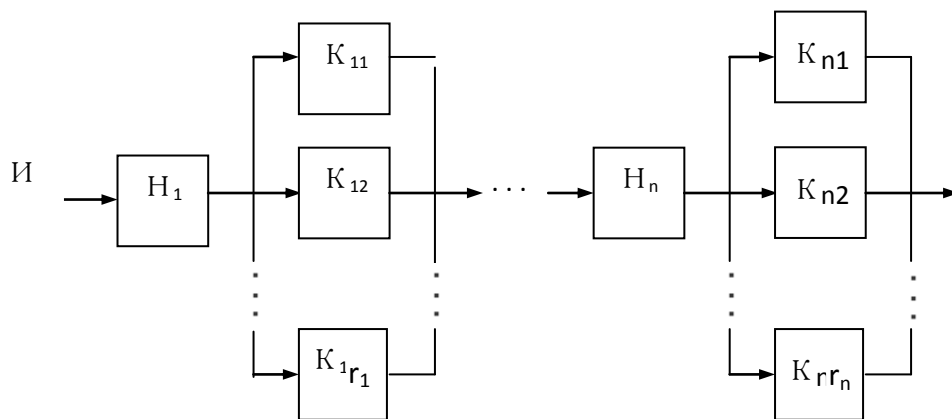


Рис. 7. Структурная схема многофазной сети обслуживания.

порядка, в соответствии с которым этот процесс организован. Выделим следующие правила.

**Дисциплина ожидания** является совокупностью правил, регламентирующих количество заявок, находящихся в один и тот же момент времени в системе. Система, в которой поступившая заявка получает отказ (покидает систему), когда все обслуживающие устройства заняты, называется системой без ожидания. Если заявка, заставшая все обслуживающие устройства занятыми, становится в очередь и ожидает до тех пор, пока не освободиться одно из устройств, то такая система называется системой с ожиданием. В противном случае, когда время ожидания ограничено какими-либо условиями, систему называют системой обслуживания с ограниченным ожиданием [1]. Ограничение может быть наложено на продолжительность ожидания в очереди. Каждая из поступивших заявок покидает систему, если обслуживание не началось до определенного момента времени. Ограничение может быть наложено на длину очереди. В этом случае заявка становится в очередь и ожидает обслуживания только в том случае, если длина очереди равна величины ограничения.

**Дисциплина выбора канала** является совокупностью правил, в соответствии с которыми заявка выбирает обслуживающее устройство. Выбор свободного канала может осуществляться по номеру, в случайном порядке или по количеству заявок, которое канал может принять. В сетях обслуживания с ненадежными элементами каналы могут выходить из строя на время ремонта. При этом можно отказать заявке в обслуживании, можно закончить обслуживание после ремонта или обработать заново.

**Дисциплина выбора из очереди** является совокупностью правил, в соответствии с которыми заявка выбирается из очереди. Выделим следующие дисциплины:

- FIFO (первым пришел - первым обслужен),
- LIFO (последним пришел - первым обслужен),
- случайный выбор из очереди,

- выбор заявки по минимальному времени, оставшемуся до отказа.
- выбор заявки с учетом приоритета заявки, определяющего преимущественное право на обслуживание [11].

Основной целью исследования различных сетей обслуживания является выработка рекомендаций по рациональному построению таких систем, рациональной организации их работы и регулированию потока заявок для обеспечения высокой эффективности функционирования сетей. Для достижения этой цели решаются задачи оценки **показателей эффективности** функционирования СМО и установления зависимостей этих показателей от организации структуры сети и различных значений ее параметров. Типичные примеры параметров и переменных моделей приведены в табл. 1.

В качестве характеристик функционирования сети обслуживания обычно используют две основные группы показателей. Первые характеризуют показатели эффективности использования сети, вторые характеризуют показатели качества обслуживания.

Таблица 1. Параметры и переменные модели сети обслуживания

| Элемент модели                                                                                     | Примеры                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Параметры                                                                                          | Количество фаз обслуживания, количество каналов в каждой фазе, емкости накопителей, параметры закона распределения времени обслуживания и моментов поступления заявок, вероятности появления заявок данного типа.                                        |
| Экзогенные переменные (порождаются вне системы)                                                    | Время прихода заявки, время обслуживания заявки, время ожидания заявки до отказа, время наработки канала на отказ.                                                                                                                                       |
| Эндогенные переменные (переменные состояния, возникают в результате воздействия внутренних причин) | Число поступивших и обслуженных заявок, число заявок в системе, время ожидания заявки в очереди, число заявок в очереди, число свободных или занятых каналов, продолжительность промежутка простоя (бездействия) канала, число заявок, получивших отказ. |

К первой группе показателей относят пропускную способность (среднее число заявок, обслуживаемых системой за единицу времени), среднее время простоя каналов, коэффициент загрузки каналов и другие.

Вторая группа включает среднее и максимальное время ожидания в очереди, среднее число заявок в очереди, среднее время пребывания заявки в сети обслуживания, вероятность отказа заявке в обслуживании, закон распределения времени ожидания заявки и времени пребывания заявки в сети обслуживания и так далее.

Процесс функционирования сети обслуживания сопровождается дискретным изменением характеристик состояния сети обслуживания в моменты поступления очередной заявки в систему, начала и окончания обслуживания заявки, выхода заявки из системы. Такого рода моменты времени будем называть особыми. Имитационное моделирование сети обслуживания заключается в многократном воспроизведении процесса обслуживания заявок и соответствующей обработке получаемой при этом статистики.

### **3.2. Симулятор *LiteSMO* для исследования сетей обслуживания**

С целью внедрения идей по унификации процесса обучения был создан интерфейс программы имитационного моделирования сетей обслуживания, выполненных по стандарту IDEF [8 - 12]. Реализуется система представления знания, опыт работы преподавателя - эксперта в области имитационного моделирования в которой включается в виде объектов программы. На панель управления выводятся объекты и функции, необходимые для реализации, как самих объектов конкретных знаний, так и методик обучения преподавателя как эксперта в области образования. Студент, как пользователь, может этими знаниями манипулировать, создавая новые для себя знания, сохраняя их в удобной форме и осуществляя их обработку по заданным преподавателем сценариям.

Объектами конкретных знаний симулятора являются элементы модели сети обслуживания: генераторы, каналы, накопители, стоки и типы заявок. Методика процесса обучения включается в виде выполнения различных процессов: планирования эксперимента; проведение эксперимента со статистической обработкой результатов; проведение факторного анализа; идентификация законов распределения случайных величин.

При разработке системы имитационного моделирования сети обслуживания необходима реализация современных подходов к проведению имитационного моделирования и обеспечение простой и доступной среды для проектирования имитационных моделей. Данная программа функционирует под управлением операционных систем Windows и использует удобные диалоговые средства, предоставляемые графическим интерфейсом этих операционных систем.

Программа обеспечивает информационную поддержку основных этапов имитационного моделирования:

- проектирование концептуальной схемы модели;
- настройка свойств отдельных элементов модели;
- планирование эксперимента с построенной моделью;
- запуск и выполнение эксперимента;
- оценка и интерпретация результатов эксперимента.

Данное приложение может использоваться для представления модели сети обслуживания в виде ориентированного графа, вершинами которого являются объекты модели, описания логики и закономерностей поведения моделируемой сети. С помощью симулятора возможно провести оценку основных показателей эффективности функционирования сети обслуживания, проверку гипотез, которые могут объяснить наблюдаемое поведение, анализ чувствительности сети обслуживания к изменению параметров отдельных элементов, поиск оптимальных вариантов реализации сети обслуживания.

Приложение обеспечивает выполнение следующих функций.

1) Представление концептуальной структуры сети обслуживания в виде стохастической сети, узлами которой являются объекты сети обслуживания. Всего программа должна поддерживать создание 4 типов объектов: генератор заявок, канал, накопитель и сток, предназначенный для уничтожения заявок. Для осуществления операций добавления, удаления, модификации узлов сети обслуживания, установления связи между узлами модели в системе должен быть предусмотрен графический конструктор с поддержкой механизма drag-and-drop.

2) Параметрическая настройка элементов модели (определение свойств узлов сети обслуживания и правил движения заявок между узлами).

3) Расчет и отображение максимальных и среднестатистических значений основных показателей эффективности сети обслуживания.

4) Планирование и построение распределений значений основных показателей эффективности сети обслуживания.

5) Представление распределений в виде гистограмм.

6) Расчет параметров эмпирического распределения в зависимости от предполагаемого вида закона распределения.

7) Проверка гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения с использованием критерия  $\chi^2$ .

8) Планирование и проведение однофакторного эксперимента с построенной моделью.

9) Представление результатов однофакторного эксперимента в виде графиков.

10) Сохранение модели и результатов моделирования в бинарный файл и загрузка из файла.

11) Сохранение результатов моделирования в файл в текстовом формате.

12) Сохранение графиков и гистограмм в графический файл \*.bmp.

13) Копирование графиков и гистограмм в буфер обмена Windows.

14) Копирование табличных данных в буфер обмена Windows в формате MS Word.

Исполняемым файлом программы является файл qsmodel.exe, размер которого составляет 500 Кб. Запуск программы происходит в среде Windows. Для комфортной работы рекомендуется разрешение экрана 1024×768.

### 3.2.1 Построение концептуальной схемы модели

При запуске программы появляется окно (Рис.8). На панели управления выложены объекты, манипулируя которыми возможно создать сетевую модель обслуживания, представленную ориентированным графом. Связи в программе сохраняются в виде матрицы. Такими объектами в данной среде являются генераторы потока заявок, накопители, организующие очереди, каналы, выполняющие обслуживание, стоки обслуженных заявок и типы заявок, которые можно задавать. Сток отказов появляется в поле окна по умолчанию.

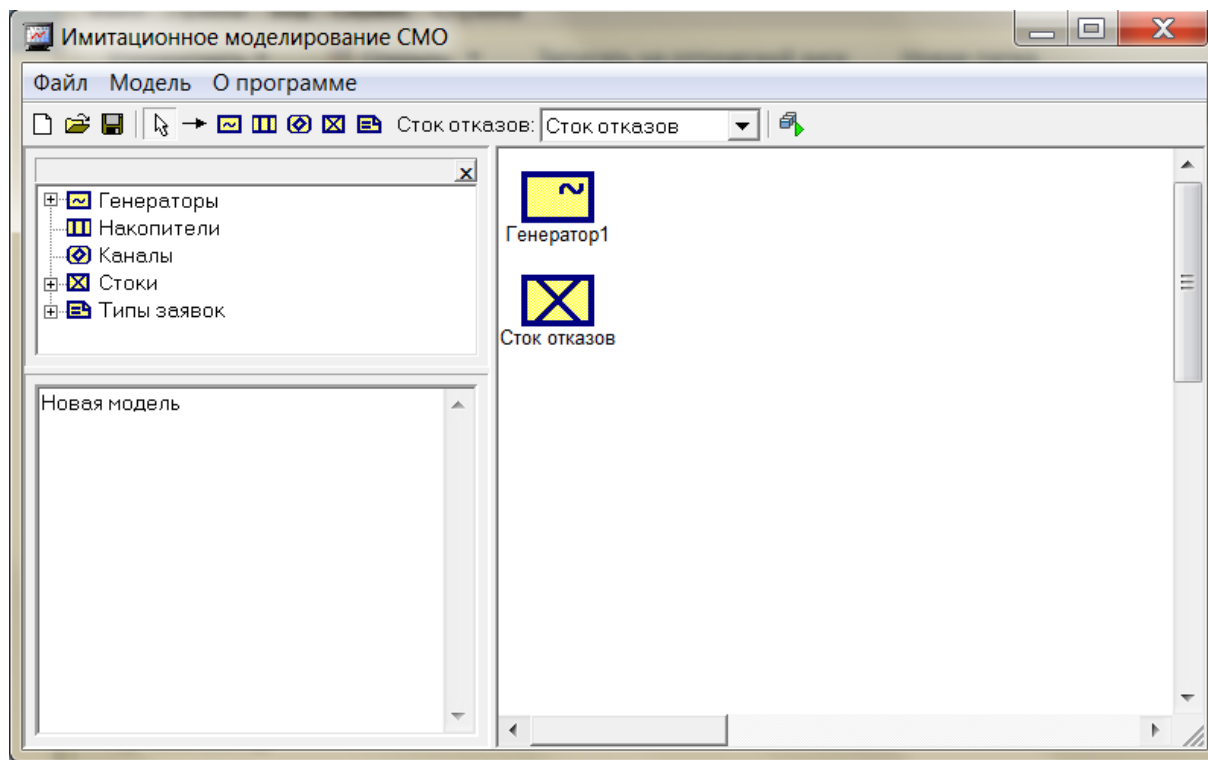


Рис. 8. Главное окно программы

Созданную модель можно запускать на выполнение, получая показатели качества обслуживания, сохранять в файле саму модель и полученные результаты работы. Можно проводить исследования на основе факторного анализа и статистики.

Построение концептуальной схемы модели происходит следующим образом. При создании новой модели имитационное моделирование исследуемой сети массового обслуживания начинается с создания концептуальной схемы модели. Новая модель автоматически создается при запуске программы. Главное окно программы приведено на рис. 8.

Для создания новой модели после запуска программы нужно выбрать пункт меню Файл⇒Создать. Для автоматизации процесса создания графа модели в программе предусмотрен графический конструктор, позволяющий визуализировать сетевую структуру модели, осуществлять операции добавления, удаления, модификации узлов СО, устанавливать связи между узлами модели.

Кроме того, в главном окне программы отображается список всех структурных элементов модели, сгруппированный по видам (см. рис.9).

Основными видами структурных элементов модели являются возможные типы заявок и типы узлов сети массового обслуживания: генераторы, накопители, каналы и стоки. Генераторы предназначены для моделирования входящего потока заявок. Они создают новые заявки и передают их в другие узлы модели. Каналы осуществляют обслуживание заявок. Накопитель служит для организации очереди, в которой заявки ожидают обслуживания.

Стоки предназначены для подсчета заявок, покидающих сеть обслуживания. Один из стоков должен быть выбран в качестве стока отказов. При создании новой модели программа автоматически добавляет в модель генератор заявок, сток отказов и тип заявки.

Процесс создания концептуальной структуры модели состоит в создании элементов сети обслуживания и установлении связей между ними.

Для добавления нового узла в модель необходимо нажать кнопку на панели инструментов с обозначением нужного типа узла, затем с помощью манипулятора «мышь» указать то место в области проектирования графа модели, где требуется расположить новый объект. При этом в модель добавиться требуемый узел, а его изображение появиться в области проектирования и в списке структурных элементов модели. Для обозначения объектов используются следующие условные изображения:  - генератор,  - накопитель,  - канал,  - сток,  - тип заявки.

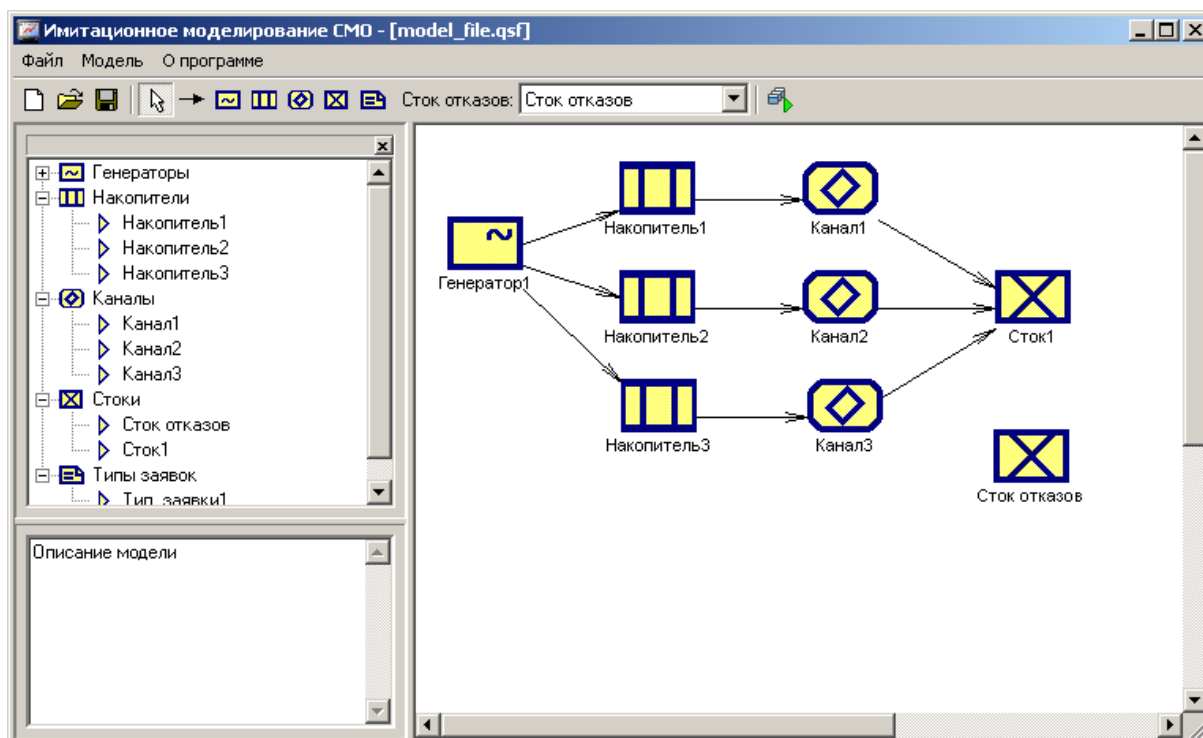


Рис. 9. Пример имитационной модели

Чтобы добавить в модель новый тип заявки, необходимо нажать кнопку «» на панели инструментов. Появится диалоговое окно редактирования типа заявки, изображенное на рисунке 9, в котором можно указать наименование создаваемого типа заявки и нажать кнопку «ОК». Таким образом, можно определить все вершины стохастической сети обслуживания. Кроме того, используя механизм drag-and-drop, можно расположить узлы на области проектирования в наиболее эргономичном и удобном виде

Рис. 10 – Добавление нового типа заявки

### 3.2.2 Редактирование связей между узлами модели.

Для редактирования связей между узлами модели необходимо рассмотреть ее структуру. Концептуальная структура сети массового обслуживания задается в виде ориентированного графа, вершинами которого являются узлы сети. После определения всех вершин модели необходимо задать связи между узлами. Связи между вершинами графа определяют пути движения заявок по сети. Если в графе определена дуга  $(v,w)$ , то будем говорить, что объект  $v$  является источником заявок для объекта  $w$ , а объект  $w$  является приемником заявок для объекта  $v$ .

Для добавления связей в правом верхнем углу над областью проектирования находится кнопка «Связать узлы», обозначенная стрелкой. После нажатия этой кнопки пользователь должен сначала указать узел-источник заявок, произведя на нем щелчок левой кнопкой мыши, а затем таким же образом указать узел - приемник заявок.

Так как связи определяют маршруты движения заявок, то существуют определенные ограничения. Так в качестве источника заявок не может быть выбран сток, хотя бы потому, что в нем заявки уничтожаются. В качестве приемника заявок не может быть выбран генератор.

Созданные узлы, типы заявок и связи можно удалять. Для этого необходимо произвести щелчок правой кнопкой «мыши» на соответствующем узле или связи в области проектирования модели или на соответствующем узле или типе заявки в списке структурных элементов модели. При этом появится всплывающее меню, из которого нужно выбрать пункт «Удалить». Для подтверждения удаления в появившемся окне, изображенном на рисунке 11, нужно нажать кнопку «Да», после чего объект будет безвозвратно удален из модели. При удалении узла модели так же будут удалены все связи, в которых он участвовал в качестве приемника или источника.

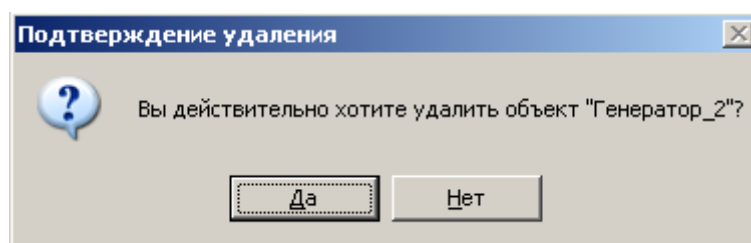


Рис. 11 – Подтверждение удаления объекта

При нажатии на кнопку «Нет» в окне, изображенном на рис. 11, удаление не будет произведено

Согласно правилам целостности модели, модель обязательно должна содержать в своем составе хотя бы один генератор заявок и сток. Кроме того, обязательно должен быть определен хотя бы один тип заявок.

Поэтому при попытке удаления объекта, которое приведет к нарушению данных правил, программа выдаст предупреждение и запретит удаление. Одним из обязательных требований к модели является наличие стока отказов, в который поступают все заявки, получившие отказ в обслуживании либо в результате того, что истекло время ожидания в очереди, либо если при передаче заявки для неё не нашлось приемника. В качестве стока отказов может быть выбран любой сток модели. Установить сток отказов можно в выпадающем списке на панели инструментов главного окна.

### 3.2.3 Параметрическая настройка модели

Параметрическая настройка элементов сети массового обслуживания состоит в определении свойств узлов, связей, а также правил движения заявок между узлами.

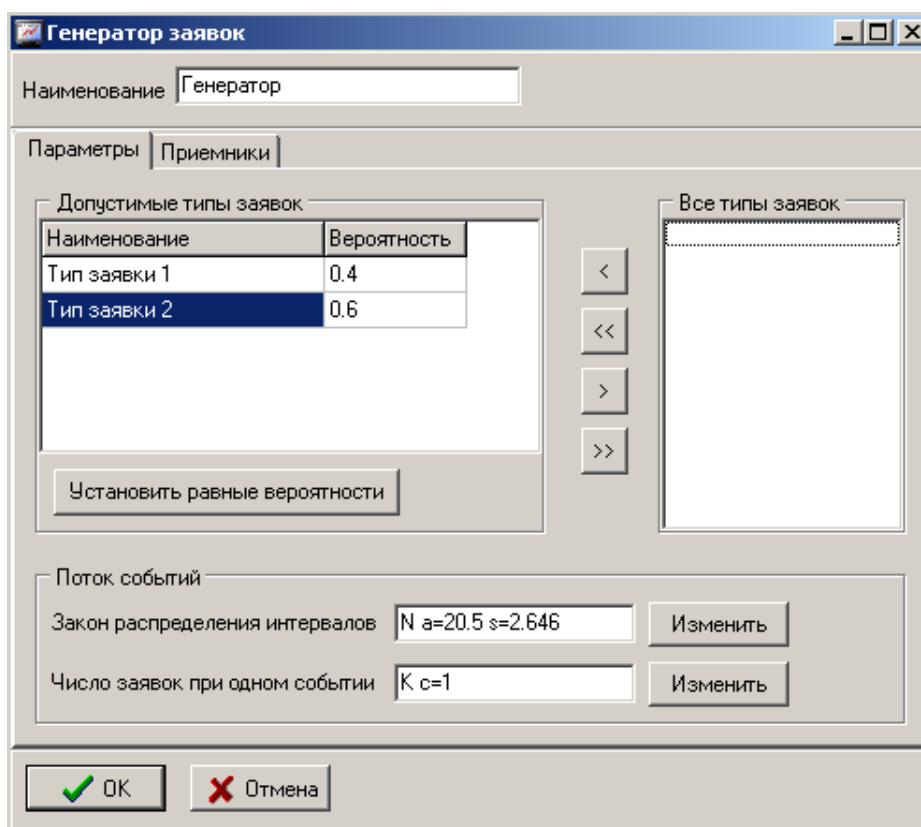


Рис. 12. – Параметры генератора

Для задания свойств узла или типа заявки необходимо произвести двойной щелчок левой кнопкой «мыши» на обозначении нужного объекта в области проектирования диаграммы графа или в списке структурных элементов. Также можно произвести щелчок правой кнопкой мыши на обозначении объекта, после чего в появившемся всплывающем меню выбрать пункт «Свойства». В зависимости от типа объекта, появиться диалоговое окно свойств объекта, например, как изображено на рис. 12, в

котором с помощью удобных интерфейсных элементов Windows (выпадающих списков, переключателей и т.п.) можно легко установить нужные параметры. Каждое окно свойств имеет поле для редактирования наименования объекта и кнопки «ОК» и «Отмена».

Кроме того, в этом окне для генераторов, каналов и накопителей расположен список допустимых заявок, который можно редактировать. Если заявки  $s$  типа  $n$  при каких условиях не могут быть допущены в узел  $v$  (появиться в генераторе, пройти обслуживание в канале, находиться в накопителе), то будем говорить, что узел  $v$  не допускает тип заявки  $s$ . Необходимо отметить, что любой сток допускает все типы заявок. Рассмотрим свойства каждого типа объектов.

Генератор создает новые заявки и передает их в другие узлы модели. Входящий поток заявок, образуемый генератором, является стационарным потоком без последствия. Для установки параметров генератора нужно выбрать вкладку «Параметры» окна свойств генератора, представленного на рис. 12.

К параметрам генератора относятся:

- 1) вероятность появления (генерации) для каждого допустимого типа заявок (столбец «**Вероятность**» в таблице «**Список допустимых заявок**»);
- 2) закон распределения величины интервала времени между моментами поступления заявок (текстовое поле «**Закон распределения интервалов**»);
- 3) закон распределения числа заявок при генерации (текстовое поле «**Число заявок при одном событии**»).

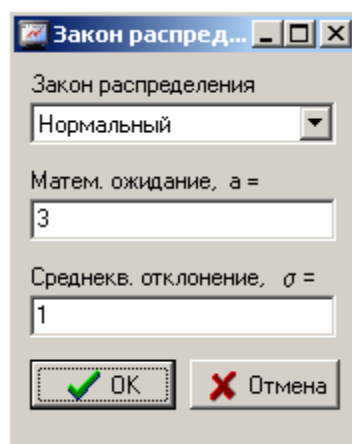


Рис. 13. – Окно выбора закона распределения

Для установки нового значения закона распределения нужно нажать кнопку «Изменить», расположенную слева от текстового поля, отображающего текущее значение закона распределения. Появится диалоговое окно выбора закона распределения, изображенное на рис. 13.

В выпадающем списке «Закон распределения» нужно выбрать вид закона распределения и в расположенных ниже текстовых полях ввести значения параметров выбранного закона распределения. Программа поддерживает 4 вида закона распределения:

- детерминированный;
- равномерный;
- показательный (экспоненциальный);
- нормальный.

Для отображения закона распределения в текстовых полях параметров объектов применяется сокращенная запись. Примеры подобных обозначений приведены в табл. 2.

Канал представляет собой одно или несколько обслуживающих устройств, которые работают параллельно. В этих устройствах осуществляется обслуживание заявок, поступающих в канал. Обслуживание заявки длится некоторое постоянное или случайное время, определенное законом распределения. По окончании обслуживания канал может изменять тип заявки.

Время от времени канал может выходить из строя (происходит отказ канала, или сбой в канале). После сбоя каналу требуется некоторое время на восстановление, в течении которого он не может обслуживать заявки. Вместо него это осуществляет резервный канал. Время, в течении канал работает безотказно, называется временем наработки на отказ.

Таблица 2. Примеры обозначений закона распределения

| Обозначение<br>закона распределения | Пояснение                                                                                                       |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Детерм. $c=2$                       | Детерминированный закон распределения с константой $c=2$ .                                                      |
| Равн. $a=4$ $b=6$                   | Равномерный закон распределения с левой границей $a=4$ и правой границей $b=6$ .                                |
| Показ. $\lambda=0,5$                | Показательный закон распределения с интенсивностью $\lambda=0,5$ .                                              |
| Норм. $a=3$ $s=1$                   | Нормальный закон распределения с математическим ожиданием $a=3$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma=1$ . |

Для установки параметров канала нужно выбрать вкладку «Параметры» окна свойств канала (рис. 14). На вкладке «Параметры» можно установить следующие параметры канала.

Канал

Наименование: Канал1

Параметры | Источники | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Закон обслуживания | Преобразование |
|--------------|--------------------|----------------|
| Тип_заявки1  | Норм. a=1 s=0.1    | Тип_заявки4    |
| Тип_заявки2  | Норм. a=2 s=0.3    | Тип_заявки4    |
| Тип_заявки3  | Норм. a=3 s=0.4    | Тип_заявки4    |

Недопустимые типы заявок

Тип\_заявки4

Параметры обслуживания

Число обслуживаемых устройств: 1

☒ Преобразовывать тип заявки

В случае отказа канала заявки:

☐ переходят в сток отказов  
☐ продолжают обслуживаться в резервном канале  
☒ обслуживаются заново в резервном канале  
☐ ожидают окончания восстановления канала

Параметры отказа канала

☒ Моделировать отказ канала

Время наработки до отказа: Равн. a=200 b=300 [Изменить]

Время восстановления канала: Равн. a=20 b=35 [Изменить]

☒ Использовать резервный канал

Канал2

OK Отмена

Рис. 14. – Параметры канала

1) Закон распределения времени обслуживания для каждого допустимого типа заявок (столбец «**Время обслуж.**» в таблице «**Список допустимых заявок**»);

2) Количество обслуживаемых устройств в канале (текстовое поле «**Число обслуживаемых устройств**»).

3) Преобразование для каждого допустимого типа заявки (столбец «**Преобразование**» в таблице «**Список допустимых заявок**»). Это значит, что по окончании обслуживания заявки ее тип будет изменен. Столбец «**Преобразование**» доступен лишь в том случае, если установлена опция «**Преобразовывать тип заявки**».

4) Временем наработки на отказ.

5) Время восстановления канала.

6) Резервный канал (при необходимости).

7) Дисциплина отказа, т.е. метод действий канала в случае отказа (группа «**В случае отказа канала заявки:**»).

8) Для выбора закона распределения нужно выделить тип заявки в таблице «Список допустимых заявок» и произвести двойной щелчок левой кнопкой мыши. Появится диалоговое окно выбора закона распределения (рис. 14). Обозначения закона распределения представлены в табл. 2. Число обслуживаемых устройств в канале может принимать любое натуральное значение в интервале (1; 250).

Накопитель служит для организации очереди заявок. Для установки параметров накопителя нужно выбрать вкладку «Параметры» окна свойств накопителя, как показано на рис. 15.

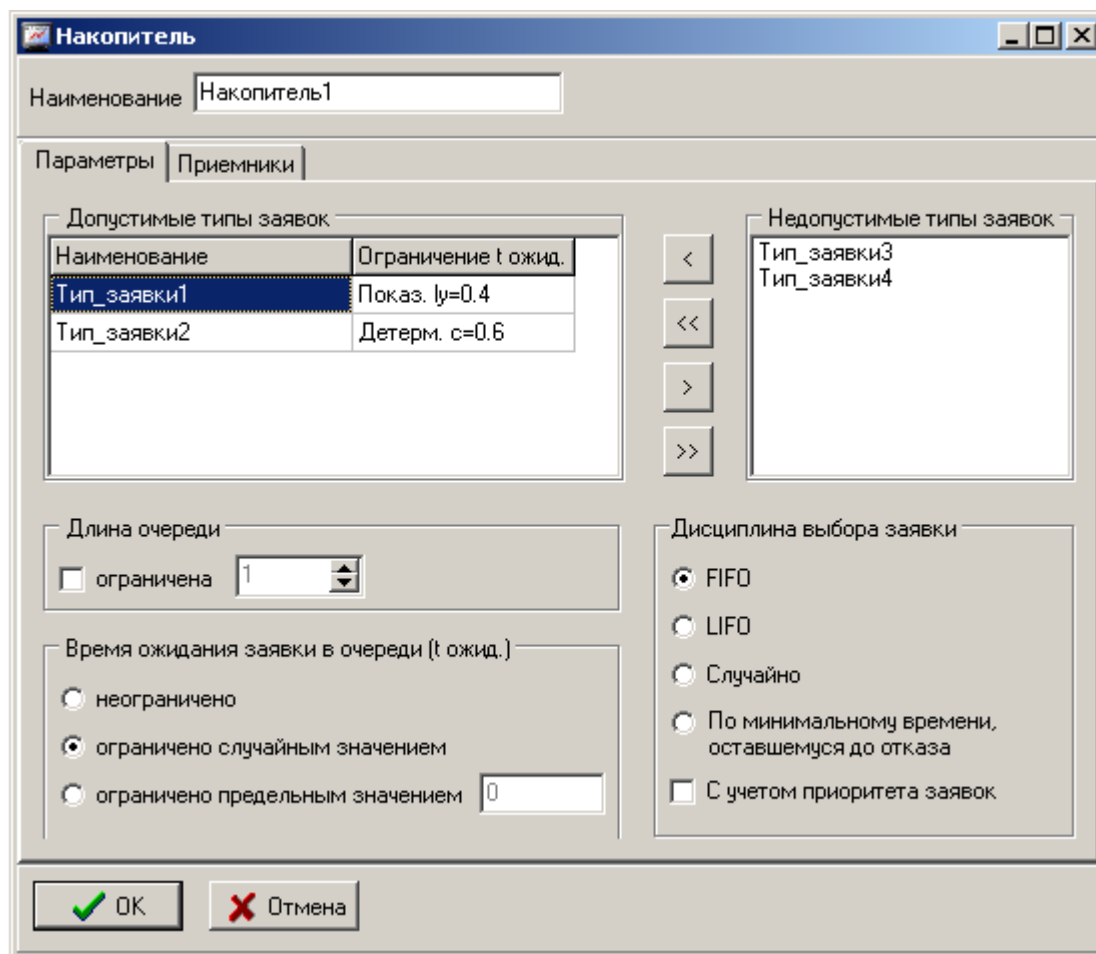


Рис. 15 – Параметры накопителя

Для задания накопителя нужно определить:

- 1) признак ограничения длины очереди (опция «**Ограничена**» в рамке «**Длина очереди**»);
- 2) предельную длину очереди, если длина очереди ограничена (поле редактирования в рамке «**Длина очереди**»);
- 3) дисциплину ожидания (время ожидания в очереди не ограничено, задано законом распределения, ограничено предельным значением);
- 4) если время ожидания в очереди задано законом распределения, то закон распределения предельного времени ожидания для каждого допустимого типа заявки (столбец «**Ограничение t ожид.**» в таблице «**Допустимые типы заявок**»);
- 5) если время ожидания в очереди ограничено предельным значением, то предельное время ожидания (текстовое поле, расположенное возле опции «Ограничено предельным значением»);

6) дисциплину выбора заявки из очереди (FIFO, LIFO, случайно, по времени, оставшемуся до отказа);

7) признак учета приоритета заявок (если выбрана опция «С учетом приоритета заявок», то преимущество при выборе заявки из накопителя будут иметь заявки с более высоким приоритетом).

Для выбора закона распределения предельного времени ожидания нужно выделить тип заявки в таблице «Список допустимых заявок» и произвести двойной щелчок левой кнопкой мыши. Появится диалоговое окно выбора закона распределения, изображенное на рис. 15. Обозначения закона распределения представлены в таблице 2.

Дисциплина выбора заявки задает порядок выбора заявки из очереди по запросу освободившегося канала. При дисциплине выбора FIFO (First Input - First Output) заявки извлекаются из очереди в том порядке, в котором поступают (первым пришел - первым обслужен), при LIFO (Last Input - First Output) – в обратном порядке (последним пришел - первым обслужен). Случайный выбор из очереди предполагает равновероятный выбор для каждой заявки. Дисциплина выбора «По времени, оставшемуся до отказа» возможна только в случае случайного времени ожидания до отказа и предполагает выбор для извлечения заявки, имеющей наименьшее время, оставшееся до истечения времени ожидания в очереди. В быту обычно действует дисциплина FIFO. Дисциплина LIFO реализуется в буфере, организованном по принципу стека. Такая дисциплина может оказаться целесообразной, например, при передаче информации, если ее ценность быстро падает со временем.

В узле типа «Сток» производится подсчет заявок, покидающих СМО, поэтому специфические свойства ему не задаются. Окно свойств стока содержит только поле для редактирования наименования, как изображено на рис. 16.

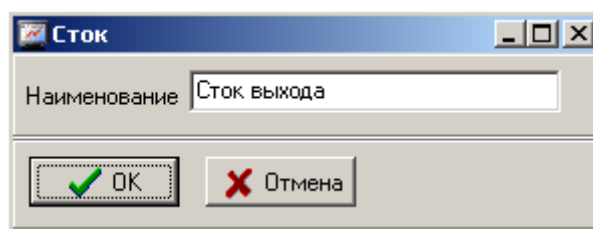


Рисунок 16 Окно свойств стока

Для типа заявки единственным специфическим параметром является приоритет обслуживания (преимущественное право выбора из очереди для осуществления обслуживания заявки). Приоритет типа заявки учитывается только при настройке параметров накопителя (рис.17).

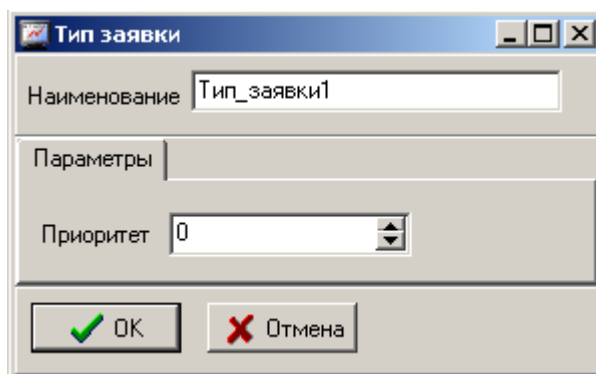


Рис. 17. Окно свойств типа заявки

Параметрическая настройка узлов сети обслуживания, включает в себя также определение свойств связи между узлами. Связи между узлами сети определяют пути движения заявок по сети. В соответствии с матрицей смежности узлов каждый объект модели, за исключением стоков, имеет список приемников. Если объект желает передать заявку, то он должен выбрать объект-приемник из этого списка.

Правило, по которому объект выбирает тот или иной приемник, называется дисциплиной выбора приемника. Для редактирования дисциплины выбора приемника нужно в окне свойств объекта перейти на вкладку «Приемники», как показано на рис. 18.

Выбор приемника осуществляется в соответствии с одним из следующих правил:

- по порядку следования в списке (приоритет приема заявок имеют узлы, расположенные ближе к началу списка);
- выбор объекта осуществляется случайно в соответствии с заданными вероятностями выбора (столбец вероятность в списке «Приемники заявок»);
- по минимальному количеству заявок в приемнике (в качестве приемника выбирается объект, содержащий наименьшее число заявок, при равенстве количества заявок действует первое правило).

Если ни один из объектов-приемников не может принять заявку, то заявка получает отказ и переходит в сток отказов. С помощью кнопок  можно изменять порядок следования объектов в списке. По нажатию кнопки «Установить равные вероятности» всех приемников рассчитываются и устанавливаются равные вероятности выбора.

После окончания обслуживания каждый канал передает обслуженную заявку в один из узлов-приемников. Если освободившееся обслуживающее устройство является единственным (все остальные заняты), то канал запрашивает следующую заявку в одном из узлов-источников. Выбор источника осуществляется в соответствии с дисциплиной выбора источника.

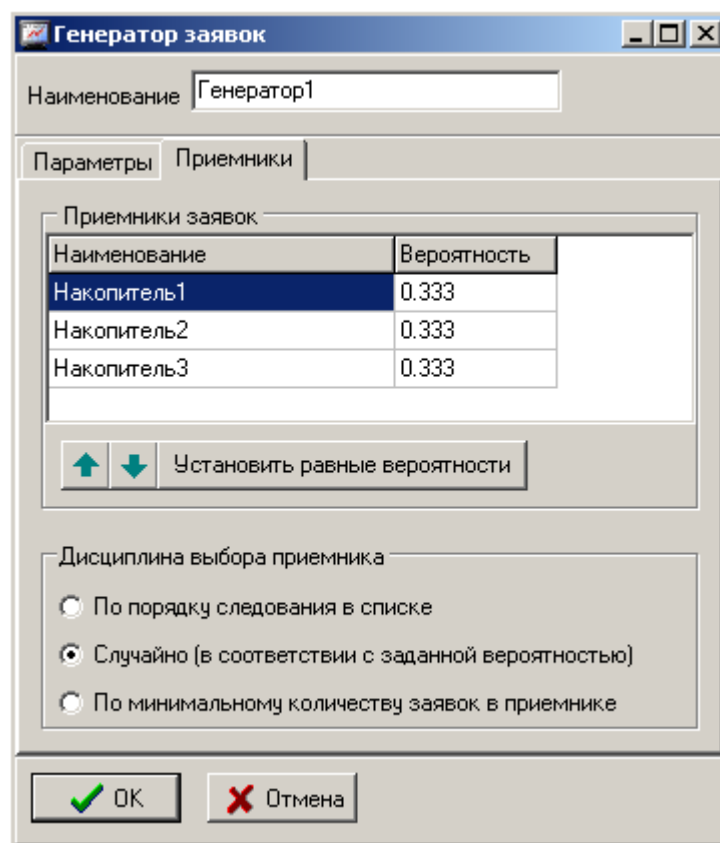


Рис. 18 Вкладка «Приемники» окна свойств объекта

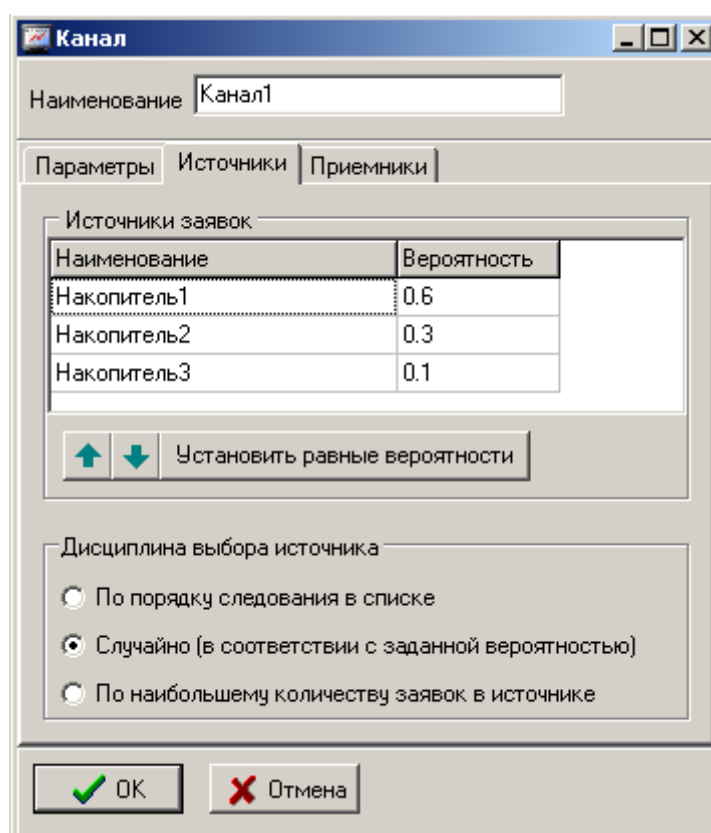


Рис. 19 – Вкладка «Источники» окна свойств канала

Для редактирования дисциплины выбора приемника нужно в окне свойств канала перейти на вкладку «Источники», как показано на рис. 19.

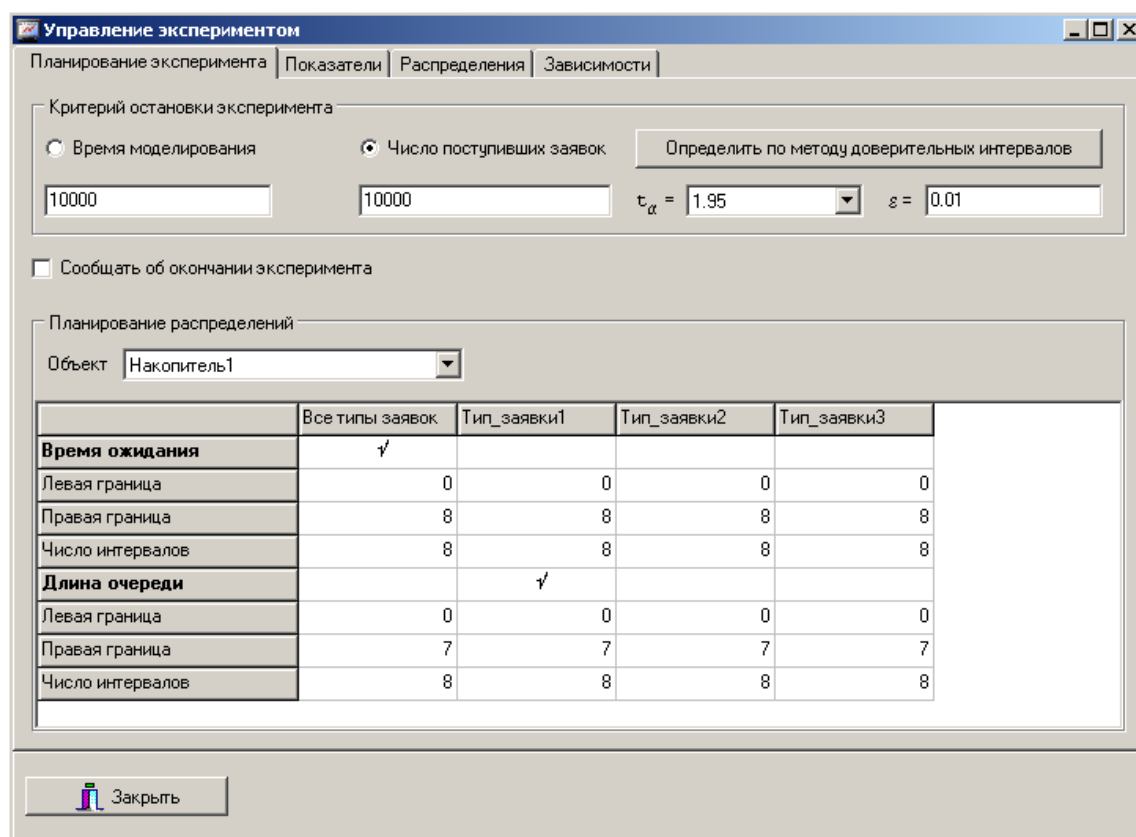
Для выбора источника можно указать одно из следующих правил:

- по порядку следования в списке (приоритет приема заявок имеют объекты, расположенные ближе к началу списка);
- выбор объекта осуществляется случайно в соответствии с заданными вероятностями выбора (столбец вероятность в списке «Приемники заявок»);
- по количеству заявок в приемнике (в качестве приемника выбирается узел, содержащий наибольшее число заявок, при равенстве количества заявок действует первое правило).

С помощью кнопок   можно изменять порядок следования объектов в списке. По нажатию кнопки «Установить равные вероятности» всех приемников рассчитываются и устанавливаются равные вероятности выбора.

### 3.2.4 Настройка условий эксперимента

Настройка условий эксперимента включает в себя: установку критерия окончания моделирования, настройку распределений и выбор фактора, если требуется провести однофакторный эксперимент.



**Управление экспериментом**

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Критерий остановки эксперимента

☐ Время моделирования ☒ Число поступивших заявок Определить по методу доверительных интервалов

10000 10000  $t_\alpha = 1.95$   $\varepsilon = 0.01$

☐ Сообщать об окончании эксперимента

Планирование распределений

Объект: Накопитель1

|                       | Все типы заявок | Тип_заявки1 | Тип_заявки2 | Тип_заявки3 |
|-----------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Время ожидания</b> | $\gamma'$       |             |             |             |
| Левая граница         | 0               | 0           | 0           | 0           |
| Правая граница        | 8               | 8           | 8           | 8           |
| Число интервалов      | 8               | 8           | 8           | 8           |
| <b>Длина очереди</b>  | $\gamma'$       |             |             |             |
| Левая граница         | 0               | 0           | 0           | 0           |
| Правая граница        | 7               | 7           | 7           | 7           |
| Число интервалов      | 8               | 8           | 8           | 8           |

 Заккрыть

Рис. 20 – Вкладка «Условия эксперимента»

Для установки условий эксперимента необходимо выбрать пункт меню «Модель  $\Rightarrow$  Управление экспериментом». Появится окно управления экспериментом, представленное на рис. 20.

Для установки критерия окончания моделирования и настройки распределений нужно перейти на вкладку «Условия эксперимента», для установки фактора перейти на вкладку «Зависимости». Настройку однофакторного эксперимента рассмотрим позднее. Остановимся на вкладке «Условия эксперимента» (см. рис. 20).

Программа поддерживает два вида критерия окончания моделирования (завершения одного прогона модели): по достижению предельного времени моделирования или по достижению необходимого объема выборки (числа заявок, поступивших на вход системы).

Выбор критерия осуществляется посредством установки опций «Время моделирования» и «Число поступивших заявок» в группирующей рамке «Критерий остановки эксперимента».

Таблица 3. Возможные виды распределений

| Характеристика                                   | Объект     |
|--------------------------------------------------|------------|
| Время ожидания в очереди                         | Накопитель |
| Длина очереди                                    | Накопитель |
| Время обслуживания                               | Канал      |
| Время простоя канала                             | Канал      |
| Время жизни заявки (пребывания заявки в системе) | Сток       |
| Число заявок в системе                           | СО         |

### 3.2.5. Расчет показателей эффективности

В программе существует возможность автоматического расчета объема выборки, исходя из требуемой точности  $\varepsilon$  оценки статистических показателей и оценки доверительности  $\alpha$ . Для этого нужно нажать кнопку «Определить по методу доверительных интервалов».

Планирование распределений заключается в указании необходимости стоить то или иное распределение и установке параметров распределения: нижней (левой) и верхней (правой) границ области значений исследуемой случайной величины, а также числа интервалов, на которое разбивается данная область значений. Чтобы установить

параметры распределения значений той или иной характеристики СО, в выпадающем списке «Объект» нужно выбрать объект, которому принадлежит эта характеристика. В таблице 3 для каждого возможного типа указаны характеристики, для которых можно построить распределения.

**Управление экспериментом**

Планирование эксперимента | **Показатели** | Распределения | Зависимости

**Показатели СМО по типу заявки** Все типы заявок

|                          |       |                                     |      |
|--------------------------|-------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 10000 | Максимальное число заявок в системе | 4    |
| Пропускная способность   | 0.251 | Среднее число заявок в системе      | 1.88 |

**Показатели канала** Канал1

|                          |       |                            |     |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 8873  | Среднее время простоя      | 1.2 | Максимальное время простоя | 10.1  |
| в % от общего числа      | 88.7% | Среднее время обслуживания | 7.8 | Козффициент загрузки       | 0.867 |

**Показатели накопителя** Накопитель1 по типу заявки Тип\_заявки1

|                          |       |                            |       |                               |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 10000 | Средняя длина очереди      | 0.123 | Максимальная длина очереди    | 2     |
| в % от общего числа      | 100%  | Среднее время ожидания     | 0.492 | Максимальное время ожидания   | 2     |
| Число "нулевых" заявок   | 5874  | без учета "нулевых" заявок | 1.19  | Доля заявок, получивших отказ | 0.113 |

**Показатели стока** Сток отказов по типу заявки Все типы заявок

|                          |       |                            |   |                            |   |
|--------------------------|-------|----------------------------|---|----------------------------|---|
| Число поступивших заявок | 1126  | Среднее время жизни заявки | 2 | Максим. время жизни заявки | 2 |
| в % от общего числа      | 11.3% |                            |   | Миним. время жизни заявки  | 2 |

Выполнить эксперимент Сохранить Копировать Закрыть

Рис. 21. Показатели эффективности сети обслуживания

Распределение значений некоторых характеристик может быть построено как всех возможных типов заявок, так и каждого типа в отдельности. Чтобы назначить построение распределения, необходимо щелчком левой кнопкой мыши установить галочку в ячейке, соответствующей строке с названием нужной характеристики и столбцу с названием типа заявки.

Для вычисления показателей эффективности сети обслуживания необходимо осуществить имитационный эксперимент, т.е. провести имитацию функционирования системы в течение определенного времени. Чтобы выполнить эксперимент, нужно выбрать пункт меню «Эксперимент  $\Rightarrow$  Управление экспериментом». В появившемся окне управления экспериментом необходимо перейти на вкладку «Показатели», как изображено на рисунке 21, и нажать кнопку «Выполнить эксперимент».

Таблица 4 – Переменные СО, используемые для расчета показателей

| Переменная СО                 | Описание                                                                                            |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Число поступивших заявок      | Число заявок, поступивших на вход СО или узла (для СО это общее число сгенерированных заявок)       |
| Пропускная способность        | Среднее число заявок, обслуживаемых системой в единицу времени                                      |
| Число заявок в системе        | Суммарное число заявок, находящихся в каналах и накопителях                                         |
| Время простоя                 | Время бездействия обслуживающего устройства канала в промежутках между обслуживанием заявок         |
| Коэффициент загрузки          | Отношение суммарного времени обслуживания в устройствах канала к общему времени моделирования       |
| Число «нулевых» заявок        | Число заявок, время ожидания которых в накопителе равно 0.                                          |
| Длина очереди                 | Число заявок в накопителе                                                                           |
| Время ожидания                | Время нахождения заявки в накопителе                                                                |
| Доля заявок, получивших отказ | Отношение числа заявок, получивших отказ в ожидании, к числу заявок, поступивших на вход накопителя |
| Время жизни заявки            | Время пребывания заявки в СО                                                                        |

Все показатели эффективности на вкладке «Показатели» сгруппированы по видам узлов СО. Кроме того, в отдельную группу выделены общесистемные показатели. Чтобы посмотреть показатели для тех или иных узлов модели после выполнения эксперимента, нужно выбрать наименование узла из соответствующего выпадающего списка.

Так как узлы СО могут принимать заявки различных типов, то расчет статистических показателей в узлах СО производится как по всем типам заявок, так и по каждому в отдельности. Чтобы посмотреть показатели для определенного типа заявки, нужно выбрать наименование типа заявки из выпадающего списка «по типу заявки».

В таблице 4 описаны некоторые переменные сети обслуживания, на основе которых рассчитываются показатели эффективности, представленные на рис. 21.

Рассчитанные показатели эффективности можно сохранить в текстовый файл, нажав кнопку «Сохранить», или копировать в буфер обмена Windows, нажав кнопку «Копировать».

### 3.2.6 Построение распределений

Для построения распределений, выбранных при настройке условий эксперимента, нужно выбрать пункт меню «Эксперимент  $\Rightarrow$  Управление экспериментом», в появившемся окне управления экспериментом перейти на вкладку «Распределения», как изображено на рисунке 22, и нажать кнопку «Выполнить эксперимент». Чтобы вывести на экран нужное распределение, необходимо выделить в списке строку с названием данного распределения, затем щелкнуть левой кнопкой мыши или нажать клавишу «Enter».

Гистограмму распределения можно сохранить в файл в формате «\*.bmp», нажав кнопку «Сохранить», или копировать в буфер обмена Windows, нажав кнопку «Копировать».

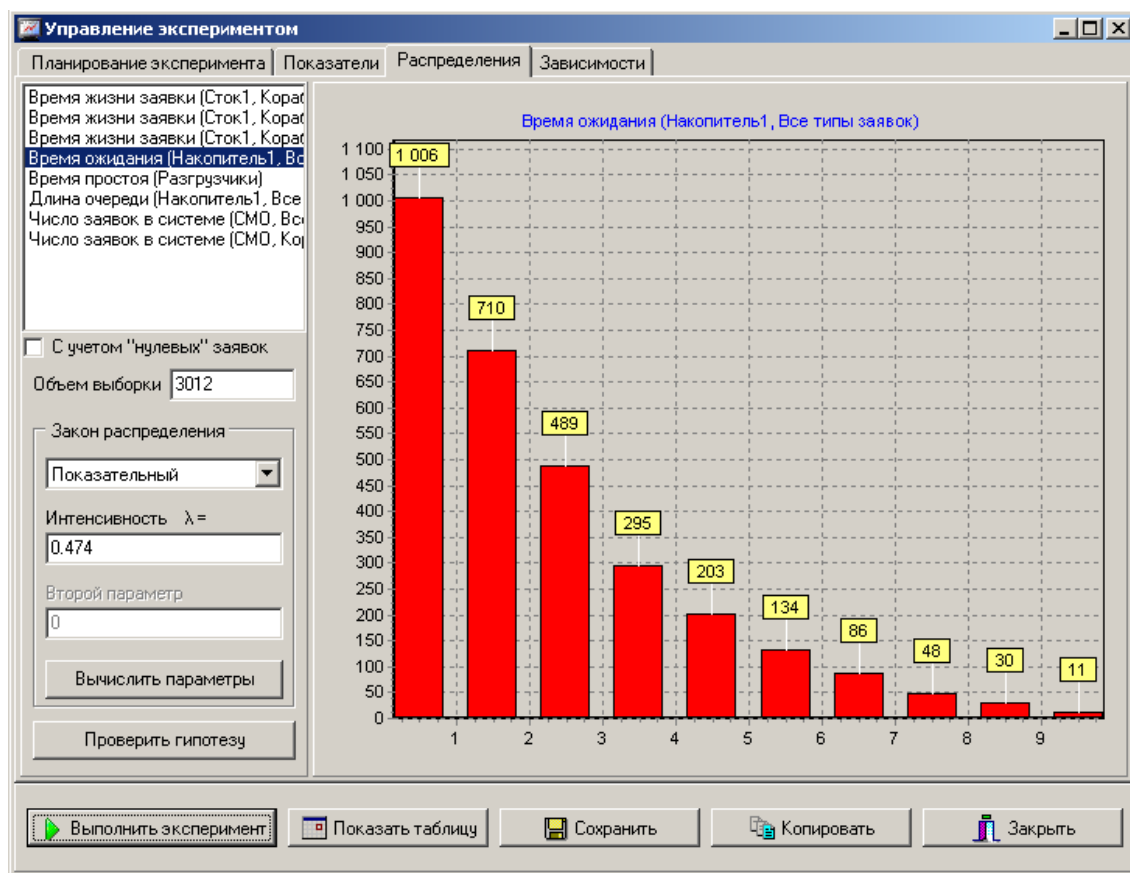


Рисунок 22 – Вкладка «Распределения»

| Распределение - Время ожидания (Накопитель1, Все типы заявок) |       |       |       |        |        |        |        |        |         |         |
|---------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Середина интервала                                            | 0,5   | 1,5   | 2,5   | 3,5    | 4,5    | 5,5    | 6,5    | 7,5    | 8,5     | 9,5     |
| Абсолютная частота                                            | 1006  | 710   | 489   | 295    | 203    | 134    | 86     | 48     | 30      | 11      |
| Относительная частота                                         | 0,334 | 0,236 | 0,162 | 0,0979 | 0,0674 | 0,0445 | 0,0286 | 0,0159 | 0,00996 | 0,00365 |

Рис. 23. Таблица частот распределения

Выбранное распределение можно представить в виде таблицы, как показано на рисунке 23. Для этого нужно нажать кнопку «Показать таблицу». Каждую таблицу, представленную в окне вывода таблиц, можно копировать в буфер обмена Windows, а затем вставить в Word или Excel.

Проверка степени согласования полученного эмпирического распределения с теоретическим распределением выполняется при помощи критерия Пирсона, основанного на использовании в качестве меры расхождения законов величины  $\chi^2$ . Для осуществления проверки необходимо:

1) вызвать окно «Управление экспериментом» и перейти на вкладку «Распределения» (рис. 22);

2) выбрать в списке распределений проверяемое и вывести его на экран;

3) установить вид теоретического закона распределения (равномерный, показательный, нормальный) и ввести его параметры. При заданном виде закона распределения параметры могут быть рассчитаны автоматически по нажатию кнопки «Вычислить параметры»;

4) нажать кнопку «Проверить гипотезу», в результате чего будет произведен расчет значения  $\chi^2$ , выполнено сравнение его с критическим значением  $\chi^2$  и представлен результат, как показано на рис. 24.

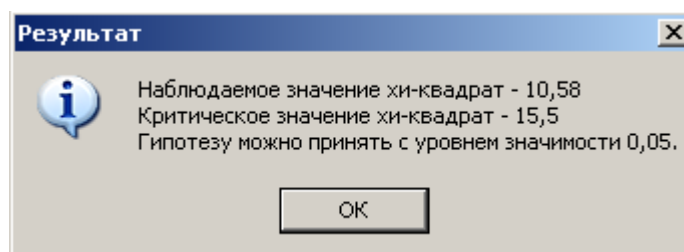


Рис. 24. Результаты проверки гипотезы

### 3.2.7 Выполнение однофакторного эксперимента

Однофакторный эксперимент заключается в проведении некоторого количества прогонов модели при разных значениях одного из параметров модели, называемого **фактором**. Для настройки и проведения однофакторного эксперимента нужно выбрать пункт меню «Эксперимент  $\Rightarrow$  Управление экспериментом», в появившемся окне управления экспериментом перейти на вкладку «Зависимости», как изображено на рис. 25.

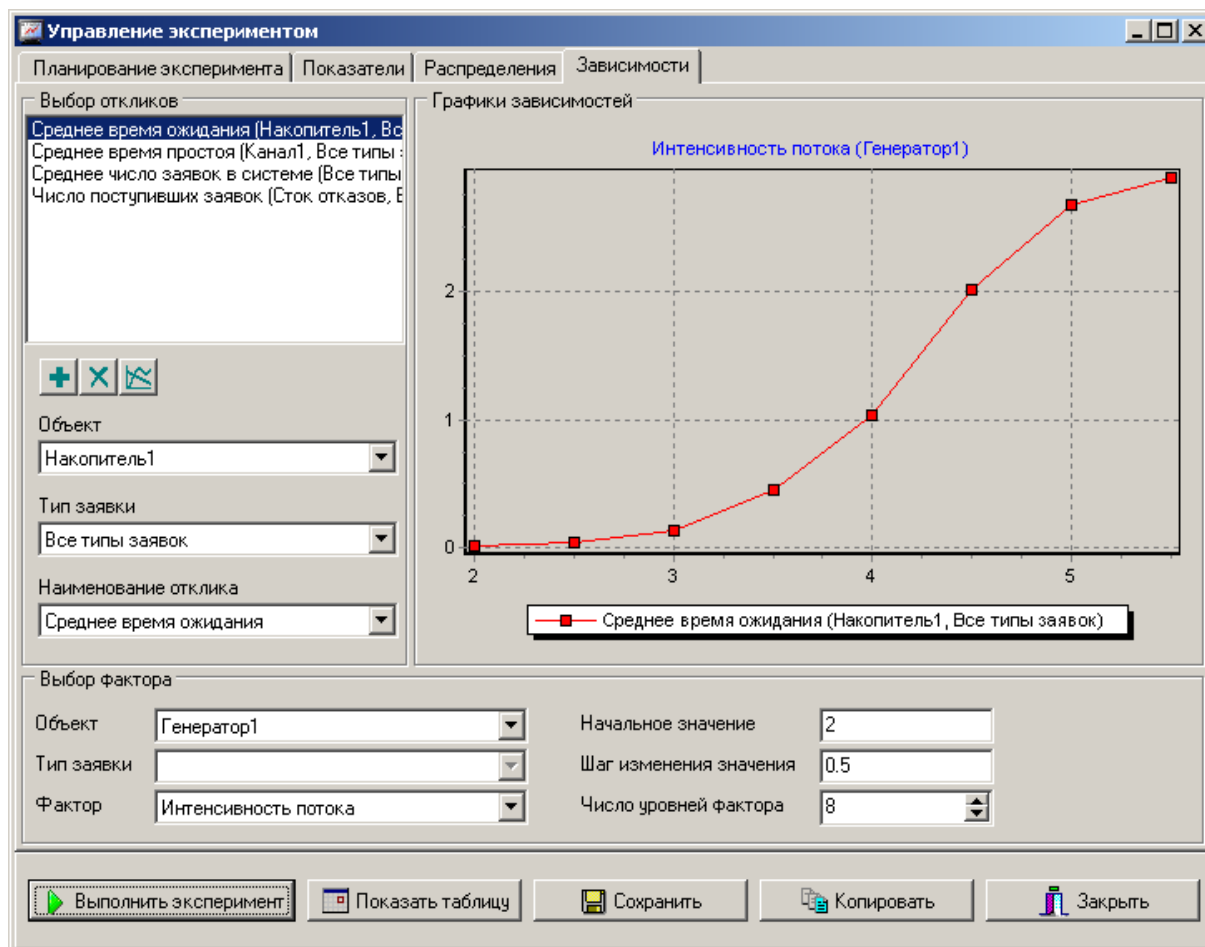


Рис. 25. Проведение однофакторного эксперимента

Для проведения однофакторного эксперимента необходимо установить фактор и список откликов.

Для установки фактора необходимо заполнить следующие поля:

- поле «Объект» содержит наименование объекта, которому принадлежит фактор (параметром какого объекта является);
- поле «Тип заявки» содержит наименование типа заявки, с которым связан фактор (например, математическое ожидание закона распределения времени обслуживания всегда связано с

определенным типом заявки, число обслуживающих устройств в канале не связано ни с каким типом заявки);

- поле «Фактор» содержит указание на тип фактора (например, число устройств в канале, интенсивность закона распределения времени обслуживания и т.д.);
- поле «Начальное значение» содержит начальное значение фактора;
- поле «Шаг изменения значения фактора» определяет величину приращения значения фактора при однофакторном эксперименте;
- поле «Число уровней фактора» определяет количество точек, который будут получены в результате однофакторного эксперимента.

**Отклики** – показатели эффективности СМО, значения которых будут найдены в результате эксперимента. Чтобы добавить отклик в список, необходимо установить узел СМО, показателем которого является отклик (поле «Объект» в рамке «Выбор откликов»), тип заявки (поле «Тип заявки» в рамке «Выбор откликов») и наименование отклика, после чего нажать кнопку . Для удаления нужно выбрать отклик в списке и нажать кнопку .

После того, как определены факторы и список откликов, нужно провести однофакторный эксперимент, нажав кнопку «Выполнить эксперимент».

Результаты однофакторного эксперимента представляют собой графики зависимостей характеристик СМО (откликов) от выбранного фактора. Чтобы вывести на экран нужные графики, необходимо выделить в списке соответствующие отклики и нажать кнопку . Над графиками указан фактор, под графиками – список откликов, соответствующих представленным графикам.

Изображение графика можно сохранить в файл в формате «\*.bmp», нажав кнопку «Сохранить», или копировать в буфер обмена Windows, нажав кнопку «Копировать».

Построенные зависимости можно представить в виде таблицы, где для каждого значения фактора указаны значения откликов. Для этого нужно нажать кнопку «Показать таблицу», после чего таблица будет выведена в окне вывода таблиц, которое аналогично изображенному на рисунке 23. Каждую таблицу, представленную в окне вывода таблиц, можно копировать в буфер обмена Windows, а затем вставить в Word или Excel.

### 3.2.8. Сохранение и загрузка модели

Созданную модель вместе со всеми результатами моделирования можно сохранить в бинарный файл. Для этого нужно в пункте меню «Файл» выбрать команду «Сохранить». Файлы моделей программы сохраняются в файл с расширением qsf.

Для загрузки из бинарного файла необходимо использовать команду «Открыть» пункта меню «Файл». Текущая модель при этом будет уничтожена.

При попытке открыть файл модели может появиться сообщение, изображенное на рис. 26. Если возникла такая ошибка, то это значит, что открываемый файл поврежден или не соответствует формату файла данных программы.

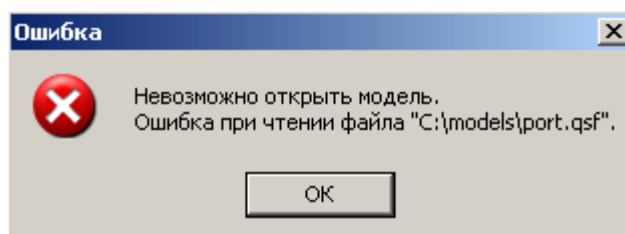


Рис. 26. Ошибка при чтении файла модели

### 3.2.9. Аварийные ситуации

При запуске однофакторного эксперимента с большой моделью при высоком числе уровней фактора может возникнуть аварийная ситуация, обусловленная нехваткой оперативной памяти ЭВМ. Соответствующее сообщение приведено на рис. 27. В этом случае нужно попытаться провести эксперимент на более производительной ЭВМ.

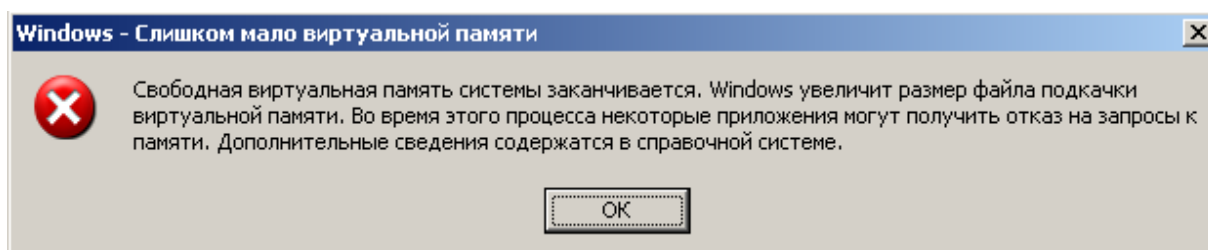


Рис. 27 Сообщение об исчерпании объема виртуальной памяти

Для освоения работы с приложением требуется владение базовыми навыками работы с операционными системами семейства Windows: приемы работы с окнами; работа с меню; использование управляющих элементов диалога.

Для эффективного использования приложения рекомендуется знание базовых понятий теории случайных чисел (числовые характеристики случайной величины, законы распределения). Необходимы знания в области математической статистики (эмпирическое распределение, гистограмма, критерий Пирсона) и теории массового обслуживания. Процесс имитационного моделирования рекомендуется проводить в соответствии с последовательностью операций, изложенных в данном руководстве, т.е. в соответствии с основными этапами имитационного

моделирования. Кроме того, при разработке имитационной модели нужно учитывать что имитационное моделирование в принципе неточно, и невозможно измерить степень неточности. Частично это можно преодолеть путем анализа чувствительности модели к изменению определенных параметров системы, выбирая их в качестве фактора для проведения однофакторного эксперимента.

## **4. Планирования экспериментов для исследования транспортно-технологических систем**

### **4.1. Цель и метод планирования экспериментов**

План проведения эксперимента при имитационном моделировании представляет собой метод получения с помощью эксперимента необходимой информации. От плана эксперимента зависит эффективность использования компьютерных ресурсов. План определяет порядок статистического анализа результатов эксперимента и ценность разрешения с помощью эксперимента поставленных вопросов без чрезмерных затрат времени и ресурсов [17].

Из каждого эксперимента необходимо извлекать максимально возможное количество информации, так как имитационное моделирование требует затрат труда и времени исследователя и довольно больших затрат компьютерного времени. С этой целью необходимо планировать не только саму модель, но и порядок ее использования.

Планирование предстоящего эксперимента производят после того как установлены цели эксперимента, принято решение воспользоваться имитационным моделированием и определена структура. Это позволит таким образом построить модель, чтобы целенаправленно и эффективно получать требуемые данные для достижения поставленных целей эксперимента.

Применяют два вида планирования: стратегическое и тактическое планирование. В зависимости от конкретных целей эксперимента для анализа его результатов могут потребоваться различные методы. Наиболее широко распространены следующие типы экспериментов.

Сравнение средних и дисперсий различных альтернатив. Они просты и решают вопросы о размере выборки, начальных условий и наличии или отсутствии автокорреляции.

Другим видом эксперимента является определение важности учета или значимости влияние переменных и ограничений, наложенных на эти переменные. Основными методами анализа результатов этих экспериментов являются регрессивный и дисперсионный анализы результатов.

Третьим видом экспериментов является отыскание оптимальных значений на некотором множестве возможных значений переменных.

Такие эксперименты используют последовательный или поисковый методы построения. Такие эксперименты чаще всего являются однофакторными экспериментами.

При планировании и построении модельных экспериментов имеем дело с двумя видами переменных, которые называют факторами и откликами. Они являются входными и выходными переменными. Для выбора плана эксперимента необходимо: определить критерий планирования эксперимента; синтезировать модель; сравнить полученную модель с существующими моделями, со стандартными планами и выбрать оптимальный план.

В соответствии с целями экспериментов, методами анализа результатов и построения модели вид модели определяется подобранными критериями планирования, в которые входят:

- число варьируемых факторов;
- число уровней (значений) каждого фактора (являются ли уровни факторов качественными или количественными, фиксированными или случайными);
- необходимое число измерений отклика (выявлять ли влияние факторов друг на друга, каков вид ограничений, требуемая точность).

При экспериментировании имеют дело с двумя видами переменных, обработка которых ведется разными способами. Количественная переменная это переменная, величина которой может быть измерена с помощью интервальной шкалы. Качественная это переменная, величина которой не может быть измерена количественно.

При имитационном моделировании на этапе содержательного описания системы строится структурная модель эксперимента [17]. Определяется число факторов и уровней, что является критерием планирования. На этом этапе не должно быть ограниченности числа возможных измерений, возникающих вследствие ограниченности ресурсов. На этапе построения формализованной схемы строится функциональная модель эксперимента с учетом ограничений. Поэтому структурная модель исходит того, что должно быть сделано, а функциональная - что может быть сделано. Структурная модель эксперимента имеет вид

$$N_s = (q_1)(q_2)...(q_k), \quad (28)$$

где  $N$  - число элементов эксперимента,  $k$  - число факторов эксперимента,  $q_i$  - число уровней эксперимента.

При выборе факторов необходимо решить, какие отклики нас интересуют, то есть какие из них необходимо измерить, а затем какие факторы влияют на эти отклики. Факторы могут быть постоянны и играть

роль граничных условий; переменны, но неуправляемы и вносят ошибку в эксперимент; измеряемы и управляемы.

Поэтому необходимо знать заранее, какие переменные в процессе проектирования и проведения эксперимента необходимо измерять и контролировать. Количество уровней фактора целесообразно выбирать минимально возможным для минимизации времени проведения эксперимента. Однако этого должно быть достаточно для достижения цели эксперимента. Можно получить значительные упрощения, если принять число уровней всех факторов одинаковыми, равным двум или трём, и  $N_S = q^k$ . Например, если нас интересуют линейные эффекты, достаточно выбрать два уровня на концах интервала области её изменения, если интерес представляют квадратичные эффекты, то три, для кубического 4 и т.д. Число уровней равно минимальному числу необходимых для восстановления функции.

Функциональная модель (ФМ) определяет, сколько необходимо иметь различных информационных точек, которые должны служить действительными измерителями отклика. Функциональная модель совершенна, если в измерении отклика участвуют все элементы. Функциональная модель несовершенна, если  $N_f < N_S$ .

Идеален случай первый, но ФМ выбирает компромисс между желанием и существующими ограничениями (на время, средства и т.д.). Например, полное число машинных прогонов:

$$N = pq^k, \quad (29)$$

где  $k$  — число факторов,  $q$  — число уровней факторов,  $p$  - число повторений.

Планирование однофакторного эксперимента, в котором изменяется лишь единственный фактор, наиболее просто. Число наблюдений определяется допустимыми затратами, желаемой мощностью проверки или статистической значимостью результатов:

$$X_{ij} = M + T_j + \varepsilon_{ij}, \quad (30)$$

где  $X_{ij}$  -  $i$ -е наблюдение ( $i = 1 \dots n$ ) на  $j$ -м уровне ( $j = 1 \dots k$ );  $M$  - общее влияние всего эксперимента;  $T_j$  - влияние  $j$ -го режима;  $\varepsilon_{ij}$  - случайная ошибка  $i$ -го наблюдения на  $j$ -м режиме (предполагается нормально распределенной случайной величиной с  $\sigma=0$  и  $T^2$ ). Если фактор имеет два уровня, то можно применять процедуры прямой проверки гипотез с использованием стандартных критериев ( $\chi^2$ , К-С и др.).

Факторный анализ является одним из эффективных средств планирования экспериментов. В случае наличия двух и более факторов, влияние которых на отклик должен исследовать экспериментатор существует традиционный метод, когда фиксируют все факторы, кроме

одного, на некоторых уровнях и варуют уровни данного фактора. Факторы изменяются и исследуются поочерёдно.

Большинство описанных в литературе планов основано на использовании дисперсионного анализа для качественных факторов (ДАН) или регрессивного анализа для количественных факторов.

Если фактор имеет больше двух уровней, то используют дисперсионный анализ с нулевой гипотезой  $T_j = 0$  для всех  $j$ . Если нулевая гипотеза верна, то наблюдение  $X_{ij}$  не зависит от уровня фактора и имеет среднее  $\mu$  и случайную ошибку  $\varepsilon_{ij}$ . Если нулевая гипотеза отвергнута, то применяют ряд других испытаний, делящихся на два вида в зависимости от того, когда (до или после получения данных) производится выбор необходимых уравнений средних величин.

Можно провести два факторных эксперимента с двумя уровнями каждого фактора. В первом факторном эксперименте зафиксируем все уровни, кроме одного, и проведём его измерения. Затем поступаем так же со всеми остальными уровнями. Получим симметричный полный факторный эксперимент, где все уровни данного фактора комбинируются со всеми уровнями всех других факторов. Симметричность заключается в том, что все факторы имеют одинаковое число уровней.

## **4.2. Реализация плана имитационного моделирования станции технического обслуживания**

### **4.2.1. Пример задания на техническое обслуживание и ремонт автомобилей**

Рассмотрим пример по проведению эксперимента и оптимизации процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания. Цель проведения эксперимента будет состоять в определении количества необходимого оборудования постов обслуживания и обслуживающего персонала, что влияет на расчет площадей помещений и количество работающих.

Определим содержательное описание обслуживающей системы в следующем формальном виде. Предприятие проводит техническое обслуживание, ремонт, хранение автомобилей и снабжение их эксплуатационными материалами. Интервалы между моментами поступления автомобилей на техническое обслуживание составляют 0.5 часа. Интервалы между моментами поступления автомобилей на ремонт составляют 3 часа. Техническое обслуживание требует специализированного оборудования первого вида и составляет время 55 мин. Ремонт требует специализированного оборудования второго вида и составляет время 4 часа. После обслуживания автомобили поступают на оформление документов и снабжение их эксплуатационными материалами. Время оформления занимает 20 мин. Параметры

представлены в виде математических ожиданий нормального закона распределения. Среднеквадратическое отклонение для простоты примем равным 3 мин

Смоделировать работу участка. Определить возможные места появления очередей их вероятно-временные характеристики. Выявить причины их возникновения, предложить меры по их устранению. Обеспечить очередь на обслуживание не более одного автомобиля.

#### **4.2.2. Содержание процесса исследования**

Процесс имитации включает в себя следующие разделы.

1. Разработка и описание имитационной модели с помощью программы LiteSMO [7].
2. Проведение эксперимента с заданными параметрами. Результаты эксперимента работы имитационной модели представляются в виде таблиц или в текстовом формате. Построение выводов о работе сети обслуживания. Выявление недостатков в работе станции по следующим критериям: доля обслуженных заявок должна быть ~100%, простои каналов и ожидания заявок в очереди в накопителях должны быть меньше времени обслуживания в каналах, средняя длина очереди не должна превышать 1 автомобиль, загрузка каналов должна быть не менее 0,7. При нарушении каких-либо показателей необходима оптимизация работы системы, перейдя к 3 пункту.
3. Проведение однофакторного анализа для оптимизации процессов обслуживания. Результаты эксперимента представляются в виде таблиц и графиков. Параметрами изменяемых факторов может быть количество каналов или время обслуживания в каналах, значениями откликов является время простоя каналов или коэффициент загрузки и время ожидания в очереди или длина очереди. Выбор варианта функционирования с оптимальным количеством каналов осуществляется в соответствии с критериями оптимальности. Ими могут быть средняя длина очереди, которая должна быть меньше или равна 1 или минимум разности между средним временем простоя каналов и средним временем ожиданием заявок в очереди в накопителях. При этом выбирается оптимальное число каналов или оптимальное значение математического ожидания времени обслуживания заявок в канале (как значение фактора).
4. Проведение эксперимента с оптимальными параметрами. Результаты работы имитационной модели представляются в виде таблиц или в текстовом формате. Формулировка выводов о том, как исправлены недостатки в работе модели: доля обслуженных заявок должна быть 100%, простои каналов и ожидания заявок в очереди в накопителях должны быть меньше времени обслуживания в каналах, максимальная длина очереди

должна быть меньше 1). Если недостатки в работе до конца не устранены, возвращаемся к 3 пункту.

5. Имитация отказов в работе каналов. Интервалы выхода оборудования из строя (или плановое проведение технического обслуживания оборудования) и время ремонта задаются в объекте **каналы**. Необходимо сравнить результаты эксперимента с результатами 4 раздела. Что изменилось в работе? Сравнить долю обслуженных заявок, среднее время простоя каналов и среднее время ожидания заявок обслуживания в очереди в накопителях.

6. Идентификация закона распределения двух случайных величин. **Входной величиной**, которую задает исследователь, может быть время обслуживания в канале. **Выходной величиной**, являются показатели качества работы модели, полученные в ходе эксперимента. Такие как время простоя канала или время ожидания заявок в очереди. При идентификации необходимо задать границы для входных распределений. При нормальном распределении левую границу устанавливают равной математическому ожиданию -  $3 \cdot \text{среднеквадратических отклонения}$ , правую границу равной математическому ожиданию +  $3 \cdot \text{среднеквадратических отклонения}$ . При равномерном распределении установить левую границу равной **а**, правую границу равной **в**, то есть задаваемые границы совпадают с границами распределения. Для показательного (экспоненциального) распределения: левая граница равна 0 – правая граница равна  $5/(\text{интенсивность распределения } \lambda)$ . При получении распределений выходных показателей левая граница устанавливают 0, а правую границу задают как максимальное значение случайной величины, взятое из показателей качества обслуживания. Если частота попадания в интервал  $< 2$ , правую границу переносят левее.

#### **4.2.3. Разработка и описание имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания**

В задании раздела 4.2.1 определена интенсивность поступления машин на техническое обслуживание и ремонт, которые выполняются на разном оборудовании. Поэтому зададим два типа заявок технического обслуживания (ТО) и технического ремонта (ТР), которые формируются двумя разными генераторами (рис. 28).

Для выполнения технического обслуживания и ремонта нужны два вида оборудования, поэтому выберем два вида каналов. Перед ними возможны очереди, если оборудование занято. Для их формирования используем два накопителя, зарезервировав на станции соответствующее

место. Оформление документов осуществляется отдельным каналом, перед которым тоже нужен накопитель для организации возможной очереди.

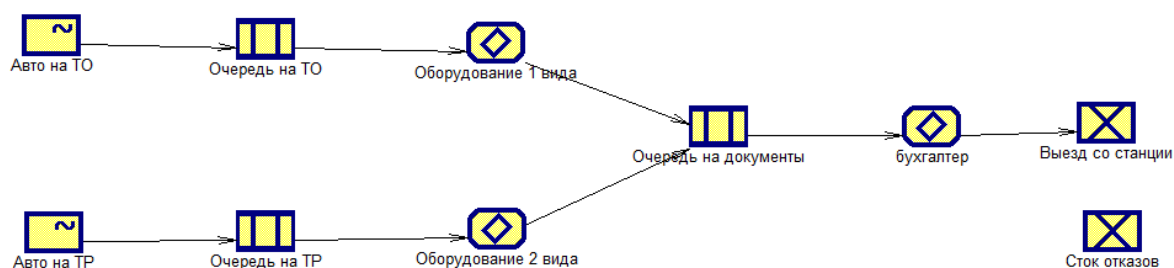


Рис. 28 Имитационная модель работы СТО.

В целом модель имеет вид, представленный на рис. 28. Имеется источник заявок на ТО и ТР, три вида каналов для обслуживания ТО, ТР и оформления документов и три накопителя для организации очередей перед ними. Перечень заданных объектов приводится на панели в левом окне (рис.29).

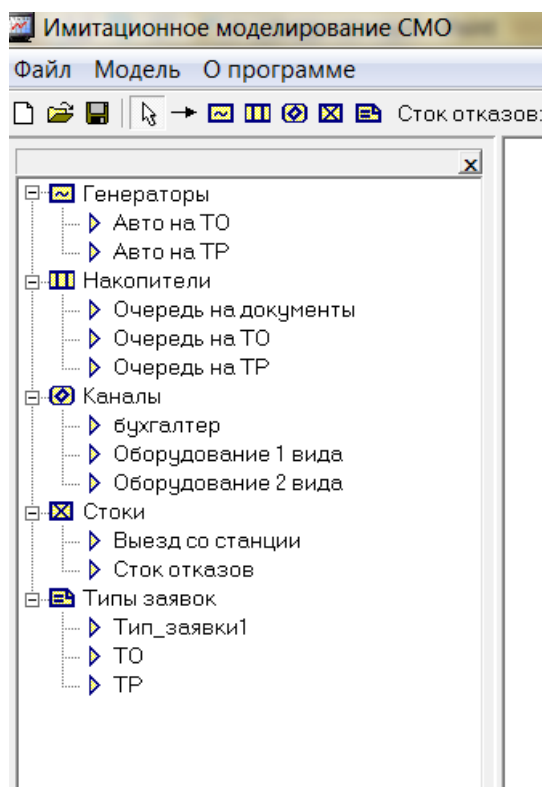


Рис. 29. Перечень заданных объектов модели.

Тип заявки зададим во вкладке рис. 30.

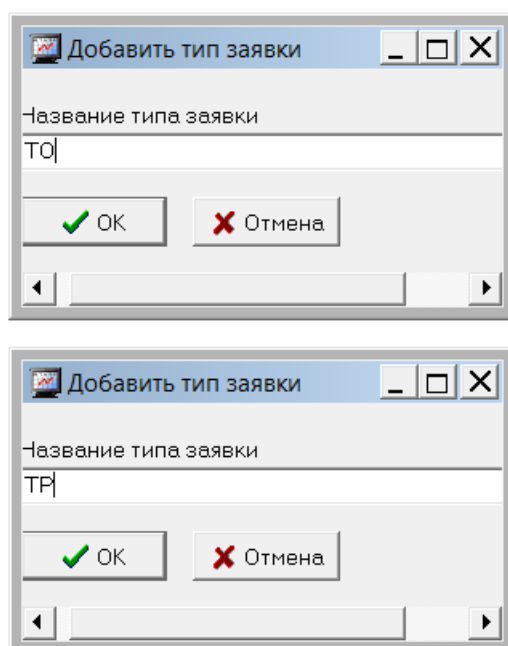


Рис. 30. Задание типов заявок на обслуживание.

Зададим свойства объектов модели: каналы на рис. 31, рис. 32, рис. 33; накопители на рис. 34, рис. 35, рис. 36; генераторы на рис. 37, рис. 38.

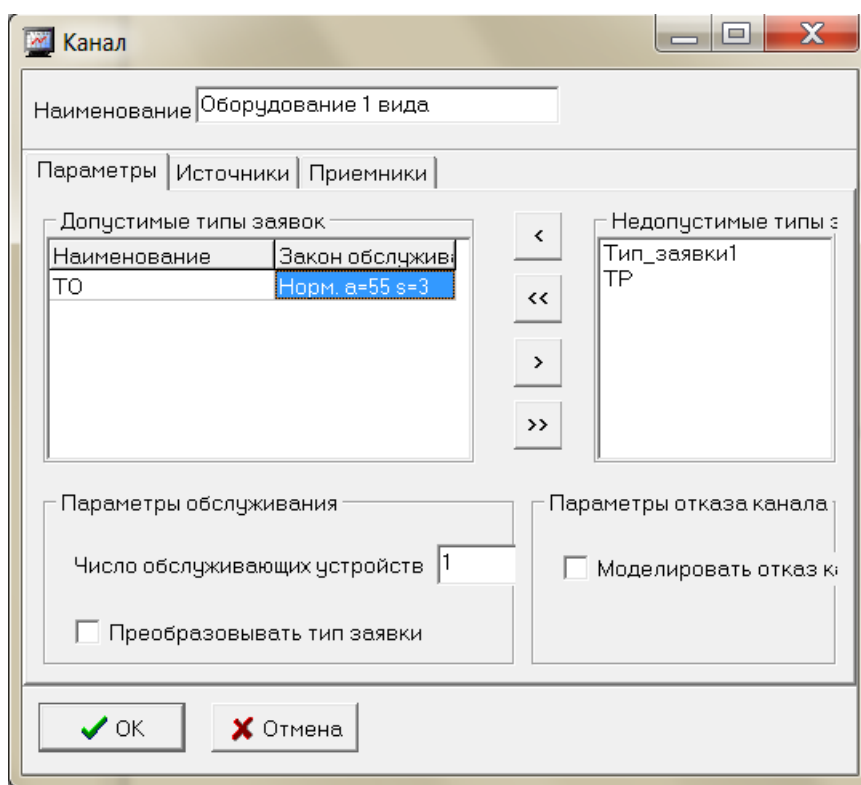


Рис. 31. Свойства канала «Оборудование 1 вида»

Канал

Наименование: Оборудование 2 вида

Параметры | Источники | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Закон обслуживания |
|--------------|--------------------|
| ТР           | Норм. а=240 s=3    |

Недопустимые типы заявок

| Тип_заявки1 |
|-------------|
| ТО          |

Параметры обслуживания

Число обслуживаемых устройств: 1

☐ Преобразовывать тип заявки

Параметры отказа канала

☐ Моделировать отказ канала

OK Отмена

Рис. 32. Свойства канала «Оборудование 2 вида»

Параметры задаются в одних единицах времени. Переведем все параметры в минуты.

Канал

Наименование: бухгалтер

Параметры | Источники | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Закон обслуживания |
|--------------|--------------------|
| ТО           | Норм. а=20 s=3     |
| ТР           | Норм. а=20 s=3     |

Недопустимые типы заявок

| Тип_заявки1 |
|-------------|
|             |

Параметры обслуживания

Число обслуживаемых устройств: 1

☐ Преобразовывать тип заявки

Параметры отказа канала

☐ Моделировать отказ канала

OK Отмена

Рис. 33. Свойства канала «Бухгалтер»

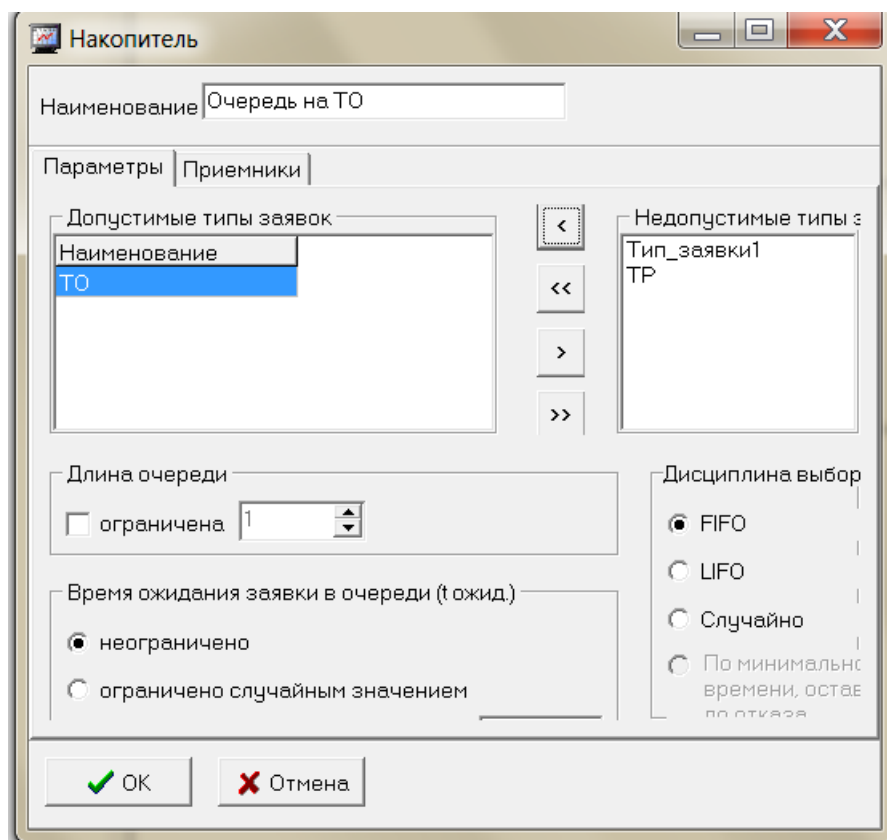


Рис. 34. Свойство накопителя «Очередь на ТО»

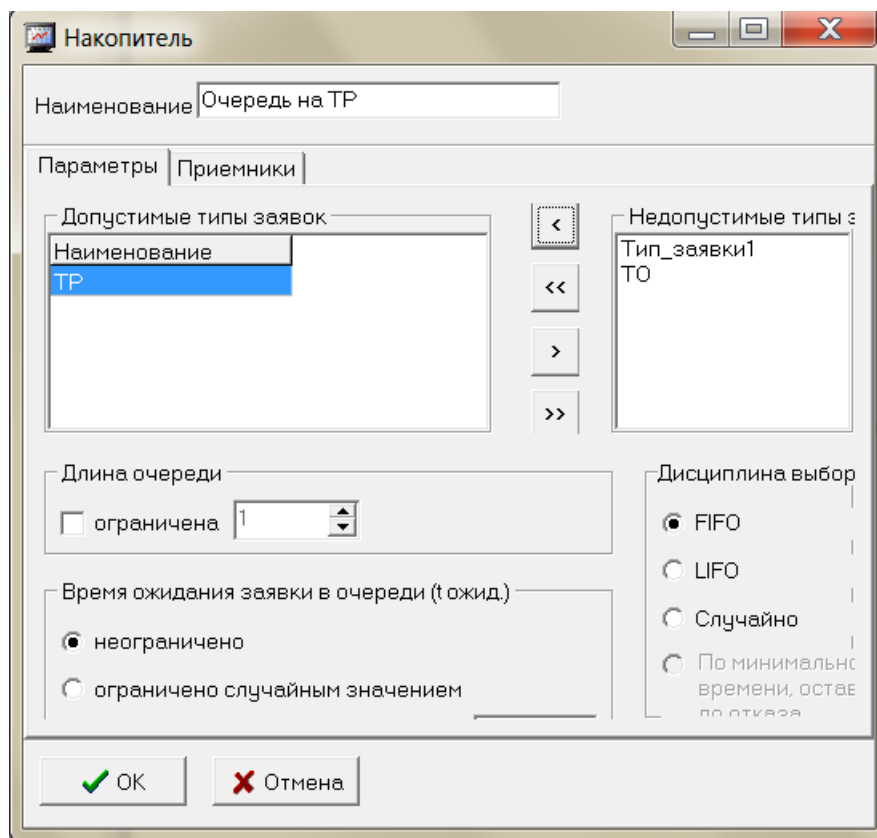


Рис. 35. Свойство накопителя «Очередь на ТР».

Наименование: Очередь на документы

Параметры | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование |
|--------------|
| ТО           |
| ТР           |

Недопустимые типы заявок

| Тип_заявки1 |
|-------------|
|-------------|

Длина очереди

☐ ограничена: 1

Время ожидания заявки в очереди (t<sub>ожид.</sub>)

☒ неограничено

☐ ограничено случайным значением

Дисциплина выбор

☒ FIFO

☐ LIFO

☐ Случайно

☐ По минимальному времени, оставшемуся до отказа

OK Отмена

Рис. 36. Свойство накопителя «Очередь на документы».

Наименование: Авто на ТО

Параметры | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Вероятность |
|--------------|-------------|
| ТО           | 1           |

Недопустимые типы заявок

| Тип_заявки1 |
|-------------|
| ТР          |

Установить равные вероятности

Поток событий

Закон распределения интервалов: Норм. a=30 s=3

Число заявок при одном событии: Детерм. c=1

Изменить Изменить

OK Отмена

Рис. 37. Свойство генератора «Авто на ТО»

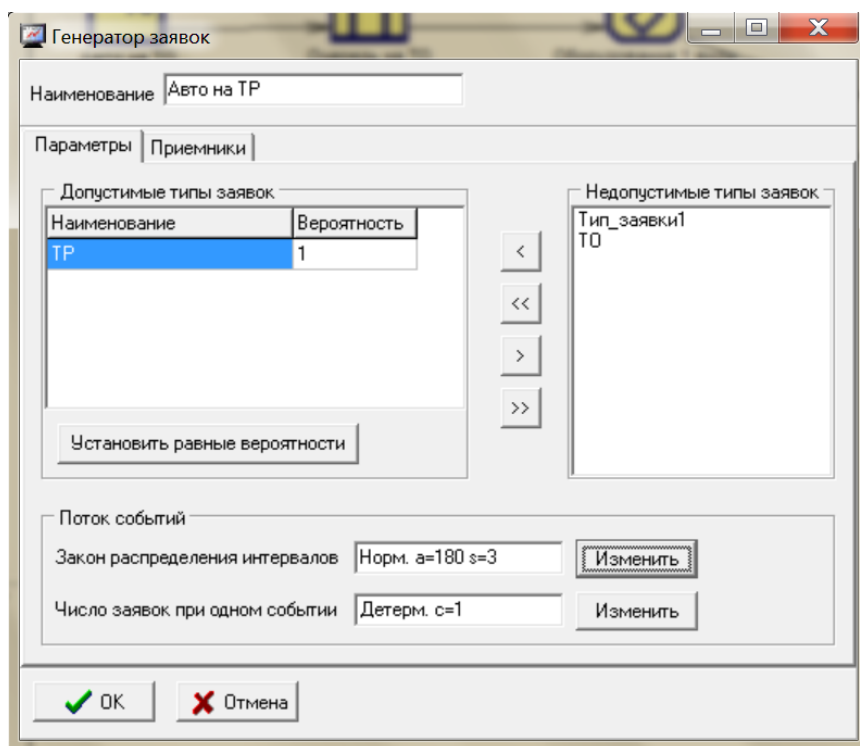


Рис. 38. Свойство генератора «Авто на ТР»

#### 4.2.4. Результаты работы имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания

Запустив процесс моделирования клавишей «**Выполнить эксперимент**» получим результаты работы станции технического обслуживания (СТО) с заданными параметрами на вкладке «**Показатели**». Результаты работы имитационной модели представляются в виде таблиц на рис 39, 40, 41.

Общее число поступивших на обслуживание автомобилей 10000: из них на ТО поступило 8573, остальные на ТР. Одно устройство на оборудовании 1 вида успело обслужить 46,8% поступивших заявок на ТО, а одно устройство на оборудовании 2 вида успело обслужить 14,3% поступивших заявок на ТР. В результате много заявок оказалось в очереди. Средняя очередь на ТО равна 1064 автомобиля, а средняя очередь на ТР равна 134 автомобиля. Всего на станции технического обслуживания было выполнено и оказались на **Выезде со станции** 5749 заявок, то есть 57,5% от поступивших заявок.

Очередей в бухгалтерии нет, так как не все автомобили успевают обслужиться, при этом все каналы на ТО и ТР загружены на 100%.

Можно сделать вывод о том, что необходимо дополнительное оборудование для выполнения ТО и ТР для повышения количества прошедших на станции технического обслуживания автомобилей.

Для оптимизации процессов функционирования станции технического обслуживания необходим другой вид эксперимента - однофакторный анализ.

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки TO

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 8573   | Максимальное число заявок в системе | 3895 |
| Пропускная способность   | 0.0182 | Среднее число заявок в системе      | 1949 |

Показатели канала Оборудование 1 вида

|                          |       |                            |      |                            |   |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|----------------------------|---|
| Число поступивших заявок | 4679  | Среднее время простоя      | 0    | Максимальное время простоя | 0 |
| в % от общего числа      | 46.8% | Среднее время обслуживания | 54.9 | Коэффициент загрузки       | 1 |

Показатели накопителя Очередь на ТО по типу заявки Все типы заявок

|                          |       |                            |       |                               |        |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------------------------|--------|
| Число поступивших заявок | 8573  | Средняя длина очереди      | 1064  | Максимальная длина очереди    | 3894   |
| в % от общего числа      | 85.7% | Среднее время ожидания     | 31908 | Максимальное время ожидания   | 116756 |
| Число "нулевых" заявок   | 1     | без учета "нулевых" заявок | 31912 | Доля заявок, получивших отказ | 0      |

Показатели стока Выезд со станции по типу заявки TO

|                          |       |                            |       |                            |        |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|--------|
| Число поступивших заявок | 4678  | Среднее время жизни заявки | 58526 | Максим. время жизни заявки | 116809 |
| в % от общего числа      | 54.6% |                            |       | Миним. время жизни заявки  | 77.5   |

Выполнить эксперимент Сохранить Копировать Закрыть

Рис. 39. Данные по обслуживанию ТО

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки ТР

|                          |         |                                     |     |
|--------------------------|---------|-------------------------------------|-----|
| Число поступивших заявок | 1428    | Максимальное число заявок в системе | 358 |
| Пропускная способность   | 0.00417 | Среднее число заявок в системе      | 179 |

Показатели канала Оборудование 2 вида

|                          |       |                            |     |                            |   |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|---|
| Число поступивших заявок | 1072  | Среднее время простоя      | 0   | Максимальное время простоя | 0 |
| в % от общего числа      | 10.7% | Среднее время обслуживания | 240 | Коэффициент загрузки       | 1 |

Показатели накопителя Очередь на ТР по типу заявки Все типы заявок

|                          |       |                            |       |                               |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 1428  | Средняя длина очереди      | 134   | Максимальная длина очереди    | 357   |
| в % от общего числа      | 14.3% | Среднее время ожидания     | 24076 | Максимальное время ожидания   | 64050 |
| Число "нулевых" заявок   | 1     | без учета "нулевых" заявок | 24093 | Доля заявок, получивших отказ | 0     |

Показатели стока Выезд со станции по типу заявки ТР

|                          |      |                            |       |                            |       |
|--------------------------|------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 1071 | Среднее время жизни заявки | 32305 | Максим. время жизни заявки | 64265 |
| в % от общего числа      | 75%  |                            |       | Миним. время жизни заявки  | 273   |

Выполнить эксперимент
Сохранить
Копировать
Закрыть

Рис. 40. Данные по обслуживанию ТР.

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки ТР

|                          |         |                                     |     |
|--------------------------|---------|-------------------------------------|-----|
| Число поступивших заявок | 1428    | Максимальное число заявок в системе | 358 |
| Пропускная способность   | 0.00417 | Среднее число заявок в системе      | 179 |

Показатели канала бухгалтер

|                          |       |                            |      |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 5749  | Среднее время простоя      | 24.7 | Максимальное время простоя | 58.8  |
| в % от общего числа      | 57.5% | Среднее время обслуживания | 20   | Коэффициент загрузки       | 0.447 |

Показатели накопителя Очередь на документы по типу заявки Все типы заявок

|                          |       |                            |        |                               |      |
|--------------------------|-------|----------------------------|--------|-------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 5749  | Средняя длина очереди      | 0.0306 | Максимальная длина очереди    | 1    |
| в % от общего числа      | 57.5% | Среднее время ожидания     | 1.37   | Максимальное время ожидания   | 27.8 |
| Число "нулевых" заявок   | 4978  | без учета "нулевых" заявок | 10.2   | Доля заявок, получивших отказ | 0    |

Показатели стока Выезд со станции по типу заявки Все типы заявок

|                          |       |                            |       |                            |        |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|--------|
| Число поступивших заявок | 5749  | Среднее время жизни заявки | 53641 | Максим. время жизни заявки | 116809 |
| в % от общего числа      | 57.5% |                            |       | Миним. время жизни заявки  | 77.5   |

Выполнить эксперимент
Сохранить
Копировать
Закрыть

Рис. 41. Данные по работе Бухгалтера.

#### 4.2.5. Факторный анализ работы имитационной модели

Для проведения факторного анализа работы имитационной модели необходимо выбрать варьируемые факторы и измеряемые отклики. А также определиться с критерием оптимальности работы модели. Хотя модель является достаточно простой выявить влияние нескольких факторов одновременно затруднительно. Проведем ряд однофакторных экспериментов, последовательно изменяя количество устройств в каждом из каналов обслуживания. При этом будем измерять среднее время ожидания в очереди перед соответствующим оборудованием и его время простоя.

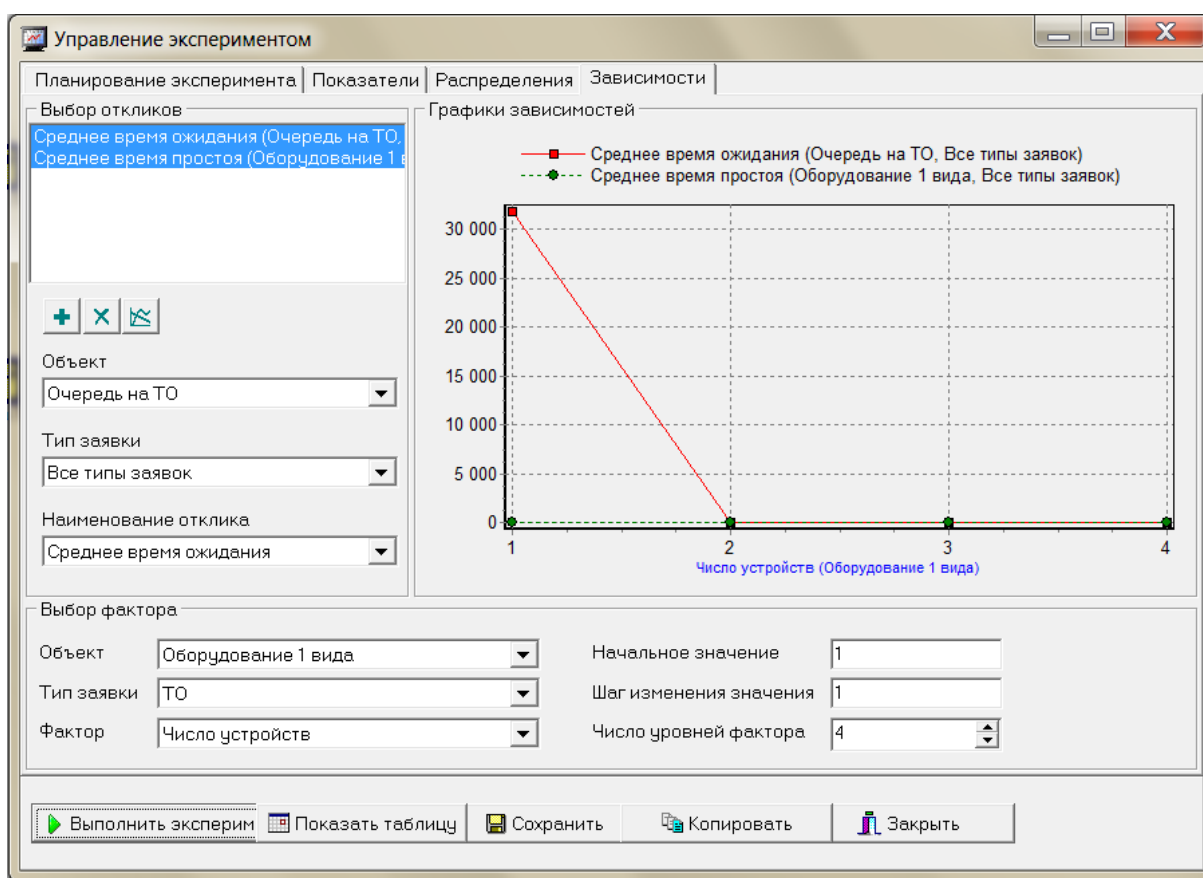


Рис. 42. Однофакторный эксперимент с оборудованием 1 вида

В качестве критерия оптимальности, при этом, выберем количество оборудования, при котором достигается следующее условие. Минимальная разность между средним временем ожидания в очереди перед соответствующим оборудованием и его временем простоя.

Результаты однофакторных экспериментов приведены на рис. 42, 43. Однофакторные эксперименты для оборудования 1 и 2 вида независимы и параллельны. Потoki же на оформление документов объединяются.

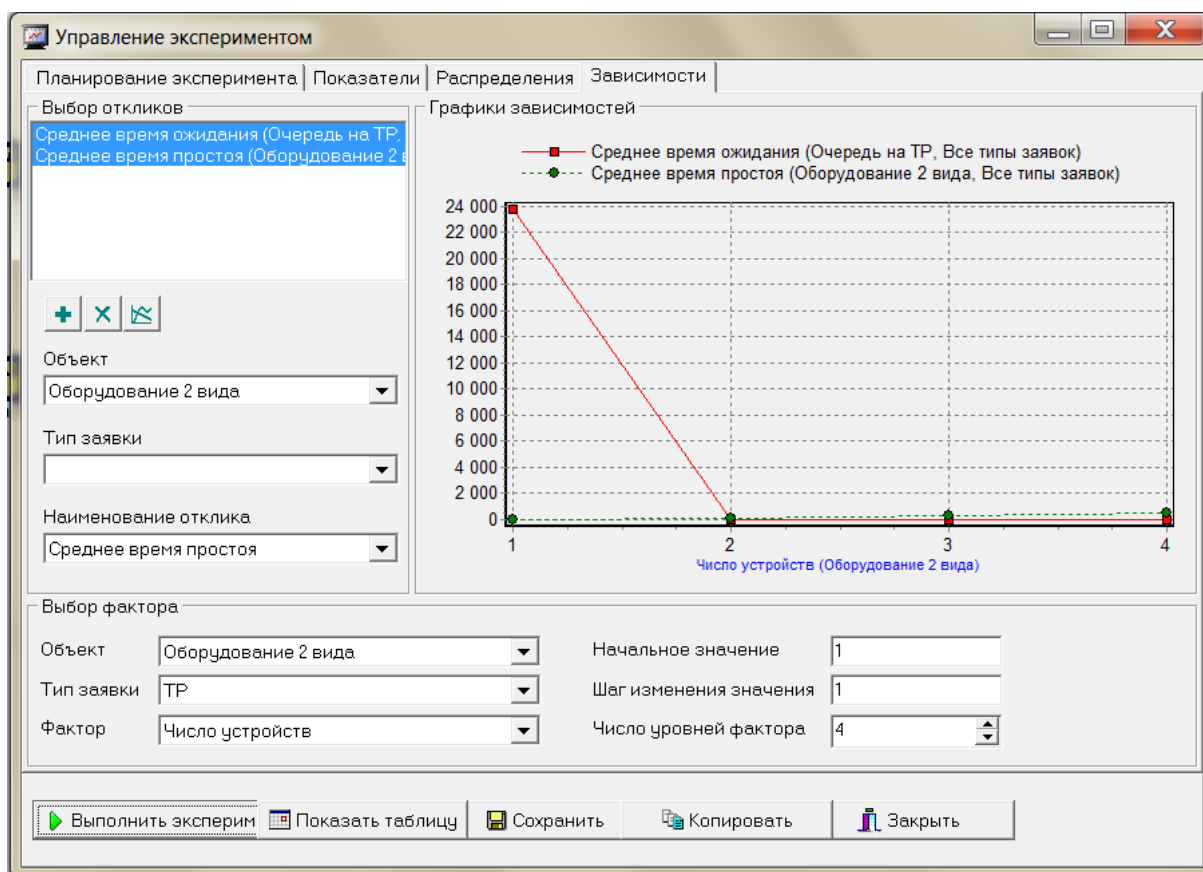


Рис. 43. Однофакторный эксперимент с оборудованием 2 вида

Канал

Наименование: Оборудование 1 вида

Параметры | Источники | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Закон обслуживания |
|--------------|--------------------|
| ТО           | Норм. а=55 s=3     |

Недопустимые типы заявок

- Тип\_заявки1
- ТР

Параметры обслуживания

Число обслуживаемых устройств: 2

☐ Преобразовывать тип заявки

Параметры отказа канала

☐ Моделировать отказ канала

OK | Отмена

Рис. 44. Количество устройств оборудования 1 вида.

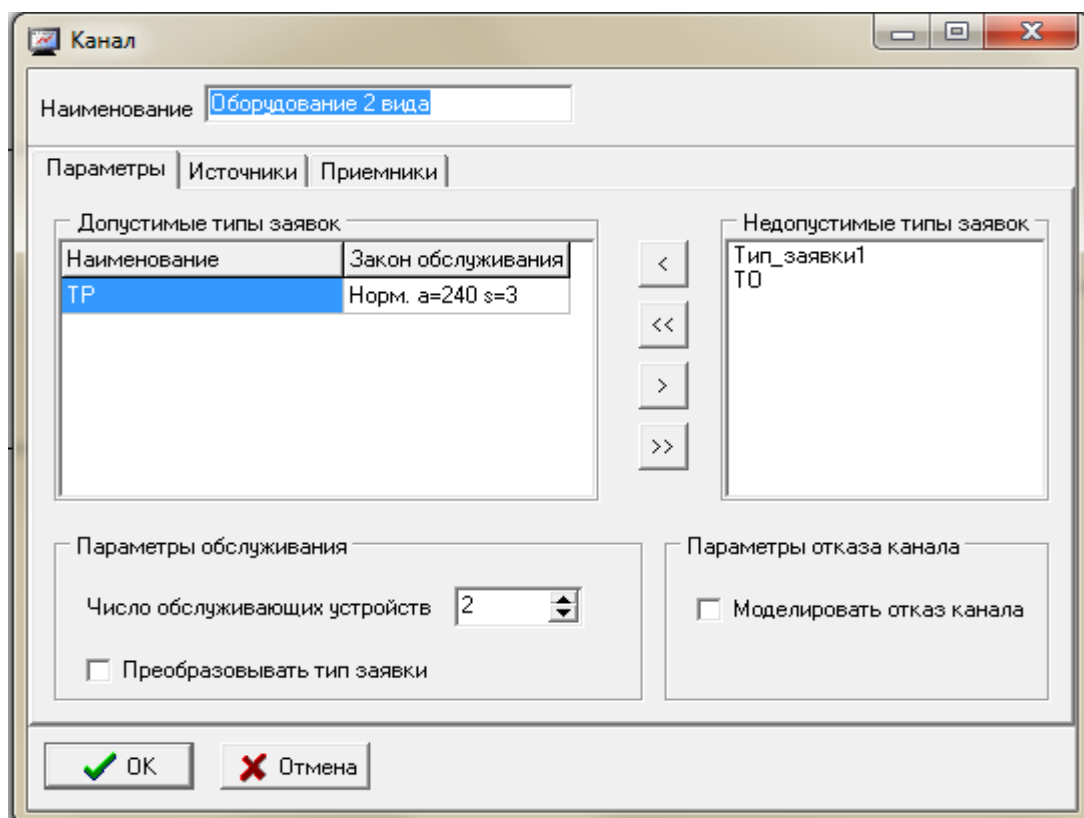


Рис. 45. Количество устройств оборудования 2 вида

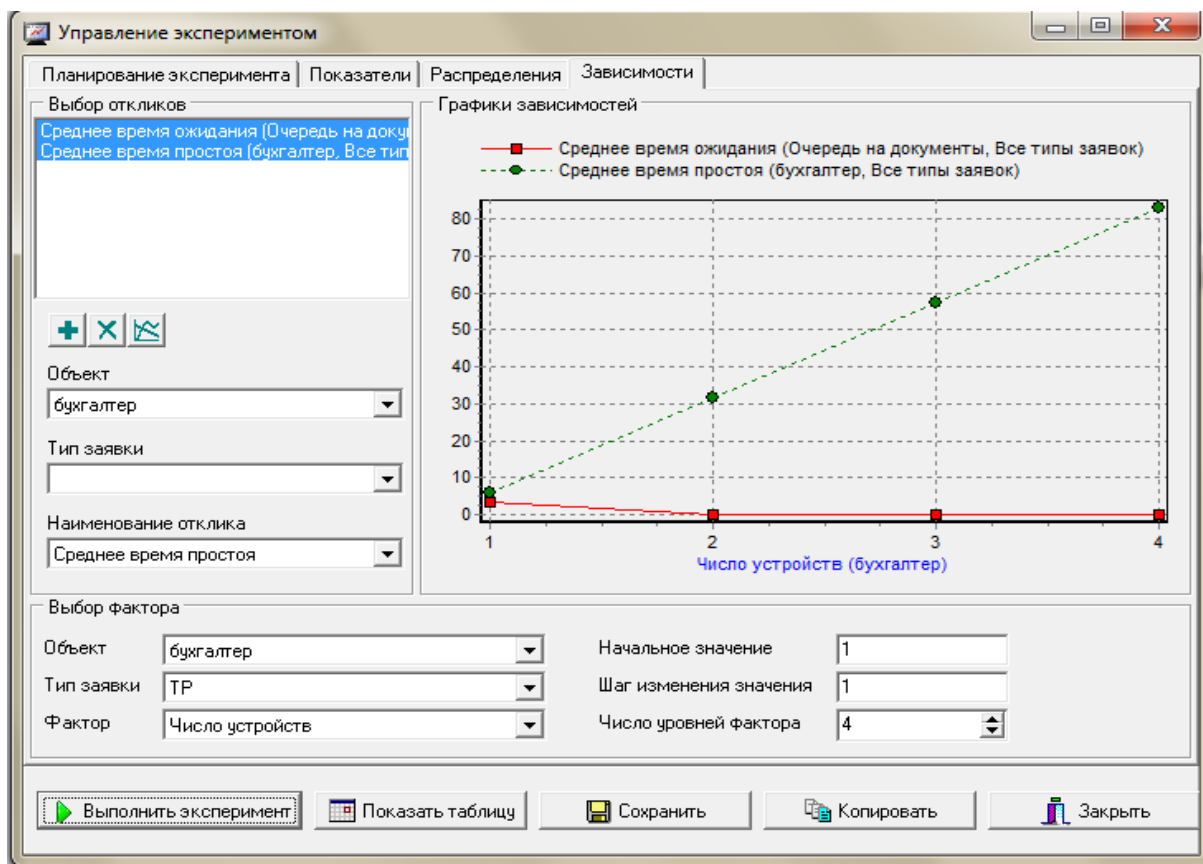


Рис. 46. Однофакторный эксперимент для работников бухгалтерии.

Минимальная разность между средним временем ожидания в очереди перед оборудованием 1 вида и временем простоя оборудования 1 вида достигается при двух устройствах. Минимальная разность между средним временем ожидания в очереди перед оборудованием 2 вида и временем простоя оборудования 2 вида достигается также при двух устройствах. Установим количество оборудования 1 и 2 вида равное 2 (см. рис.44 и рис.45).

Потоки заявок на обслуживание объединяются при оформлении документов, их интенсивность увеличивается. Проверим, проведя однофакторный эксперимент с каналом бухгалтер, достаточно ли в нем одного работника. Результаты эксперимента приведены на рис. 46.

Видно, что один человек справляется с такой интенсивностью заявок на обслуживание, так как минимальная разность между временем ожидания в накопителе и временем простоя канала достигается при одном устройстве.

#### 4.2.6. Результаты оптимальной работы имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания

The screenshot shows a software window titled "Управление экспериментом" (Experiment Management) with four tabs: "Планирование эксперимента" (Experiment Planning), "Показатели" (Indicators), "Распределения" (Distributions), and "Зависимости" (Dependencies). The "Показатели" tab is active, displaying several sections of data:

- Показатели СМО по типу заявки** (Queue indicators by request type):
 

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 8576   | Максимальное число заявок в системе | 4    |
| Пропускная способность   | 0.0334 | Среднее число заявок в системе      | 2.63 |
- Показатели канала** (Channel indicators) for "Оборудование 1 вида" (Equipment type 1):
 

|                          |       |                            |      |                            |      |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 8576  | Среднее время простоя      | 4.81 | Максимальное время простоя | 27.3 |
| в % от общего числа      | 85.8% | Среднее время обслуживания | 55.1 | Коэффициент загрузки       | 0.92 |
- Показатели накопителя** (Buffer indicators) for "Очередь на ТО" (Queue for maintenance):
 

|                          |       |                            |        |                               |      |
|--------------------------|-------|----------------------------|--------|-------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 8576  | Средняя длина очереди      | 0.0264 | Максимальная длина очереди    | 1    |
| в % от общего числа      | 85.8% | Среднее время ожидания     | 0.791  | Максимальное время ожидания   | 19.5 |
| Число "нулевых" заявок   | 6607  | без учета "нулевых" заявок | 3.45   | Доля заявок, получивших отказ | 0    |
- Показатели стока** (Sink indicators) for "Выезд со станции" (Exit from station):
 

|                          |      |                            |      |                            |      |
|--------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 8574 | Среднее время жизни заявки | 78.8 | Максим. время жизни заявки | 114  |
| в % от общего числа      | 100% |                            |      | Миним. время жизни заявки  | 58.8 |

At the bottom of the window, there are four buttons: "Выполнить эксперимент" (Run experiment), "Сохранить" (Save), "Копировать" (Copy), and "Закрыть" (Close).

Рис. 47. Данные по обслуживанию ТО

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки: TP

|                          |         |                                     |      |
|--------------------------|---------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 1425    | Максимальное число заявок в системе | 2    |
| Пропускная способность   | 0.00554 | Среднее число заявок в системе      | 1.48 |

Показатели канала: Оборудование 2 вида

|                          |       |                            |     |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 1425  | Среднее время простоя      | 121 | Максимальное время простоя | 187   |
| в % от общего числа      | 14.2% | Среднее время обслуживания | 240 | Коэффициент загрузки       | 0.665 |

Показатели накопителя: Очередь на TP по типу заявки: Все типы заявок

|                          |       |                            |   |                               |   |
|--------------------------|-------|----------------------------|---|-------------------------------|---|
| Число поступивших заявок | 1425  | Средняя длина очереди      | 0 | Максимальная длина очереди    | 0 |
| в % от общего числа      | 14.2% | Среднее время ожидания     | 0 | Максимальное время ожидания   | 0 |
| Число "нулевых" заявок   | 1425  | без учета "нулевых" заявок | 0 | Доля заявок, получивших отказ | 0 |

Показатели стока: Выезд со станции по типу заявки: TP

|                          |       |                            |     |                            |     |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| Число поступивших заявок | 1423  | Среднее время жизни заявки | 267 | Максим. время жизни заявки | 298 |
| в % от общего числа      | 99.9% |                            |     | Миним. время жизни заявки  | 247 |

Выполнить эксперимент Сохранить Копировать Закрыть

Рис. 48. Данные по обслуживанию TP

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки: Все типы заявок

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 10001  | Максимальное число заявок в системе | 6    |
| Пропускная способность   | 0.0389 | Среднее число заявок в системе      | 4.11 |

Показатели канала: бухгалтер

|                          |      |                            |      |                            |      |
|--------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9998 | Среднее время простоя      | 5.64 | Максимальное время простоя | 52   |
| в % от общего числа      | 100% | Среднее время обслуживания | 20   | Коэффициент загрузки       | 0.78 |

Показатели накопителя: Очередь на документы по типу заявки: Все типы заявок

|                          |      |                            |       |                               |      |
|--------------------------|------|----------------------------|-------|-------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9998 | Средняя длина очереди      | 0.134 | Максимальная длина очереди    | 2    |
| в % от общего числа      | 100% | Среднее время ожидания     | 3.45  | Максимальное время ожидания   | 40.8 |
| Число "нулевых" заявок   | 6217 | без учета "нулевых" заявок | 9.11  | Доля заявок, получивших отказ | 0    |

Показатели стока: Выезд со станции по типу заявки: Все типы заявок

|                          |      |                            |     |                            |      |
|--------------------------|------|----------------------------|-----|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9997 | Среднее время жизни заявки | 106 | Максим. время жизни заявки | 298  |
| в % от общего числа      | 100% |                            |     | Миним. время жизни заявки  | 58.8 |

Выполнить эксперимент Сохранить Копировать Закрыть

Рис 49. Данные по обслуживанию в бухгалтерии.

Запустив опять процесс моделирования клавишей «Выполнить эксперимент» получим результаты работы станции технического обслуживания (СТО) с оптимальным количеством устройств. Количество устройств оборудования 1 и 2 вида равно 2, а бухгалтерии 1. Результаты работы приведены в таблицах на вкладке «Показатели» рис. 47, 48, 49. По результатам можно сделать вывод, что обслуживается 100% поступивших заявок, средняя длина всех очередей << единицы, коэффициент загрузки каналов в оборудовании 1 вида 0,92, оборудовании 2 вида 0,66 (что несколько маловато) и в бухгалтерии 0,78. В целом модель функционирует в оптимальном режиме.

#### 4.2.7. Результаты работы имитационной модели при имитации отказов в работе оборудования

Проведем эксперимент, моделируя отказы в работе оборудования. Предположим, что оборудование может выходить из строя в среднем каждые четыре дня (закон распределения показательный) и на ремонт потребуется время, имеющее равномерное распределение на интервале от 1,5 до 2 часов. Введенные данные в минутах приведены в таблицах на рис. 50 и рис. 51.

Рис. 50. Свойства канала «Оборудование 1 вида»

Полученные результаты работы в виде показателей качества обслуживания приведены на рис. 52 и рис. 53.

По результатам работы видно, что при данной интенсивности отказов, если это технически возможно, средняя очередь на ТО увеличивается незначительно, но максимальная достигает 4 автомобилей. Это по заданию недопустимо. Для улучшения данного показателя возможно приобретение еще одного оборудования 1 вида. Но при этом могут увеличиться простои, что в данном случае рассматривать не будем. Остальные показатели практически не изменяются.

Канал

Наименование: оборудование 2 вида

Параметры | Источники | Приемники

Допустимые типы заявок

| Наименование | Закон обслуживания |
|--------------|--------------------|
| ТР           | Норм. a=240 s=3    |

Недопустимые типы заявок

| Тип_заявки1 |
|-------------|
| ТО          |

Параметры обслуживания

Число обслуживаемых устройств: 1

☐ Преобразовывать тип заявки

В случае отказа канала заявки:

☐ переходят в сток отказов

☐ продолжают обслуживаться в резервном канале

☐ обслуживаются заново в резервном канале

☒ ожидают окончания восстановления канала

Параметры отказа канала

☒ Моделировать отказ канала

Время наработки до отказа

Показ. lу=2.89E-5 Изменить

Время восстановления канала

Равн. a=90 b=120 Изменить

☐ Использовать резервный канал

Канал3

OK Отмена

Рис. 51. Свойства канала «Оборудование 2 вида»

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки: Все типы заявок

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 10001  | Максимальное число заявок в системе | 9    |
| Пропускная способность   | 0.0389 | Среднее число заявок в системе      | 4.18 |

Показатели канала: Оборудование 1 вида

|                          |       |                            |      |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|------|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 8574  | Среднее время простоя      | 4.92 | Максимальное время простоя | 120   |
| в % от общего числа      | 85.7% | Среднее время обслуживания | 55   | Коэффициент загрузки       | 0.918 |

Показатели накопителя: Очередь на ТО по типу заявки: Все типы заявок

|                          |       |                            |        |                               |     |
|--------------------------|-------|----------------------------|--------|-------------------------------|-----|
| Число поступивших заявок | 8574  | Средняя длина очереди      | 0.0731 | Максимальная длина очереди    | 4   |
| в % от общего числа      | 85.7% | Среднее время ожидания     | 2.19   | Максимальное время ожидания   | 115 |
| Число "нулевых" заявок   | 6449  | без учета "нулевых" заявок | 8.84   | Доля заявок, получивших отказ | 0   |

Показатели стока: Выезд со станции по типу заявки: Все типы заявок

|                          |      |                            |     |                            |      |
|--------------------------|------|----------------------------|-----|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9997 | Среднее время жизни заявки | 107 | Максим. время жизни заявки | 390  |
| в % от общего числа      | 100% |                            |     | Миним. время жизни заявки  | 62.2 |

Выполнить эксперимент | Сохранить | Копировать | Закрыть

---

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки: Все типы заявок

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 10001  | Максимальное число заявок в системе | 9    |
| Пропускная способность   | 0.0389 | Среднее число заявок в системе      | 4.18 |

Показатели канала: оборудование 2 вида

|                          |       |                            |     |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 1427  | Среднее время простоя      | 120 | Максимальное время простоя | 305   |
| в % от общего числа      | 14.3% | Среднее время обслуживания | 240 | Коэффициент загрузки       | 0.666 |

Показатели накопителя: Очередь на ТР по типу заявки: Все типы заявок

|                          |       |                            |         |                               |      |
|--------------------------|-------|----------------------------|---------|-------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 1427  | Средняя длина очереди      | 0.00119 | Максимальная длина очереди    | 1    |
| в % от общего числа      | 14.3% | Среднее время ожидания     | 0.214   | Максимальное время ожидания   | 92.9 |
| Число "нулевых" заявок   | 1422  | без учета "нулевых" заявок | 61.2    | Доля заявок, получивших отказ | 0    |

Показатели стока: Выезд со станции по типу заявки: Все типы заявок

|                          |      |                            |     |                            |      |
|--------------------------|------|----------------------------|-----|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9997 | Среднее время жизни заявки | 107 | Максим. время жизни заявки | 390  |
| в % от общего числа      | 100% |                            |     | Миним. время жизни заявки  | 62.2 |

Выполнить эксперимент | Сохранить | Копировать | Закрыть

Рис. 52. Данные по обслуживанию ТО и ТР

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Показатели СМО по типу заявки: Все типы заявок

|                          |        |                                     |      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 10001  | Максимальное число заявок в системе | 8    |
| Пропускная способность   | 0.0388 | Среднее число заявок в системе      | 4.13 |

Показатели канала: бухгалтер

|                          |       |                            |     |                            |       |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|-------|
| Число поступивших заявок | 9978  | Среднее время простоя      | 5.8 | Максимальное время простоя | 146   |
| в % от общего числа      | 99.8% | Среднее время обслуживания | 20  | Коэффициент загрузки       | 0.775 |

Показатели накопителя: Очередь на документы по типу заявки: Все типы заявок

|                          |       |                            |       |                               |    |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------------------------|----|
| Число поступивших заявок | 9979  | Средняя длина очереди      | 0.137 | Максимальная длина очереди    | 2  |
| в % от общего числа      | 99.8% | Среднее время ожидания     | 3.53  | Максимальное время ожидания   | 37 |
| Число "нулевых" заявок   | 6192  | без учета "нулевых" заявок | 9.3   | Доля заявок, получивших отказ | 0  |

Показатели стока: Выезд со станции по типу заявки: Все типы заявок

|                          |       |                            |     |                            |      |
|--------------------------|-------|----------------------------|-----|----------------------------|------|
| Число поступивших заявок | 9977  | Среднее время жизни заявки | 106 | Максим. время жизни заявки | 300  |
| в % от общего числа      | 99.8% |                            |     | Миним. время жизни заявки  | 61.1 |

Выполнить эксперимент | Сохранить | Копировать | Закрыть

Рис 53. Данные по обслуживанию в бухгалтерии.

#### 4.2.8. Идентификация закона распределения случайных величин.

Рассмотрим процессы идентификации закона распределения двух случайных величин. **Входной величины**, которую задает исследователь в модели, например, время обслуживания в канале. **Выходной величины**, которая является показателем качества работы модели, полученным в ходе эксперимента, например, время простоя канала или время ожидания заявок в очереди.

При идентификации необходимо задать границы распределений. Для входных величин при нормальном распределении левую границу устанавливают равной математическому ожиданию -  $3 \cdot \text{среднеквадратических отклонения}$ , правую границу - равной математическому ожиданию +  $3 \cdot \text{среднеквадратических отклонения}$ .

При получении распределений выходных показателей левая граница устанавливают 0, а правую границу задают как максимальное значение случайной величины, взятое из показателей качества обслуживания (см. рис.47). Если частота попадания в интервал  $< 2$ , правую границу переносят левее.

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Критерий остановки эксперимента

☐ Время моделирования ☒ Число поступивших заявок Определить по методу доверительных интервалов

10000 10000  $\tau_{\alpha} =$  1.95  $\varepsilon =$  0.01

☐ Сообщать об окончании эксперимента

Планирование распределений

Объект: Оборудование 1 вида

|                           | Все типы заявок |
|---------------------------|-----------------|
| <b>Время простоя</b>      |                 |
| Левая граница             | 0               |
| Правая граница            | 8               |
| Число интервалов          | 8               |
| <b>Время обслуживания</b> | ✓               |
| Левая граница             | 46              |
| Правая граница            | 64              |
| Число интервалов          | 8               |

Закреть

Рис.54. Границы распределения случайной величины времени обслуживания для оборудования 1 вида

Случайная величина времени обслуживания для оборудования 1 вида задана в виде нормального распределения с математическим ожиданием 55 и среднеквадратическим отклонением 3. Для такого распределения левая граница равна 46, а правая 64. Зададим границы в закладке «Планирование эксперимента» (см. рис. 54)

Определим, насколько хорошо работает программный генератор, проведя проверку распределения случайной величины времени обслуживания для оборудования 1 вида. Подчиняется ли данная случайная величина нормальному закону распределения.

Гипотеза о распределении случайной величины времени обслуживания для оборудования 1 вида по нормальному закону распределения с математическим ожиданием 55 и среднеквадратическим отклонением 3 принимается (см. рис. 55). Как видно на рисунке наблюдаемое значение хи-квадрат 5,35 меньше критического 11.1 взятого из таблиц статистики с уровнем значимости 0,05.

Проверим также распределения **выходных** случайных величин полученных в результате проведения эксперимента. Для этого зададим границы распределения случайной величины, например, времени ожидания заявок в очереди в накопитель «Ожидание на ТО». Левая граница такого распределения 0, а правую границу выберем во вкладке

«Показатели» (см. рис. 46) равной 21 и зададим во вкладке «Планирование экспериментов» (см. рис. 54)

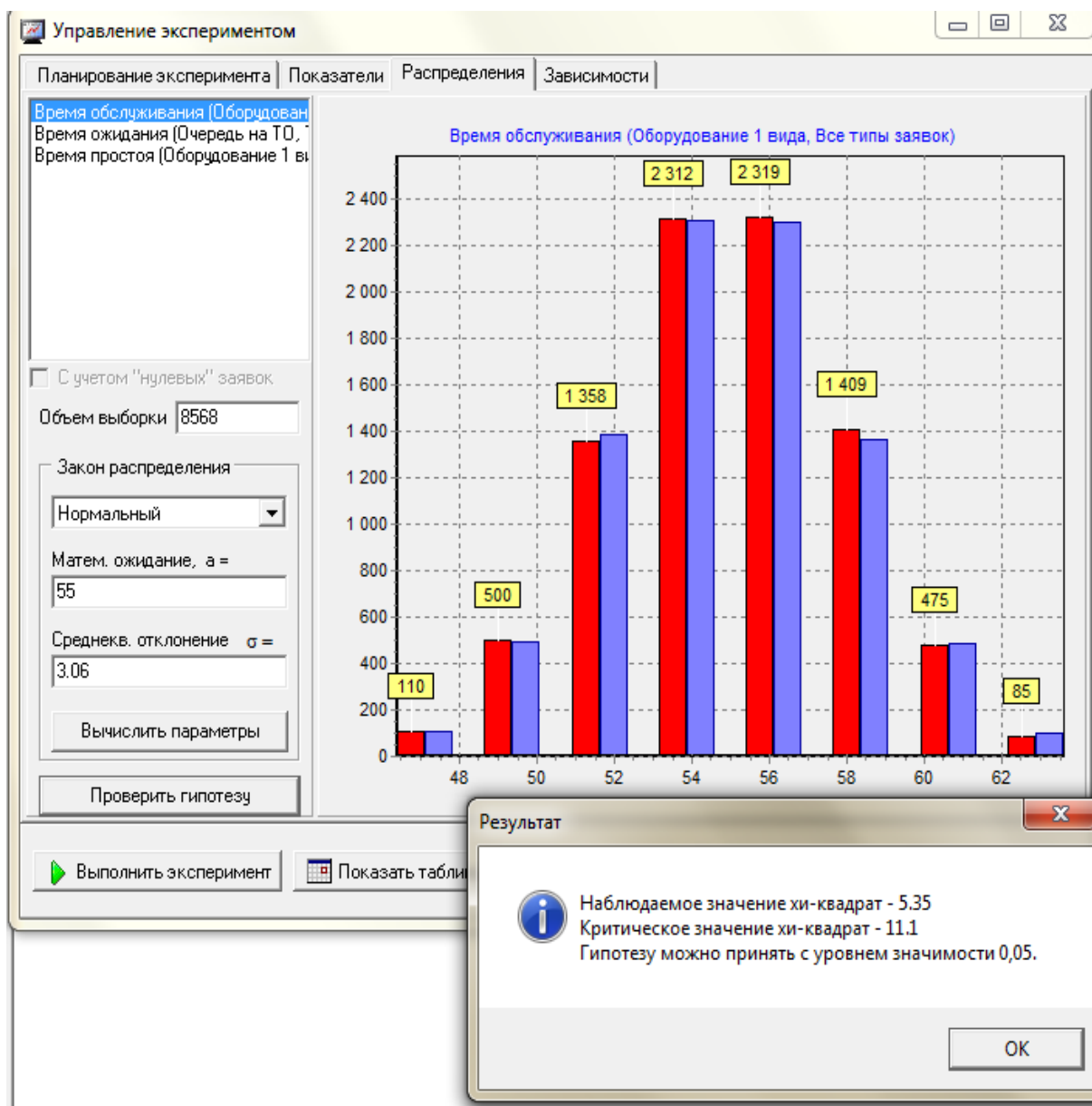


Рис. 55. Распределение случайной величины времени обслуживания для оборудования 1 вида.

Гипотеза о распределении случайной величины времени ожидания автомобилей в очереди для обслуживания на оборудовании 1 вида по показательному закону распределения с интенсивностью равной 0,275 не принимается (см. рис. 57). Как видно на рисунке наблюдаемое значение хи-квадрат 24,8 больше критического 12.6 взятого из таблиц статистики с уровнем значимости 0,05. Хотя распределение времени ожидания автомобилей в очереди похоже на показательное распределение по результатам проверки данная гипотеза не была принята.

Управление экспериментом

Планирование эксперимента | Показатели | Распределения | Зависимости

Критерий остановки эксперимента

☐ Время моделирования ☒ Число поступивших заявок

$t_{\alpha} = 1.95$   $\varepsilon = 0.01$

☐ Сообщать об окончании эксперимента

Планирование распределений

Объект:

|                       | Все типы заявок | ТО |
|-----------------------|-----------------|----|
| <b>Время ожидания</b> |                 | ✓  |
| Левая граница         | 0               | 0  |
| Правая граница        | 8               | 21 |
| Число интервалов      | 8               | 8  |
| <b>Длина очереди</b>  |                 |    |
| Левая граница         | 0               | 0  |
| Правая граница        | 7               | 7  |
| Число интервалов      | 8               | 8  |

Рис.56. Границы распределения случайной величины времени ожидания в очереди на ТО

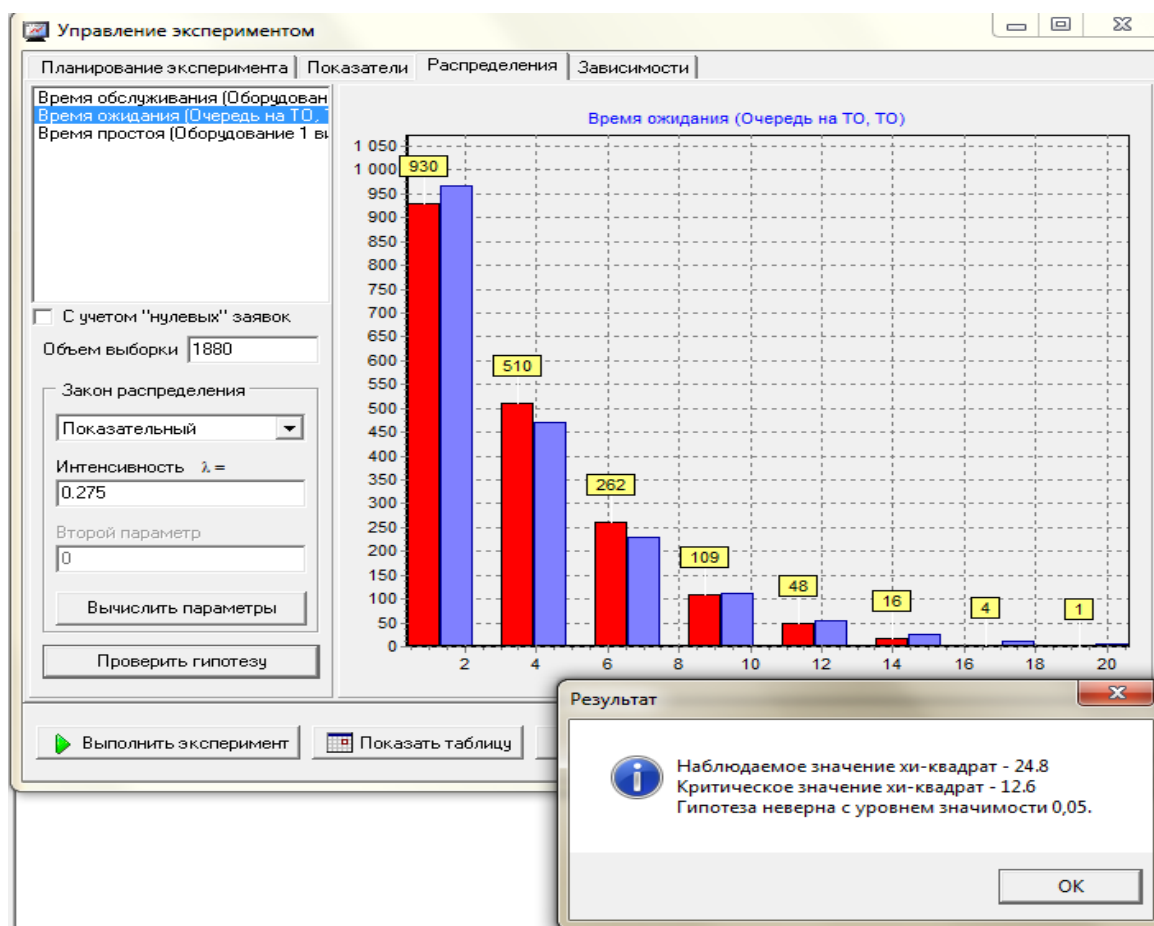


Рис. 57. Распределение случайной величины времени ожидания в очереди на ТО

## Заключение

В современной области имитационного моделирования знания хорошо структурированы и документированы. Поэтому большинство программных средств имитационного моделирования являются универсальными. Они рассматриваются как инструмент манипуляции с объектами предметной области, который облегчает работу человека. Но универсальные программы слишком перегружены деталями и громоздки в обучении. Так же при обучении хотелось бы включить знания о методической составляющей процесса обучения в программную среду. Учесть экспертный опыт преподавателей, их методику предоставления материала в области имитационного моделирования.

В данной работе была сделана попытка ввести как элемент компьютерной среды методику представления знаний, включающую **объекты модели и инструментарий проведения исследований**. Возможная область исследований самой предметной области при этом носит ограниченный характер.

Задача состояла в обеспечении для пользователя - студента максимального комфорта, функционального и временного, в получении навыков работы с компьютерной средой на основе выбранного стандарта моделирования сетей обслуживания.

Был выработан подход к унификации процесса обучения имитационному моделированию, приведение его к единообразной программной форме, позволившей создать приложение, выполненное по единому сценарию для различных предметных областей, как это реализовано в линейке IDEF для моделирования информационных процессов. Такой подход включения экспертного опыта преподавателей в систему управления компьютерной средой значительно ускоряет получение навыков работы с конкретной программой.

Унификация процесса обучения реализуется, прежде всего, в создании интерфейса программ, выполненных по единому стандарту. На панель управления выведены объекты и функции, необходимые для реализации процесса имитационного моделирования: сами объекты моделей и методики обучения преподавателя как эксперта в области моделирования. Такими методиками являются технологии проведения различного вида экспериментов: получение статистических средних, факторного анализа, идентификация законов распределения случайных величин. Реализована система представления знания, опыт работы преподавателя-эксперта в которой включается в виде объектов в панель управления.

Симулятор LiteSMO позволяет планировать проведение эксперимента, получать статистические показатели качества работы для оценки эффективности функционирования системы, проводить факторный

анализ и идентификацию законов распределения. Студент, как пользователь, может этими знаниями манипулировать, создавая новые для себя знания, сохраняя их в удобной форме и осуществляя их обработку по заданным преподавателем сценариям.

Развитие программной среды может быть продолжено в нескольких направлениях. Направление автоматизации процессов для оценки эффективности функционирования модели на основе заданных критериев. Также возможно автоматизировать процесс выбора оптимальности функционирования модели. Для этого необходимо ввести возможность задавать в самой системе критерии оценки качества работы системы при планировании экспериментов.

Возможно также расширение программы для проведения экспертизы знаний студентов, оценивая сформулированные по результатам моделирования выводы о работе имитационной модели. В этом случае необходимо также предусмотреть возможность задавать в самой системе критерии оценки качества работы системы при планировании экспериментов.

Использование симулятор LiteSMO в течении 10 лет показало его эффективность в обучении. Студенты разных курсов даже не знакомые с процессами имитационного моделирования на первом же занятии осваивают технику работы с программой. В течение семестра им удастся формализовать, создавать и эффективно исследовать имитационные модели сетей обслуживания в различных областях знаний.

## Литература

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем/ Н. П. Бусленко.- Москва: Наука, 1978. -356 с.
2. Вендров А.М. CASE-технология. Современные методы и средства проектирования информационных систем/ А. М. Вендров - Москва: Финансы и статистика, 1998. -123 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методологии. - М.: Наука, 1988. – 552 с.
4. Вилкас Э. Й., Решения: теория, информация, моделирование/ Э. Й Вилкас, Е.З. Майминас – Москва: Радио и связь, 1981. - 328 с.
5. Маренко В.А. Аспекты современной информатики: учебное пособие/ В.А Маренко, Г.А. Панфилов, С.М Каратун – Тюмень, ТюмГНГУ, 2004. – 113с.
6. Каратун С. М. Проведение машинных экспериментов с информационными моделями: учебное пособие/ Каратун С. М, Гунцова Л. В., Мосягина Н. А. - Тюмень: ТюмГНГУ, 1997. - 70 с.
7. Каратун С. М., LiteSMO, Имитационное моделирование систем массового обслуживания/ С. М. Каратун, А. В. Скочин - litesmo.narod.ru/, 2009.
8. Каратун С. М. Информационно образовательная среда для исследования систем массового обслуживания с помощью имитационных моделей/ С. М. Каратун, А. В. Скочин - Образовательные технологии и общество, №4, том 8, 2005 – с. 347 - 354
9. Каратун С.М., Разработка информационного обеспечения для управления процессом моделирования и анализа систем массового обслуживания/ С. М. Каратун, А. В. Скочин - Информационные технологии моделирования и управления №1(26), 2006 - с. 59 - 67
10. Каратун С.М., Проблемы создания информационно-образовательной среды/ С. М. Каратун, Н. А Мосягина - Education Technology&Society, №7(4) 2004 - с. 259-264.
11. Каратун С.М. Разработка информационного обеспечения для управления процессом моделирования и анализа систем массового обслуживания/ С. М. Каратун, А. В. Скочин - Информационные технологии моделирования и управления №1(26), 2006 - с. 59 – 67.
12. Каратун С.М., Повышение продуктивности обучения при управлении образовательным процессом на основе информационно – образовательной среды/ С. М. Каратун, А. В. Скочин - Тюмень, Известия вузов Нефть и газ, №2, 2006 – с. 105 – 112.
13. Каратун С.М., Повышение продуктивности обучения при управлении образовательным процессом на основе информационно – образовательной среды/ С. М. Каратун - Education Technology&Society, 9(2) 2006 – с. 241 – 250.

14. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – Москва: Машиностроение, 2010 – 432 с.
15. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2011. – 343 с.
16. Цвиркун А.Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем/ А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов - Москва: Наука, 1985. - 174 с.
17. Шеннон Р. Имитационное моделирование/ Р. Шеннон.- Москва: Высшая школа, 1978. -418 с.

## Оглавление

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие.....                                                                        | 3  |
| 1. Имитационное моделирование. ....                                                     | 5  |
| 1.1. Понятия имитационной модели. ....                                                  | 5  |
| 1.2. Классификация моделей.....                                                         | 7  |
| 1.3. Функции моделей.....                                                               | 10 |
| 1.4. Этапы процесса имитационного моделирования .....                                   | 12 |
| 1.5. Структура моделей.....                                                             | 13 |
| 1.6. Процесс формализации функционирования сложной системы.....                         | 15 |
| 2. Формирование значений случайных величин.....                                         | 17 |
| 2.1. Область применения метода Монте-Карло .....                                        | 17 |
| 2.2. Общие сведения о случайных числах .....                                            | 18 |
| 2.4. Моделирование случайных величин с заданным законом<br>распределения.....           | 22 |
| 3. Имитационное моделирование транспортно- технологических систем .                     | 26 |
| 3.1 Описание моделей транспортно-технологических систем как сетей<br>обслуживания ..... | 26 |
| 3.1.1. Потоки событий .....                                                             | 29 |
| 3.1.2. Структура сети обслуживания.....                                                 | 31 |
| 3.2. Симулятор LiteSMO для исследования сетей обслуживания .....                        | 34 |
| 3.2.1 Построение концептуальной схемы модели .....                                      | 36 |
| 3.2.2 Редактирование связей между узлами модели. ....                                   | 39 |
| 3.2.3 Параметрическая настройка модели .....                                            | 40 |
| 3.2.4 Настройка условий эксперимента .....                                              | 48 |
| 3.2.5. Расчет показателей эффективности .....                                           | 49 |

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.6 Построение распределений.....                                                                                                                           | 52 |
| 3.2.7 Выполнение однофакторного эксперимента .....                                                                                                            | 54 |
| 3.2.8. Сохранение и загрузка модели .....                                                                                                                     | 55 |
| 3.2.9. Аварийные ситуации .....                                                                                                                               | 56 |
| 4. Планирования экспериментов для исследования транспортно-технологических систем .....                                                                       | 57 |
| 4.1. Цель и метод планирования экспериментов .....                                                                                                            | 57 |
| 4.2. Реализация плана имитационного моделирования станции технического обслуживания .....                                                                     | 60 |
| 4.2.1. Пример задания на техническое обслуживание и ремонт автомобилей.....                                                                                   | 60 |
| 4.2.2. Содержание процесса исследования.....                                                                                                                  | 61 |
| 4.2.3. Разработка и описание имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания .....         | 62 |
| 4.2.4. Результаты работы имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания .....             | 68 |
| 4.2.5. Факторный анализ работы имитационной модели .....                                                                                                      | 71 |
| 4.2.6. Результаты оптимальной работы имитационной модели процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей на станции технического обслуживания ..... | 74 |
| 4.2.7. Результаты работы имитационной модели при имитации отказов в работе оборудования.....                                                                  | 76 |
| 4.2.8. Идентификация закона распределения случайных величин. ....                                                                                             | 79 |
| Заключение .....                                                                                                                                              | 83 |
| Литература .....                                                                                                                                              | 85 |