

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Кафедра автоматизации обработки информации

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Методические указания к практическим занятиям и
организации самостоятельной работы
для студентов направления

09.04.04 «Программная инженерия» (уровень магистратуры)

2022

УДК 519.8(65.012.12)

ББК 22.18

С 16

Рецензент:

Сидоров А. А., заведующий кафедрой автоматизации обработки информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, канд. экон. наук, доцент

Салмина Нина Юрьевна

С 16 Моделирование систем: Методические указания к практическим занятиям и организации самостоятельной работы для студентов направления «Программная инженерия» (уровень магистратуры) / Н.Ю. Салмина. – Томск, 2022. – 46 с.

В настоящих методических указаниях изложены рекомендации по подготовке к практическим занятиям, определено задание на каждое занятие и варианты для выполнения индивидуальных работ. Рассмотрены также методические указания для организации самостоятельной работы при изучении дисциплины «Моделирование систем».

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Программная инженерия».

Одобрено на заседании кафедры АОИ, протокол №1 от 20.01.2022

УДК 519.8(65.012.12)

ББК 22.18

Оглавление

1 Введение.....	4
2 Методические указания к проведению практических занятий	5
2.1. Практическое занятие «Моделирование работы стохастической системы»	5
2.2. Практическое занятие «Планирование эксперимента первого порядка»	13
2.3. Практическое занятие «Планирование эксперимента второго порядка»	17
2.4. Практическое занятие «Анализ результатов эксперимента»	19
2.5. Практическое занятие «Моделирование сети систем массового обслуживания»	20
2.6. Практическое занятие «Расчет характеристик сети СМО и проверка адекватности»	30
3 Методические указания для организации самостоятельной работы	35
3.1 Общие положения	35
3.2 Проработка лекционного материала	35
3.3 Самостоятельное изучение тем теоретической части курса	42
3.3.1 Проверка качества генераторов последовательностей случайных чисел	42
3.3.2 Системное время. Управляющие блоки GPSS	43
3.3.3 Обоснование модели и анализ результатов моделирования	45
4 Рекомендуемая литература	46

1 Введение

Цель проведения практических занятий и самостоятельной работы – ознакомление студентов с основными этапами построения моделей на ЭВМ, вопросами статистического моделирования; формирование у студентов профессиональных знаний и практических навыков по разработке и созданию моделей сложных систем с помощью языков моделирования; получение навыков исследования моделей с помощью одного из языков моделирования – GPSS; получение навыков планирования и проведения компьютерного эксперимента для исследования систем.

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по следующим разделам высшей математики: теория вероятностей и математическая статистика, дискретная математика.

Изучение данной части дисциплины включает в себя: теоретический раздел (изучение теоретического материала); практический раздел (выполнение практических и контрольных работ); итоговый контроль результата изучения дисциплины. Данное пособие содержит в себе методические указания и варианты заданий для практических занятий, вопросы по организации самостоятельной работы.

2 Методические указания к проведению лабораторных работ

2.1 Лабораторная работа «Моделирование работы стохастической системы»

Цель работы

Целью данной работы является изучение методов моделирования стохастических процессов и систем, а также получение навыков анализа результатов моделирования.

Рекомендации по подготовке к работе

Сущность метода статистического моделирования сводится к построению для процесса функционирования исследуемой системы некоторого моделирующего алгоритма с использованием метода Монте-Карло. Данный алгоритм имитирует поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных входных воздействий и воздействий внешней среды.

В каждом варианте задания описана работа некоторой стохастической системы, а также указаны те характеристики системы, оценку которых необходимо получить в процессе моделирования.

Для моделирования непрерывных случайных величин с заданными законами распределения можете использовать любой из рассмотренных ранее методов (лабораторная работа «Генерация и проверка последовательностей псевдослучайных чисел»). Для моделирования наступления случайных событий пользуйтесь методами, предлагаемыми в статистическом моделировании [1].

Помните, что, если время между наступлением событий распределено экспоненциально, то количество событий, наступающих в единицу времени, подчиняется Пуассоновскому закону распределения. Какой закон использовать в вашем случае, зависит от построения алгоритма.

Для программной реализации можно использовать любой алгоритмический язык. Из встроенных датчиков случайных чисел пользоваться можно только датчиками равномерно распределенных случайных чисел на интервале от 0 до 1.

Порядок проведения работы

- 1) Построить моделирующий алгоритм для оценки требуемых параметров исследуемой системы;

- 2) Разработать программу и провести моделирование работы системы с определением требуемых параметров;
- 3) Программа должна иметь возможность устанавливать и изменять количество повторных реализаций моделируемого процесса, так как от этого зависит точность получаемых оценок искомых характеристик.

Варианты заданий

Вариант 1.

Техническое устройство состоит из двух узлов: Y_1 и Y_2 . Исправная работа узла Y_1 безусловно необходима для работы устройства; узел Y_2 предназначен для поддержания нормального режима работы Y_1 . Время безотказной работы узлов распределено по экспоненциальному закону и равно в среднем 40 и 60 минут соответственно. Имеется 2 запасных узла Y_1 . При выходе из строя Y_1 техническое устройство останавливается на 3 ± 1 минуты, после чего Y_1 заменяется и работа устройства возобновляется. Если вышел из строя Y_2 , то закон распределения Y_1 меняется: оно работает в среднем 20 минут. Время работы устройств распределено по экспоненциальному закону.

Определить вероятность того, что по истечении двух часов устройство будет находиться в рабочем состоянии.

Вариант 2.

Логика работы устройства обнаружения цели заключается в следующем: если сигнал превышает порог при двух последовательных локациях – цель обнаружена; в противном случае – цель потеряна. Состояния системы: S_0 – исходное, в это состояние из S_1 и S_0 система переходит с вероятностью 0.4; S_1 – состояние, соответствующее однократному превышению порога, в это состояние из S_0 и из этого состояния в очередное S_2 система переходит с вероятностью 0.6; S_2 – состояние, соответствующее двукратному превышению порога, из данного состояния система может переходить в S_1 с вероятностью 0.6 и в S_3 с вероятностью 0.4; S_3 – состояние, соответствующее однократно не превышению порога после обнаружения цели. Если после очередной локации сигнал превышает порог, система возвращается из S_3

в S_2 с вероятностью 0.6, в противном случае – в S_0 с вероятностью 0.4. Определить оценку вероятности обнаружения цели за один час, если интервал смены состояний равен 10 минут.

Вариант 3.

При передаче информации системой передачи данных, вследствие действия помех в канале связи, в блоке информации могут возникнуть одиночные, двойные и тройные ошибки, причем при обнаружении двойных и тройных ошибок требуется повторить передачу блока информации. При обнаружении одиночной ошибки на приемном конце в среднем в течение одной секунды производится ее коррекция. Время передачи блока информации равно в среднем 5 секунд. Время коррекции и передачи информации подчинено экспоненциальному закону распределения.

Оценить для 1000 передаваемых блоков информации затраты времени на коррекцию ошибок и повторную передачу информации, если известно, что вероятности возникновения ошибок равны, соответственно, $P(0) = 0.95$; $P(1) = 0.025$; $P(2) = 0.015$; $P(3) = 0.01$.

Вариант 4.

Рассматривается процесс обработки детали на токарном станке. Вероятность появления брака при обработке равна 0.1. В начале работы проверка подвергается каждая третья деталь. Если число бракованных деталей достигает 20, то в дальнейшем проверка подвергается каждая деталь, обработанная на станке. Если в этом случае число бракованных деталей достигнет 10, то работу на станке прекращают. Поток поступления деталей на обработку подчинен закону Пуассона с интенсивностью 2 детали в минуту.

Определить среднее время наработки станка до остановки.

Вариант 5.

Время между последовательными прибытиями покупателей в магазин равномерно распределяется на интервале от 1 до 20 минут. Для 50% покупателей время обслуживания составляет 8 минут, в то время как для остальных 50% это время составляет 14 минут. Оценить суммарное время ожидания покупателей (простоя в очереди) и время простоя системы обслуживания за 4 часа работы.

Вариант 6.

На складе, обслуживающем три сборочных цеха, нормативный запас комплектующих деталей составляет 10 тысяч комплектов. В начале

работы со склада в каждый из цехов одновременно поступает по 100 комплектов деталей. Время использования каждым цехом одного комплекта является случайной величиной с экспоненциальным законом распределения с параметром 20 комплектов в сутки. После израсходования цехом комплектующих деталей на склад поступает заявка на новую партию деталей, которая удовлетворяется по мере возможности.

Оценить интервал времени, на который может хватить нормативно-го запаса деталей на складе, если известно, что страховой запас деталей на складе равен 200 комплектам.

Вариант 7.

Система может находиться в состояниях S_1, S_2, S_3 . Переход из одного состояния в другое происходит по схеме однородной цепи Маркова. Матрица вероятностей переходов имеет вид:

$$P = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ \hline 0.5 & & 0 & 0.5 \\ \hline 0.3 & 0.25 & & 0.45 \\ \hline \end{array}$$

Время между переходами системы из одного состояния в другое в среднем равно 2 секунды и распределено по экспоненциальному закону.

Оценить вероятность нахождения системы в каждом из состояний через 10 минут после начала работы, если первоначально система находится в состоянии S_1 .

Вариант 8.

Рассматривается процесс обслуживания на бензозаправочной станции, состоящей из одной бензоколонки. Моменты появления автомобилей на станции образуют случайный поток заявок, интервалы между которыми имеют плотность распределения $f(t) = 4 \cdot \exp(-4 \cdot t)$.

Время обслуживания каждой машины имеет экспоненциальный закон распределения с параметром 3 автомобиля в час. Рассматривается работа станции в течение 30 суток.

Оценить число обслуженных и отказанных автомобилей, если автомашина, заставшая бензоколонку занятой, немедленно покидает ее.

Вариант 9.

Система передачи данных работает в режиме, называемом нормальным, до появления сбоя в трех сообщениях подряд. В этом случае

система переходит в режим аварии, в котором остается до тех пор, пока очередное сообщение не будет принято правильно. После этого система возвращается в нормальный режим. Вероятность сбоя в очередном сообщении равна 0.1, вероятность безошибочного приема – 0.9. За состояния системы принять: S_0 – нет сбоев; S_1 – сбой в одном сообщении; S_2 – сбои в двух сообщениях подряд и т.д. Оценить вероятность нахождения системы в следующих состояниях: нормальном, аварийном, S_0, S_1, S_2, S_3 .

Время работы системы – 10 часов; время передачи информации распределено равномерно на интервале от 3 до 7 минут; количество реализаций – 100.

Вариант 10.

Время между последовательными прибытиями покупателей в магазине равномерно распределяется на интервале от 2 до 18 минут. Для 30% покупателей время обслуживания составляет 5 минут, для других 30% – 12 минут и для остальных 40% это время составляет 16 минут.

Оценить суммарное время ожидания покупателей и время простоя системы обслуживания за 8 часов работы.

Вариант 11.

При передаче информации системой передачи данных, вследствие действия помех в канале связи, в блоке информации могут возникнуть одиночные, двойные и более ошибки. Для передачи информации из пункта А в пункт В используется промежуточный пункт Х. при обнаружении двух и более ошибок в пунктах Х или В требуется повторить передачу блока информации из предыдущего пункта. При обнаружении одиночной ошибки на приемном конце в среднем в течение одной секунды производится ее коррекция. Время передачи блока информации распределено равномерно и равно в среднем 5 ± 2 секунды из пункта А в пункт Х и 6 ± 2 секунды из пункта Х в пункт В. Время коррекции информации подчинено экспоненциальному закону распределения.

Оценить для 1000 передаваемых блоков информации затраты времени на передачу информации, если известно, что вероятности возникновения ошибок равны, соответственно, $P(0) = 0.95$; $P(1) = 0.03$; $P(2 \text{ и более}) = 0.02$.

Вариант 12.

Техническое устройство состоит из двух узлов: Y_1 и Y_2 . Исправная работа узла Y_1 безусловно необходима для работы устройства; узел Y_2 предназначен для поддержания нормального режима работы Y_1 . Время безотказной работы узлов распределено по экспоненциальному закону и равно в среднем 30 и 60 минут соответственно. Имеется 3 запасных узла Y_1 . При выходе из строя Y_1 техническое устройство останавливается на $3+1$ минуты, после чего Y_1 заменяется и работа устройства возобновляется. Если вышел из строя Y_2 , то закон распределения Y_1 меняется: оно работает в среднем 15 минут. Время работы устройств распределено по экспоненциальному закону.

Оценить среднее время, которое устройство будет проводить в работающем состоянии.

Вариант 13.

Процесс производства одной из деталей состоит в следующем: заготовки из печи, где они нагреваются до определенной температуры, транспортируются к месту обработки. Время транспортировки - случайная величина, имеющая экспоненциальный закон распределения со средним значением 5 минут. Время обработки - случайная величина с равномерным законом распределения на интервале от 2 до 6 минут. если суммарное время транспортировки и обработки превышает 14 минут, то деталь бракуется.

Определить среднее число годных и бракованных деталей за смену (8 часов).

Вариант 14.

В цех в случайные моменты времени, отделяемые друг от друга интервалами t , имеющими распределение $f(t) = a \cdot \exp(-a \cdot t)$ с параметром $a = 3$ партии в час, поступают очередные партии комплектующих изделий. Конкретный размер партии деталей определяется, исходя из того, что поставки ведутся партиями, содержащими обычно 1000, 1200 и 1400 деталей, причем известно, что $P(1000) = 0.3$, $P(1200) = 0.6$, $P(1400) = 0.1$.

В цехе три сборочные линии, которые обслуживаются различными бригадами. Вероятности того, что вновь поступившая партия деталей попадет в i -ую бригаду, следующие: $P(1) = 0.3$, $P(2) = 0.5$,

$P(3) = 0.2$. Оценить число деталей, получаемых каждой бригадой за смену (8 часов).

Вариант 15.

Начальник пожарной бригады обнаружил, что число пожаров за сутки следует распределению Пуассона со средним значением 4 пожара в сутки. Изучив данные по прежним пожарам, он нашел, что в 70% случаев для тушения потребовалась только одна пожарная машина, а время, необходимое для ликвидации пожара, имеет нормальное распределение с $m = 2.5$ часа и $\sigma = 0.5$ часа. В остальных 30% случаев нужны были две пожарные машины, а время для ликвидации этих пожаров распределено нормально с $m = 3.5$ часа и $\sigma = 1$ час.

Предполагая, что необходимые пожарные машины всегда находятся под рукой, определите, сколько часов в среднем они бывают нужны каждые сутки.

Вариант 16.

В систему управления в случайные моменты времени, интервалы между которыми имеют равномерный закон распределения на интервале $[1, 5]$ минут, поступают сообщения о неблагоприятном ходе управляемого процесса. По каждому из сообщений система может принять одно из пяти управляющих воздействий U_1, U_2, U_3, U_4 и U_5 . Причем известно, что вероятности выбора решений равны, соответственно, $P(U_1) = 0.15$, $P(U_2) = 0.2$, $P(U_3) = 0.22$, $P(U_4) = 0.18$, $P(U_5) = 0.25$. Потери внутри объекта управления, вызванные задержкой в выдаче управляющего воздействия равны, соответственно, 200, 280, 290, 220 и 300 рублей.

Оценить потери внутри объекта управления за 8 часов работы, вызванные задержками в выдаче управляющих воздействий.

Вариант 17.

Психолог в службе «Телефон доверия» ведет разговор с клиентами. Время между поступлениями звонков на разговор подчиняется равномерному закону распределения на интервале 20 ± 5 минут. Длительность разговора подчиняется экспоненциальному закону распределения и равно в среднем для 40% случаев 15 минутам, а для 60% случаев – 25 минутам. Известно, что клиент, услышавший «занято», бросает трубку.

Оценить, какой процент клиентов получает обслуживание, если служба работает с 16 до 24 часов.

Вариант 18.

Т.А.Шанс живет в Лас-Вегасе. Ежедневно перед работой он заходит в соседний ресторан и играет в «тройку». В этой игре игрок подбрасывает многократно монету до тех пор, пока разность между числом выпавших «гербов» и «решек» не станет равна трем. За каждый бросок монеты игрок платит один доллар, но при удачном исходе кона игры он получает 8 долларов. Каждое утро Т.А.Шанс откладывает 10 долларов для этой игры и играет в нее до тех пор, пока либо не проиграет все деньги, отложенные на игру, либо не завершит одну партию.

Оценить вероятность того, будет ли Шанс в выигрыше за неделю в 5 рабочих дней.

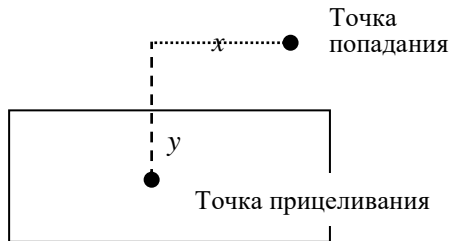
Вариант 19.

Два стрелка производят выстрелы по мишени. Вероятность попадания в десятку у первого игрока равна 0.8, у второго – 0.9. Каждый стрелок производит по 5 выстрелов, причем время, затрачиваемое на один выстрел, распределено равномерно и равно для первого стрелка 18 ± 6 секунд, а для второго – 20 ± 5 секунд. В случае промаха каждый из стрелков может зарядить запасной патрон и произвести дополнительный выстрел. У первого стрелка есть два запасных патрона, у второго – только один. На перезарядку требуется время, которое равно в среднем для каждого 5 ± 2 секунды.

Оценить вероятность того, что первый стрелок поразит мишень 5 раз раньше второго.

Вариант 20.

Про моделировать поведение истребителя-бомбардировщика, посланного атаковать промышленное предприятие ракетами. Размеры предприятия 150×60 м. Точка прицеливания – геометрический центр цели. Точка попадания определяется по отклонениям x и y :



Для расстояния, с которого запускаются ракеты, оба отклонения независимы, нормально распределены относительно точки прицелива-

ния с $m = 0$, $\sigma_x = 60$ м, $\sigma_y = 30$ м. Бомбардировщик при каждом заходе выпускает 6 ракет.

Оценить среднее число попаданий при каждой атаке.

Вариант 21.

Пьяница вышел на улицу подышать свежим воздухом и прогуляться. На каждом перекрестке он может с равной вероятностью пойти на Юг, Север, Восток или Запад. Оценить вероятность того, что, пройдя десять кварталов, он окажется не дальше двух кварталов от своего дома.

2.2 Практическое занятие «Планирование эксперимента первого порядка»

Цель работы.

Целью данной работы является изучение особенностей построения планов первого порядка, получения навыков проведения эксперимента, а также обработки и анализа полученных результатов.

Рекомендации по подготовке к работе

Рассматривается многоканальная марковская СМО. В каждом варианте заданы интервалы возможных изменений ее характеристик.

В предположении о линейной зависимости между откликом и факторами построить план эксперимента в соответствии с вариантом задания.

Для проведения эксперимента построить модель многоканальной СМО на GPSS. Помните, что в Марковских СМО время прихода заявок в систему и время обслуживания подчиняются экспоненциальному закону распределения. Если в вашем варианте количество каналов не является исследуемым фактором, то для проведения эксперимента возьмите постоянное количество каналов из интервала, предложенного в варианте (для обеспечения стационарности системы). Время моделирования необходимо выбирать достаточно большое для обеспечения стохастической сходимости результатов эксперимента.

Перед проведением эксперимента необходимо определить необходимое количество повторений эксперимента в зависимости от требуемой точности. Для этого необходимо провести следующие вычисления: пусть мы хотим построить такую оценку X истинного среднего значения m совокупности, что

$$P\{m-d \leq X \leq m+d\} = 1-\alpha,$$

где X – выборочное среднее,

$1-\alpha$ – вероятность того, что интервал $m \pm d$ содержит X .

Тогда необходимый объем выборки определяется по формуле

$$N = (\sigma \cdot Z_{\alpha/2})^2 / d^2,$$

где $Z_{\alpha/2}$ – двусторонняя стандартная нормальная статистика (допустимая величина риска),

d – допустимая разность между оценкой и истинным значением параметра,

σ – величина изменчивости совокупности (необходимо либо знать, либо выявить в результате эксперимента).

Если это возможно, следует определить дисперсию выхода с помощью пробного эксперимента и получить оценку S^2 дисперсии, а затем вычислить полное число необходимых наблюдений. Тогда

$$N = t^2 \cdot S^2 / d^2,$$

где t – табулированная величина для заданного доверительного интервала и числа степеней свободы начальной выборки, d – половина ширины доверительного интервала.

После проведения эксперимента рассчитать значения коэффициентов регрессионного уравнения первого порядка. Коэффициенты рассчитываются по следующим формулам:

$$\forall i = \overline{0, k} \quad b_i = \sum_j x_{ji} \cdot \bar{y}_j / N$$

где i – номер фактора,

j – номер опыта,

k – количество факторов,

N – количество опытов в эксперименте,

x_{ji} – нормализованное значение i -го фактора в j -м опыте,

\bar{y}_j – среднее значение отклика в j -м опыте (по количеству повторений эксперимента).

Проверить адекватность модели по следующим показателям:

1) сравнив дисперсию адекватности и выборочную дисперсию по критерию Фишера;

2) проверив модель на линейность путем сравнения свободного коэффициента и среднего значения отклика в центре эксперимента по критерию Стьюдента.

После проверки модели на адекватность, независимо от результатов проверки, необходимо определить значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

По результатам всех проверок необходимо сделать выводы о возможности дальнейшего использования полученной модели, а также дать рекомендации последующих действий: все ли факторы значимы, линейна ли зависимость между факторами и откликом, есть ли необходимость построения планов второго порядка и т.д.

Порядок проведения работы

1. Построить план первого порядка в соответствии с вариантом задания.
2. Определить необходимое количество повторений эксперимента в зависимости от требуемой точности.
3. Построить модель многоканальной Марковской СМО на языке моделирования GPSS.
4. Провести эксперимент.
5. Рассчитать значения коэффициентов регрессии уравнения первого порядка.
6. Проверить модель на адекватность.
7. Проверить модель на линейность (для этого необходимо провести дополнительный опыт в центре эксперимента).
8. Проверить значимость коэффициентов.

Варианты заданий

Планы экспериментов

N варианта	Тип плана	Входные переменные			Выходные переменные		
		Время прихода	Время обслуживания	кол-во каналов	ср. время в очереди	ср. длина очереди	коэф. загрузки
1	ДФЭ	+	+		+		
2	ДФЭ	+	+	+		+	
3	ДФЭ	+	+	+			+
4	ДФЭ	+	+	+	+		

N варианта	Тип плана	Входные переменные			Выходные переменные		
		Время прихода	Время обслуживания	кол-во каналов	ср. время в очереди	ср. длина очереди	коэф. загрузки
5	ПФЭ	+	+			+	
6	ПФЭ	+	+				+
7	ПФЭ	+	+		+		
8	ДФЭ	+	+	+		+	
9	ДФЭ	+	+	+			+
10	ДФЭ	+	+	+	+		
11	ПФЭ	+	+			+	
12	ПФЭ	+	+				+
13	ПФЭ	+	+		+		
14	ДФЭ	+	+	+	+		
15	ДФЭ	+	+	+			+
16	ДФЭ	+	+	+		+	
17	ПФЭ	+	+			+	
18	ПФЭ	+	+				+
19	ПФЭ	+	+		+		
20	ДФЭ	+	+	+		+	
21	ДФЭ	+	+	+			+
22	ДФЭ	+	+	+	+		
23	ПФЭ	+	+			+	
24	ПФЭ	+	+				+

Требуемая точность

N варианта	d
1,6,5,7,10,12,20-22	$\sigma/2$
2,4,3,8,14,15	$2\sigma/3$
9,11,13,17-19	$3\sigma/5$
23,24,16	$3\sigma/5$

Значения факторов

N варианта	Значение уровня	Время прихода	Время обслуживания	Количество каналов
1-3	-1	100	560	6
	+1	110	580	8

№ варианта	Значение уровня	Время прихода	Время обслужив-я	Количество каналов
4-6	-1	50	350	8
	+1	60	380	10
7-8	-1	65	450	8
	+1	75	500	12
9-10	-1	30	200	9
	+1	40	240	11
11-12	-1	10	40	5
	+1	12	48	5
13-16	-1	30	200	9
	+1	50	260	11
17-19	-1	100	560	6
	+1	110	580	8
20-22	-1	60	350	8
	+1	70	400	10
23-24	-1	65	440	8
	+1	75	480	12

2.3 Практическое занятие «Планирование эксперимента второго порядка»

Цель работы

Целью данной работы является изучение особенностей построения планов второго порядка, получения навыков проведения эксперимента, а также обработки и анализа полученных результатов.

Рекомендации по подготовке к работе

В качестве исходных данных берутся результаты, полученные на предыдущем практическом занятии.

Для проведения эксперимента построить модель многоканальной СМО на GPSS. Помните, что в Марковских СМО время прихода заявок в систему и время обслуживания подчиняются экспоненциальному закону распределения. Если в вашем варианте количество каналов не является исследуемым фактором, то для проведения эксперимента возъ-

мите постоянное количество каналов из интервала, предложенного в варианте (для обеспечения стационарности системы). Время моделирования необходимо выбирать достаточно большое для обеспечения стохастической сходимости результатов эксперимента.

Построить план второго порядка с обеспечением ортогонального планирования.

Внимание! Для целочисленных факторов невозможно преобразовать коэффициенты для обеспечения ортогональности! Значения факторов в плане и при проведении эксперимента должны совпадать! В таком случае ортогональность обеспечивается только по тем факторам, по которым это возможно.

Провести эксперимент.

После проведения эксперимента рассчитать значения коэффициентов регрессионного уравнения второго порядка.

Проверить адекватность модели по следующим показателям:

1) сравнив дисперсию адекватности и выборочную дисперсию по критерию Фишера;

2) определив значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

По результатам всех проверок необходимо сделать выводы о возможности дальнейшего использования полученной модели, а также дать рекомендации последующих действий: все ли факторы значимы, адекватна ли модель и т.д.

Порядок проведения работы

1. Построить план второго порядка в соответствии с вариантом задания.
2. Определить необходимое количество повторений эксперимента в зависимости от требуемой точности.
3. Провести эксперимент.
4. Рассчитать значения коэффициентов регрессии уравнения второго порядка.
5. Проверить модель на адекватность.
6. Проверить значимость коэффициентов.

2.4 Практическое занятие «Анализ результатов эксперимента»

Цель работы

Целью данной работы является получения навыков проведения анализа результатов проведения эксперимента первого и второго порядка, а также обработки и анализа полученных результатов.

Рекомендации по подготовке к работе

По результатам первых двух практических занятий необходимо сделать выводы о возможности дальнейшего использования полученной модели, а также дать рекомендации последующих действий: все ли факторы значимы, адекватна ли модель и т.д.

Рассмотрим возможные ситуации и движения по достижению адекватности модели.

Случай адекватной модели

Возможны три варианта:

1. Все коэффициенты регрессии значимы.
2. Часть коэффициентов значима, часть — нет.
3. Все коэффициенты незначимы.

Во втором варианте выбираются решения, реализация которых приводит к получению значимых коэффициентов:

- изменение интервалов варьирования;
- перенос центра плана;
- отсеивание незначимых факторов;
- увеличение числа параллельных опытов;
- достройка плана (например, переход к ПФЭ).

Третий вариант чаще всего происходит из-за большой ошибки эксперимента или из-за узких интервалов варьирования. Поэтому здесь возможные решения — это увеличение точности эксперимента за счет улучшения методики исследования или увеличения интервалов варьирования.

Случай неадекватной линейной модели

Признаки, по которым можно установить неадекватность:

- а) значимость хотя бы одного эффекта взаимодействия;
- б) значимость суммы коэффициентов регрессии при квадратичных членах. Оценкой этой суммы служит разность между свободным коэффициентом и значением отклика в центре плана.

В случае неадекватности линейной модели происходит переход к планам второго порядка.

Случай неадекватности модели второго порядка

Возможные варианты решения:

- увеличение точности эксперимента за счет улучшения методики исследования или увеличения интервалов варьирования.
- перенос центра плана;
- увеличение числа параллельных опытов;
- достройка плана (например, переход к ПФЭ);
- переход к планам третьего порядка.

Порядок проведения работы

1. В случае незначимых коэффициентов добиться значимости;
2. При неадекватной модели второго порядка проанализировать возможные причины и добиться адекватности модели (провести дополнительный эксперимент);
3. По результатам проверок дать рекомендации по дальнейшим исследованиям или использованию модели.

2.5 Практическое занятие «Моделирование сети систем массового обслуживания»

Цель работы

Целью данной работы является изучение особенностей моделирования на GPSS системы, структура которой может быть представлена в виде открытой или закрытой сети массового обслуживания. Кроме того, к целям работы относится получение навыков аналитического расчета для анализа результатов моделирования.

Рекомендации по подготовке к работе

Рассматривается сеть СМО. Необходимо построить модель сети на GPSS и провести моделирование.

Перед построением модели необходимо определить достаточное для стационарности сети количество каналов по каждой СМО. Для этого первоначально строится граф передач. По графу передач строится матрица передач. По построенной матрице составляется система линей-

ных уравнений для расчета интенсивностей прихода заявок на каждую отдельную СМО λ_i . Интенсивность входного потока в сеть λ_0 определена в варианте задания.

Для того, чтобы сеть была стационарна, необходимо, чтобы для каждой СМО выполнялось условие:

$$\lambda_i < s_i \cdot \mu_i,$$

где λ_i – интенсивность прихода заявок в СМО;

μ_i – интенсивность обслуживания в i -ой СМО;

s_i – количество каналов в i -ой СМО.

Если хотя бы для одной СМО это условие не выполняется, количество каналов в соответствующей СМО должно быть увеличено так, чтобы сеть стала стационарной. При определении значений интенсивностей помните, что масштаб времени должен быть одинаков для всех характеристик, и время прихода/обслуживания обратно пропорционально интенсивности.

После определения необходимого количества каналов, строится модель сети на GPSS в соответствии с полученными данными. Время моделирования выбирается самостоятельно. Оно должно быть достаточно большим для получения удовлетворительных статистических данных (количество заявок, проходящих через каждую СМО должно быть не менее тысячи). При распараллеливании входного потока в модели более, чем на два, помните, что такой процесс удобнее моделировать через функцию. В этом случае не придется рассчитывать вероятности перехода для второй и третьей ветви потоков. Если же вы пользуетесь блоком статистического перехода, то внимательнее обращайтесь с вероятностями: исходные вероятности заданы для всего входного потока. Так, если известно, что входной поток заявок разделяется на три потока с вероятностями 0.2, 0.4 и 0.4, то в первом статистическом блоке часть заявок должна перенаправляться с вероятностью 0.2. В следующем статистическом блоке перенаправляется уже половина (от оставшихся) заявок, а все оставшиеся переходят к следующему за статистическим блоку.

Если расчеты проведены верно, и модель на GPSS соответствует аналитической, должны совпадать расчетные и модельные коэффициенты загрузки по отдельным СМО. Если загрузки не совпадают, необходимо определить причину расхождений данных и добиться их совпадения. Одной из причин могут быть неверные расчеты. Если расчеты верны, то причиной несоответствия результатов может быть то, что построенная модель не соответствует вашему графу передач.

Порядок проведения работы

1. В варианте задания описано функционирование сети СМО. Будем считать, что все потоки – простейшие, все СМО - Марковские.
2. Построить граф передач, рассчитать интенсивности входных потоков на каждую СМО.
3. Проверить стационарность сети. Если сеть не стационарна, то добиться стационарности путем увеличения числа каналов обслуживания на соответствующих СМО.
4. Построить модель сети на языке моделирования GPSS.
5. Сравнить рассчитанные коэффициенты загрузки отдельных СМО с аналогичными характеристиками, полученными в результате моделирования.

Варианты заданий

Вариант 1

Партии комплектующих деталей поступают в цех сборки в среднем каждую минуту. В этом цеху изделие собирается целиком и отправляется в отдел технического контроля для проверки. При проверке изделий признаются годными только 40%, остальные требуют доработки. Причем часть негодных изделий имеют мелкие недоработки и отправляются в цех наладки, после которого снова попадают в ОТК, а часть негодных изделий имеют серьезные неполадки, допущенные при сборке, и отправляются снова в цех сборки. Соотношение этих изделий составляет 5:1 соответственно. На сборку одного изделия затрачивается в среднем 3 минуты, на проверку качества - 30 секунд и на наладку - 2 минуты.

Вариант 2.

Больные приходят в поликлинику в среднем каждые 5 минут и обращаются в регистратуру за талоном к врачу или за карточкой. Регистратор обслуживает посетителя в среднем в течение трех минут. После регистратуры больной направляется к врачу. Врач осматривает больного и назначает лечение. В 40% случаях больному достаточно одного визита к врачу, в 50% - врач назначает время повторного посещения для больного, в остальных случаях пациент направляется на сдачу анализов, после чего он снова должен прийти к врачу. Все повторные посещения врача проходят без обращения в регистратуру. Врачу выделяется на

каждого больного в среднем по 12 минут. Анализы производятся в течение одного часа.

Вариант 3.

В почтовое отделение посетители заходят в среднем через каждые 4 минуты. Примерно 60% посетителей направляются в отдел переводов (получить перевод, отправить заказное письмо, оформить подписку), а остальные приходят для отправления/получения посылки или бандероли и для этого направляются в соответствующий отдел. Среди клиентов, отправляющих посылки, около 20% вынуждены повторно обратиться в этот же отдел (неправильно заполнили бланки; после того, как им завернули бандероль, необходимо надписать адрес и т.д.). После отдела отправки посылок 40% посетителей направляются в отдел переводов. Будем считать, что после отдела переводов все клиенты покидают почтовое отделение. Среднее время обслуживания в отделе переводов - 3 минуты, в отделе посылок - 6 минут.

Вариант 4.

В аэропорт заходят пассажиры в среднем каждые 40 секунд. Половина из них имеет на руках билеты и сразу же направляется на регистрацию, другая половина не имеет билетов и поэтому сначала обращается в кассу аэропорта. Кассир обслуживает каждого клиента в среднем 2 минуты, причем билеты приобретают только 80% человек, остальные получают отказ из-за отсутствия мест и после этого покидают аэропорт. Пассажиры, купившие билет, направляются на регистрацию. Регистрация билетов производится в среднем в течение одной минуты. После регистрации, ожидая посадки в самолет, часть пассажиров (около 30%) направляется в буфет, остальные просто находятся в зале ожидания. Буфетчица обслуживает клиентов в среднем за 3 минуты.

Вариант 5.

В предварительных железнодорожных кассах работают кассы и справочная служба. Посетители заходят в кассы примерно каждые 5 минут, причем 60% посетителей направляется сразу в кассу, а остальные - в справочную службу. Справочная обслуживает каждого клиента в среднем 3 минуты. В зависимости от полученной справки (есть или нет места на нужные поезда, есть или нет удобный маршрут следования и т.д.) посетители либо направляются в кассу (около 70%), либо уходят. На работу с клиентом кассир затрачивает в среднем 7 минут. При этом 60% посетителей приобретают билеты и уходят, половина оставшихся

направляется кассиром в справочную службу, а вторая половина вынуждена прийти в кассу в следующий раз, когда будет получена информация или броне.

Вариант 6.

В магазине находится два отдела и касса, общая для двух отделов. Покупатели заходят в магазин в среднем каждые 2.5 минуты. Половина из них направляется в 1-й отдел, вторая половина - во 2-й. После первого отдела около 60% покупателей направляется сразу в кассу и после этого покидает магазин, остальные направляются во второй отдел. После второго отдела около 40% покупателей направляются в кассу и покидают магазин, остальные заходят еще и в первый отдел. Среднее время обслуживания в 1-м отделе - 4 минуты, во втором - 3,5 минуты, кассир обслуживает покупателей в среднем за 2 минуты.

Вариант 7.

В доме быта функционируют три различных отделения: химчистка, парикмахерская и ремонт обуви. Посетители, которые приходят в дом быта в среднем через каждые 10 минут, направляются с одинаковой вероятностью в одно из этих отделений. После обслуживания около 60% посетителей покидают дом быта, остальные же с равной вероятностью могут направиться в любое из оставшихся отделений. Обслуживание в 1-м отделении длится в среднем 5 минут, во втором - 40 минут и в третьем - 20 минут.

Вариант 8.

На станции автообслуживания выполняются следующие услуги: заправка бензина, мойка автомашин, мелкий ремонт. Примерно 60% машин, прибывающих на станцию, направляются на заправку бензина, половина оставшихся - на мойку и остальные нуждаются в мелком ремонте. После мойки все машины уезжают, эта операция занимает около 15 минут. После мелкого ремонта половина машин уезжает, а половина направляется на заправку бензина. После заправки бензина половина машин также уезжает, а вторая половина направляется на мойку. Машины прибывают на станцию в среднем каждые 8 минут, время ремонта в среднем составляет 30 минут, заправка бензина длится в среднем 5 минут.

Вариант 9.

После первичной термообработки в печи детали поступают в цех доводки, в котором проходят два этапа обработки и технический контроль. Время обработки детали на первом этапе составляет в среднем 7 секунд, на втором этапе - 8 секунд. При выходе из цеха детали проверяются контролером ОТК. 80% деталей пропускается контролером, а 20% направляется на повторную обработку в цех, причем половина из них отправляется на первый этап обработки, половина - на второй (в зависимости от степени брака). Время между поступлениями деталей в цех равно в среднем 6 секунд, время технического контроля составляет 5 секунд.

Вариант 10.

В женском отделении парикмахерской можно сделать прическу у парикмахера либо маникюр у маникюрщицы. Посетители приходят в отделение через каждые 10 минут, 10% из них приходят сделать маникюр, остальные - к парикмахеру. Парикмахер обслуживает клиента в среднем в течение 20 минут, после чего 40% клиентов покидают парикмахерскую. 35% клиентов делают завивку и поэтому ждут очередного захода к парикмахеру, из них 25%, чтобы не терять времени, делают маникюр, после которого снова направляются к парикмахеру. Оставшиеся 25% клиентов после парикмахера идут делать маникюр. Маникюрщица тратит на каждого клиента в среднем по 22 минуты. Все клиенты после маникюрщицы покидают парикмахерскую.

Вариант 11.

В оптике, где посетитель может заказать или купить очки, работает также врач-окулист. Посетители, которые приходят в среднем каждые 5 минут, могут либо сразу обратиться в отдел заказов на очки, либо пройти к врачу за рецептом (около 40% посетителей). Врач затрачивает на каждого посетителя в среднем по 7 минут. Заказ на очки принимается примерно 5 минут, причем в продаже могут оказаться подходящие для клиента очки, тогда он их покупает и покидает оптику насовсем. 80% клиентов вынуждены заказывать индивидуальное изготовление очков. На выполнение заказа в мастерской оптики требуется в среднем около одного часа, после чего клиент может получить свои очки через отдел заказов.

Вариант 12.

В аптеке есть два отдела: отдел готовых лекарств и рецептурный отдел. Посетители приходят в аптеку в среднем через каждые 2.5 минуты. Половина посетителей направляется в отдел готовых лекарств, после чего покидают аптеку. Вторая половина посетителей обращается в рецептурный отдел. В 50% случаях клиент сразу же получает готовое лекарство по рецепту, в остальных случаях готового лекарства нет и клиент должен зайти еще раз за изготовленным лекарством. После рецептурного отдела примерно 20% посетителей заходит еще и в отдел готовых изделий, остальные просто покидают аптеку. Время обслуживания в отделе готовых изделий равно в среднем 2 минуты, в рецептурном отделе - 5 мин.

Вариант 13.

В отдел готового платья покупатели заходят в среднем каждые 2 минуты. Здесь они осматриваются, после чего около 30% покупателей уходят, не купив ничего. 20% покупателей выбирают вещь и без примерки направляются в кассу, где кассир обслуживает каждого покупателя в среднем 1 минуту. Остальные покупатели, выбрав вещь, направляются в примерочную и занимают кабинку около 7 минут. После этого половина покупателей направляется в кассу, а половина снова начинает осматривать товар, выбирая другую вещь.

Вариант 14.

В телеателье существуют две службы: ремонт телевизоров на дому и ремонт телевизоров в ателье. Заявки на ремонт поступают в ателье в среднем каждые 40 минут. Около 40% из них требуют ремонта телевизора в ателье, на обслуживание такой заявки в среднем затрачивается 3 часа. Заявки на ремонт на дому выполняются мастерами в течение 1.5 часов (включая дорогу), причем после этого выполненными являются около 40% заявок, 30% заявок требуют повторного прихода мастера, а остальные 30% - ремонта телевизора в ателье.

Вариант 15.

Городская адресная справка включает в себя два отделения: отдел приема заказа и отдел поиска требуемого абонента. Запросы на поиск отдельных лиц поступают в среднем каждые 5 минут. Прием заказа выполняется в среднем около 2 минут, причем после этого около 5% заказов отсеиваются за невозможностью выполнения (мало данных). После приема заказ передается на выполнение. На поиск абонента затрачива-

ется в среднем 10 минут, после чего 70% клиентов получают необходимую информацию, а для 30% необходимая информация не получена и заказ снова перелается в отдел приема заказов для дополнительной работы с клиентом (уточнения или изменения запроса).

Вариант 16.

В мастерской по ремонту холодильников существуют две службы: ремонт холодильников на дому и ремонт холодильников в ателье. Заявки на ремонт поступают в мастерскую в среднем каждые 30 минут. Около 30% из них требуют ремонта холодильника в мастерской, на обслуживание такой заявки в среднем затрачивается 4,5 часа. Заявки на ремонт на дому выполняются мастером в течение 1.8 часа (включая дорогу), причем после этого выполненными являются около 60% заявок, 30% заявок требуют повторного прихода мастера, а остальные 10% - ремонта холодильника в мастерской.

Вариант 17.

В ателье проката приходят посетители в среднем через каждые 1.5 дня. В данном ателье на прокат можно взять холодильник, стиральную машину или телевизор. Около 60% посетителей приходят взять телевизор, 30% - за холодильником и остальные - за стиральной машинкой. Время проката в среднем равно одному месяцу, причем после этого сдают 80% телевизоров, 90% стиральных машин и половину холодильников. По остальной технике прокат продлевается.

Вариант 18.

В салон красоты посетители приходят в среднем каждые десять минут. В салоне находится три службы: парикмахер, массажист и косметолог. Примерно 30% посетителей направляется к парикмахеру, 35% - к массажисту и 35% - к косметологу. После каждой службы около 30% посетителей покидает салон, а остальные в равной степени направляются к двум другим службам. У парикмахера и массажиста посетитель проводит в среднем 40 минут, у косметолога - 30.

Вариант 19.

На контейнерной станции в отдел оформления документов в среднем каждые полтора часа поступают заявки на отправление/получение контейнера. После соответствующего оформления документов около

40% заявок отправляются на прохождение таможи, а остальные - сразу в транспортный отдел. После таможи все заявки также направляются в транспортный отдел. При этом около половины заявок - на отправку контейнера (сначала требуется машина для перевозки, затем кран для погрузки), половина - на получение контейнера (сначала требуется кран, затем машина). На оформление документов уходит примерно 30 минут, столько же времени работает с клиентом таможня, работа крана занимает в среднем 20 минут, машина требуется в течение 3 часов.

Вариант 20.

В канцелярию предприятия документы поступают по различным каналам: по почте, по факсу, по компьютерной сети, среднее время между поступлениями документов - около 30 минут. Из канцелярии примерно половина документов направляются в бухгалтерию, половина – директору предприятия. В бухгалтерии работают с документами в среднем 40 минут, после чего 60% документов направляется в архив (по ним прекращается работа) а по 40% требуется решение директора, причем после директора документы снова возвращаются на доработку в бухгалтерию. Директор затрачивают на обработку каждого документа в среднем 10 минут, после чего 60% документов направляется в канцелярию (на отсылку, регистрацию и т.д.), а 40% направляются для работы в бухгалтерию, после чего обработанные документы могут быть направлены в архив либо снова к директору (в тех же соотношениях 6:4). В канцелярии на каждый входящий документ затрачивают в среднем по 10 минут.

Вариант 21

К библиотекарю подходят читатели с заявками на книги каждые 2 минуты. В 20% случаях библиотекарь находит книгу в зале и выдает ее читателю. В остальных случаях он отправляет заявку на поиск в книгохранилище. Работник книгохранилища тратит на поиск книги в среднем 3 минуты, причем в 20% случаях он не находит нужную книгу и сообщает об этом библиотекарю (сообщение между библиотекарем и книгохранилищем осуществляется по телефону). В этом случае библиотекарь снова работает с читателем, уточняя книгу, либо заменяя ее другой. Книги, найденные в книгохранилище, доставляются с помощью подъемника в среднем в течение трех минут. Эти книги тоже проходят через библиотекаря. Библиотекарь обслуживает читателя (за один заход) в среднем две минуты.

Вариант 22

В магазине продтовары расположены три отдела и общая касса. Покупатели заходят в магазин каждые 5 минут и направляются в один из отделов со следующими вероятностями: 0.3 – в первый отдел, 0.4 — во второй отдел и 0.3 — в третий отдел. После отдела покупатель направляется в кассу, время обслуживания в которой равно в среднем 2 минуты. После этого половина покупателей покидает магазин, а половина направляется снова в какой-нибудь из отделов (вероятность направления покупателя в один из отделов остается прежней, покупатель может направиться и в тот же отдел, где он только что сделал покупку: забыл что-то еще). Время обслуживания в отделах равно соответственно 4, 3 и 5 минут.

Вариант 23

Ремонтная служба АТС принимает индивидуальные заявки на ремонт от граждан, которые поступают в среднем каждые 2 минуты. 10% заявок не обслуживаются (например, телефон просто отключен из-за неуплаты) и об этом просто сообщается клиенту. Остальные заявки разделяются на те, в которых неполадки можно устранить непосредственно на станции (70%) и на те, которые требуют ремонта на дому (20% от общего числа заявок). Этими работами занимаются разные отделы службы. Ремонт неполадок на станции делятся в среднем около минуты, после чего клиенту сообщается о выполнении заявки. Ремонт телефонов на дому требует около 40 минут (вместе с дорогой), кроме того, может потребоваться повторный приезд мастера (около в 40% случаях).

Вариант 24

В поликлинике работают три специалиста: лор, хирург и терапевт. Больные приходят в поликлинику через каждые 8 минут и сначала направляются в регистратуру. В регистратуре их обслуживают в течение 5 минут, после чего больные направляются к разным врачам со следующими вероятностями: 0.25 — лору, 0.25 — к хирургу и 0.5 — к терапевту. После лора и хирурга все больные покидают поликлинику. После терапевта поликлинику покидают только 40% больных, 20% терапевт направляет снова в регистратуру (надо взять новый талон, либо неправильно оформлена карточка). Остальные больные направляются терапевтом к лору либо к хирургу (в соотношении 65:35 соответственно). Терапевт обслуживает больного в среднем 12 минут, хирург — 15 минут, лор — 10 минут.

2.6 Практическое занятие «Расчет характеристик сети СМО и проверка адекватности модели»

Цель работы

систематизация, закрепление и расширение знаний студента по заданной тематике; исследование работы сети СМО с помощью построения аналитической и вычислительной моделей, получение оценок всех важнейших характеристик сети, проверка адекватности модели.

Рекомендации по подготовке к работе

Проведение аналитических расчетов сети. Для получения сетевых характеристик необходимо сначала рассчитать указанные характеристики по отдельным СМО. Для этого используйте формулы расчетов основных характеристик СМО из учебного пособия данного курса. Обращайте внимание на тип ваших СМО. Во всех вариантах заданий рассматриваются СМО с бесконечными очередями (СМО с ожиданием), но при этом могут встречаться одноканальные и многоканальные СМО. Канальность СМО вы определили на этапе проверки стационарности сети. Помните, что формулы расчетов для одноканальных и для многоканальных СМО различны! Временные характеристики по отдельным СМО определяются по формуле Литтла.

После того, как рассчитаны характеристики по отдельным СМО, можно определить и сетевые характеристики. Обратите внимание! Количественные сетевые характеристики определяются путем обычного сложения соответствующих характеристик по отдельным СМО. При расчете временных показателей необходимо учитывать, сколько раз требования проходят через ту или иную систему (см. раздел учебного пособия «Сети СМО»).

Проверка адекватности. Для проверки адекватности здесь достаточно проверить гипотезу о равенстве средних по некоторым характеристикам (см. раздел учебного пособия «Обоснованность модели»). В данном случае сравнивается расчетное (теоретическое среднее) и модельное (выборочное среднее) значения характеристик. Проверка обязательно должна осуществляться по среднему времени нахождения заявки в сети и по количеству заявок в сети в целом. Кроме этого, по каждой отдельной СМО проверьте равенство характеристик очередей.

Примечание: если масштаб времени Вы выбрали так, что временные характеристики очень малы, то лучше проводить сравнение по среднему количеству заявок в очередях; если же числовые значения среднего времени нахождения заявки в очереди больше среднего коли-

чества заявок в очередях, то лучше проводить сравнение по временным характеристикам.

Для проверки гипотезы о равенстве средних в данной ситуации необходимо получить выборки из соответствующих оценок путем многократного прогона модели. Из полученных выборок определяются значения выборочного среднего и выборочной дисперсии. В качестве известного математического ожидания берется расчетное значение характеристики. Тогда при выборе критерия учитывается: математическое ожидание известно, дисперсия неизвестна.

Для многократного прогона модели можно использовать команду RESET, которая сбрасывает статистику в ноль. Когда интерпретатор обрабатывает эту инструкцию, он устанавливает статистику в нулевое состояние, а затем, как обычно, переходит к следующей команде. Если следующей командой является START, возобновляются моделирование и сбор статистических данных.

Существует несколько элементов статистики, на которые команда RESET не оказывает влияния:

1) «Поток случайных чисел» не устанавливается в исходное состояние. При возобновлении моделирования последовательность случайных чисел продолжается с того места, в котором она оборвалась на предыдущей фазе моделирования;

2) счетчик текущих значений каждого блока устанавливается равным числу транзактов, находящихся в блоке. Счетчики числа входов в блоки устанавливаются в ноль. Что касается последующих значений счетчиков блоков, то далее они интерпретируются как число транзактов, которое входит в блоки в оставшееся время моделирования;

3) таймер абсолютного времени не устанавливается в ноль, а таймер относительного времени устанавливается. Таймер относительного времени измеряет модельное время, прошедшее после последней очистки модели (или от начала моделирования, если очистки не было).

Так, если завершить программу следующими блоками:

```
GENERATE 100000
TERMINATE 1
START 1
RESET
START 1
RESET
START 1
RESET
START 1
RESET
```

START 1
 RESET
 START 1

то в результате прогона модели будут получены шесть стандартных отчетов – по одному на каждый блок START. Каждый отчет размещается в отдельном файле выдачи. Команду RESET удобно использовать при больших (близких к единице) загрузках СМО: в этом случае при моделировании на всех участках, кроме первого, мы получаем статистику на стационарном участке.

Вместо команды RESET можно использовать команду CLEAR, которая переводит всю модель — всю статистику и все объекты — в исходное состояние. Исключением является лишь датчик случайных чисел — он не возвращается к начальному значению. Применение блока CLEAR позволяет осуществить независимые реализации моделируемого случайного процесса.

Возможные причины неадекватности.

Различия между расчетными и экспериментальными данными могут быть вызваны следующими причинами:

- а) неверно построены аналитические расчеты;
- б) аналитические расчеты проведены с большой погрешностью;
- в) неверно построена вычислительная модель;
- г) длительное время выхода на стационарный участок значительно искажает экспериментальные данные.

При проверке причин начните анализ со сравнения загрузок отдельных СМО. Если коэффициенты загрузок СМО, рассчитанные и полученные экспериментально различаются, то причины могут быть следующие:

а) вы неверно рассчитали интенсивности входных потоков на отдельные СМО;

б) вы проводите расчеты с большой погрешностью. Эта причина особенно ярко проявляется при больших загрузках отдельных СМО: значения отдельных вероятностей в этом случае очень малы, и любая погрешность вычислений существенно влияет на дальнейшие расчеты;

б) переходы транзактов в модели на языке GPSS не соответствуют переходам заявок между СМО по графу передач;

в) возможно, в модели на GPSS у вас не соблюдается единый масштаб времени.

При моделировании статистических переходов помните: если при выходе из какой-либо СМО (либо при поступлении заявок из Источника) поток заявок разбивается более, чем на два, необходимо внимательно

но рассматривать вероятности статистических переходов в модели. В этом случае, если вы используете несколько блоков статистического перехода TRANSFER, для всех блоков, кроме первого, необходимо пересчитывать вероятности переходов с учетом того, что часть заявок уже была перенаправлена к другому блоку.

Чтобы упростить моделирование такой ситуации, можно построить дискретную функцию типа D, значением которой будут имена блоков, к которым должны направляться потоки заявок. Такая функция строится по принципу моделирования группы событий. Например, если необходимо разбить исходный поток заявок на три с вероятностями 0.2, 0.45 и 0.35, то при использовании нескольких блоков статистических переходов получим:

```
TRANSFER .2,,BLK1
TRANSFER .5625,,BLK2
TRANSFER .,BLK3
```

Вместо использования указанных блоков можно построить следующую функцию:

```
PEREX FUNCTION RN1,D3
.2,BLK1/.65,BLK2/1,BLK3
```

а затем обращаться к функции в блоке безусловного перехода:

```
TRANSFER ,FN$PEREX
```

Если коэффициенты загрузок отдельных СМО совпадают с расчетными, то проверьте равенство средних характеристик по очередям отдельных СМО. Здесь причины различий могут быть следующими:

- а) при построении модели на GPSS вы не учли, что все СМО — Марковские;
- б) время моделирования мало, и модель не успевает выйти на стационарный участок.

Порядок проведения работы

1. Вариант задания берется из предыдущей лабораторной работы.
2. Провести аналитические расчеты сети, получить следующие основные характеристики:
 - Среднее время нахождения заявки в каждой СМО и в сети в целом;
 - Среднее количество заявок в каждой СМО и в сети в целом;
 - Среднее количество заявок в очередях по каждой СМО и по сети;
 - Среднее время нахождения заявки в очередях по каждой СМО и по сети.

3. Проверить адекватность построенной вычислительной модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных из модели, построенной в предыдущей лабораторной работе.
4. Если модель неадекватна, проанализировать возможные причины, добиться адекватности.

3 Методические указания для организации самостоятельной работы

3.1 Общие положения

Цель самостоятельной работы по дисциплине – проработка лекционного материала, самостоятельное изучение некоторых разделов курса, подготовка к лабораторным работам, тестам и контрольной работе.

Самостоятельная работа студента по дисциплине «Моделирование систем» включает следующие виды его активности:

1. проработка лекционного материала;
2. изучение тем теоретической части дисциплины, вынесенных для самостоятельной проработки;
3. подготовка к практическим занятиям;
4. подготовка к контрольной работе;
5. подготовка к экзамену.

3.2 Проработка лекционного материала

При проработке лекционного материала необходимо:

а) отработать прослушанную лекцию (прочитать конспект, прочитать учебное пособие и сопоставить записи с конспектом, просмотреть слайды) и восполнить пробелы, если они имелись (например, если вы что-то не поняли или не успели записать);

б) перед каждой последующей лекцией прочитать предыдущую, дабы не тратилось много времени на восстановление контекста изучения дисциплины при продолжающейся теме.

Данный вид деятельности ориентирован как на закрепление материала, так и на подготовку к тестовым заданиям и контрольным работам.

Содержание лекций:

Методологические основы моделирования

В данном разделе рассматриваются основные понятия моделирования, определения и классификации.

Моделирование является одним из направлений научных исследований и тесно связано с другими направлениями (экспериментальными

и теоретическими исследованиями). В свою очередь, модель является основным понятием моделирования. При рассмотрении функций моделей необходимо помнить, что одна и та же модель может выполнять одновременно несколько функций. Качество модели напрямую зависит от целей и задач моделирования, а также от имеющихся в наличии ресурсов.

В связи с тем, что не существует единой классификации моделей, рассматриваются только некоторые типовые группы моделей, которые могут быть положены в основу системы классификации. При изучении данного раздела желательно самостоятельно попытаться проклассифицировать любые известные модели по различным группам, либо придумать примеры моделей для различных систем классификаций. Обратит внимание на то, что при выборе и построении модели необходимо изучить как предметную область (функционирование системы), так и существующие виды моделей.

При рассмотрении этапов машинного моделирования необходимо помнить, что разбиение процесса моделирования на этапы является достаточно условным: некоторые этапы настолько тесно связаны между собой, что порядок их следования может изменяться в процессе исследований. Так, формулирование модели и подготовка данных – это два этапа, связанных между собой, и при их выполнении возможен неоднократный переход/возврат с одного этапа на другой. Также тесно взаимосвязаны этапы стратегического и тактического планирования: некоторые вопросы стратегического планирования не могут быть решены без этапа тактического, и наоборот. Кроме этого, с любого этапа моделирования при необходимости (в результате возникших вопросов и отрицательных выводов) возможен возврат практически к любому предыдущему этапу.

Организация статистического моделирования систем на ЭВМ

В данном разделе рассматривается метод статистического моделирования (МСМ) стохастических систем, а также различные методы генерации случайных воздействий.

В основе данного метода лежит идея построения моделирующего алгоритма с использованием метода Монте-Карло. базовой последовательностью МСМ является последовательность случайных чисел с равномерным законом распределения на интервале $[0,1]$. На основе данной последовательности моделируются случайные события, группы случайных событий и последовательности случайных чисел с различными законами распределения. В качестве выходных характеристик построенного алгоритма всегда выступают *оценки* различных параметров ис-

следуемой системы. Именно поэтому необходимо помнить, что при построении алгоритма моделируемая ситуация должна повторяться *многokrатно* с дальнейшим усреднением результатов.

Так как при статистическом моделировании базовой последовательностью случайных чисел является последовательность с равномерным законом распределения на интервале $[0,1]$, то отдельное внимание уделено генерации квазиравномерных случайных чисел. Также рассматриваются различные методы проверок генераторов случайных чисел. В настоящее время наибольшее распространение получил алгоритмический способ генерации случайных чисел в связи с ростом быстродействия современных компьютеров, что существенно снижает основной недостаток данного способа (существенные затраты машинного времени). Поэтому все рассматриваемые методы генерации относятся к алгоритмическим.

Существует целый ряд методов генерации последовательностей случайных чисел с различными законами распределения. У каждого метода есть свои достоинства и недостатки. При изучении этих методов всегда обращайте внимание на следующие моменты: суть метода, преимущества метода по сравнению с другими, недостатки метода по сравнению с другими методами, а также на универсальность метода. Помните, что единственным точным методом является метод нелинейных преобразований, все остальные методы генерации являются приближенными. Для приближенных методов попытайтесь ответить на вопрос: каким образом можно повысить точность метода.

Внимание: сложность построения генератора не является существенным недостатком метода генерации. Намного важнее количество вычислений, необходимых для генерации одного случайного числа: этот фактор значительно влияет на быстродействие генератора.

В основе метода кусочной аппроксимации лежит идея разбиения интервала возможных значений моделируемой случайной величины на подинтервалы с дальнейшей аппроксимацией на каждом подинтервале заданного закона распределения равномерным законом. Разбиение производится таким образом, чтобы вероятность попадания случайной величины в каждый подинтервал была одинаковой. Это делается только для удобства генерации и не является обязательной составляющей метода!

Перед тем, как строить генератор случайных чисел, необходимо сначала ответить на вопрос: какому закону распределения подчиняется моделируемое воздействие? Идентификация закона распределения проводится в несколько этапов: построение гистограммы и выдвижение гипотезы о виде закона распределения; определение оценок параметров

распределения по рассматриваемой последовательности случайных чисел; проверка гипотезы с помощью выбранного статистического критерия. При выборе критерия согласия в первую очередь обращайтесь внимание на объем выборки исследуемой последовательности.

Программные средства моделирования систем

Существует большое количество различных языков моделирования. Все эти языки являются предметно ориентированными, причем каждый из них предназначен для моделирования определенного класса систем. При разработке моделей систем возникает целый ряд специфических трудностей, поэтому в языках имитационного моделирования предусмотрен набор специфических программных средств и понятий, которые дают преимущество этим языкам по сравнению с языками общего назначения.

В качестве наиболее яркого их представителя выбран язык моделирования GPSS. Этот язык нашел широкое распространение при исследовании систем массового обслуживания и включен во многие учебные курсы различных высших учебных заведений, как в нашей стране, так и за рубежом.

В основе языка GPSS лежит понятие транзакта: объекта, который может путешествовать по системе, встречая на своем пути различные задержки.

Внимание! Помните, что язык GPSS является предметно-ориентированным, поэтому всегда вкладывайте физический смысл в понятие транзакта в терминах рассматриваемой задачи. Аналогично, как только в модели вы вводите новое устройство или память (объекты языка, имитирующие единицу оборудования), также всегда необходимо представлять, что вы под этим понимаете в терминах задачи. Так, в качестве устройства или памяти может выступать продавец, кассир, рабочий, койка, но никак не процесс «лежать в больнице». Транзакты, генерируемые разными блоками в одной модели, могут иметь различный содержательный смысл. Например, транзакты, генерируемые одним блоком, могут представлять детали, обрабатываемые на конвейере. Транзакты, генерируемые другим блоком могут представлять рабочих, которые обслуживают данный конвейер и обрабатывают детали.

В различных блоках языка используются параметры, характеризующие интервалы времени. Помните, что с точки зрения языка единица времени абстрактна и не имеет физического смысла. Что понимается под единицей времени в модели, знает только исследователь, который эту модель строит. По условию задачи различные временные характеристики могут быть определены в разных масштабах (секунды, минуты,

часы и т.д.). Приводите в модели все временные характеристики к единому масштабу, иначе модель будет функционировать неверно.

Внимание! Помните, что все блоки генерации в модели работают одновременно и независимо друг от друга. Поэтому, если в модели содержится несколько блоков генерации транзактов, то отдельные сегменты программы (начинающиеся с блока генерации и заканчивающиеся блоком уничтожения транзактов) могут располагаться в любой последовательности. При перестановке таких сегментов ничего не меняется! Например, таймер в примерах всегда расположен в конце программы. Это определяется просто стилем программирования, но никак не необходимостью. Если таймер поставить в начало программы, модель будет работать точно так же: генераторы транзактов работают параллельно.

Транзакты также перемещаются по модели независимо друг от друга. По умолчанию каждый транзакт после генерации перемещается последовательно от блока к блоку до тех пор, пока не встретит занятое устройство/память или явную задержку. Перемещение одних транзактов не зависит от перемещения других.

При использовании блоков работы со статистическими очередями помните, что работа данных блоков никак не отражается на физическую организацию очередей транзактов и на перемещение или задержку транзактов в модели. Статистические очереди предназначены только для сбора статистики на определенном участке. Поэтому, если блоки работы с очередями расставлены некорректно, статистика по очереди может получить какой угодно, вплоть до отрицательных значений (если транзакты чаще покидают очередь, чем встают в нее).

При работе с устройством помните, что освобождать устройство должен тот же транзакт, который и занимал это устройство. В противном случае будет выдана ошибка моделирования. В отличие от устройства, при работе с памятью, освобождать память могут любые транзакты: как те, которые занимали данную память, так и те, которые эту память не занимали.

Внимание! В модели должен быть хотя бы один блок `TERMINATE` с заданным параметром `A`. В противном случае будет выдана ошибка, так как симулятор языка не будет знать, когда прекращать моделирование.

Теория массового обслуживания

В данном разделе рассматриваются некоторые вопросы теории массового обслуживания: общие сведения, классификация моделей МО, задачи теории МО.

Любое построение модели системы массового обслуживания (СМО) начинается с исследования потоков событий, проходящих через систему: входного потока, потока событий, поступающих из очереди на обслуживание, выходного потока. Поэтому до рассмотрения различных моделей СМО необходимо изучить существующие модели потоков событий и их свойства. Центральным в теории потоков является простейший или Пуассоновский поток. Простейший поток событий характеризуется двумя законами распределения (для разных характеристик потока). Время между появлением событий распределено по экспоненциальному закону, а вероятность появления количества событий в промежутке времени характеризуется Пуассоновским законом распределения. Простейший поток среди прочих обладает свойством стационарности, поэтому интенсивность данного потока является детерминированной величиной и не зависит от времени.

Самыми простыми для исследования и построения аналитических моделей являются Марковские СМО, поэтому в данном разделе курса мы будем рассматривать только данный класс СМО. Помните, что для того, чтобы СМО была Марковской, должны выполняться два условия: во-первых, на вход системы должен поступать простейший поток; во-вторых, время обслуживания должно подчиняться экспоненциальному закону распределения.

Процесс построения аналитической модели СМО заключается в следующем: сначала строится матрица переходов, элементами которой являются вероятности переходов из одного состояния системы в другое. По матрице переходов строится система дифференцированных уравнений вероятностей состояний системы, которые называются уравнениями Колмогорова. Уравнения Колмогорова можно построить более простым образом: для этого строится граф переходов, на котором указываются только состояния системы и интенсивности переходов из одного состояния в другое. Существует правило построения уравнений Колмогорова по графу переходов.

Если рассматривать работу системы только в установившемся режиме, то для этого режима все дифференцированные уравнения превращаются в линейные (вероятности становятся константами и не зависят от времени). Решая систему линейных уравнений можно вывести формулы вероятностей состояний системы. Из вероятностей состояний системы можно получить формулы для любых количественных характеристик. Для характеристики СМО используются следующие показатели: среднее количество заявок в системе, средняя длина очереди, среднее количество занятых каналов обслуживания, вероятность отказа,

относительная пропускная способность, абсолютная пропускная способность.

Для получения временных характеристик исследуемой системы используется формула Литтла, которая работает для любой СМО (среднее время нахождения заявки в системе и среднее время нахождения заявки в очереди). *Внимание!* При определении временных характеристик для замкнутой СМО помните, что в знаменателе формулы Литтла стоит интенсивность входного потока. Соответственно, для замкнутой СМО, у которой интенсивность входного потока меняется и зависит от количества заявок, находящихся в СМО, в знаменателе формулы Литтла должна стоять *средняя* интенсивность входного потока.

Внимание! Все выводимые формулы действительны только для систем в установившемся режиме. Если исследуемая СМО не имеет установившегося режима, то пользоваться полученными формулами нельзя!. В этом случае необходимо решать систему дифференцированных уравнений и получать средние характеристики как функции времени. Проверку на стационарность (существование установившегося режима) необходимо проводить только для СМО с неограниченной очередью (без отказов). Для любой СМО, в которой очередь ограничена по каким-либо показателям (соответственно, не может расти до бесконечности), установившейся режим существует всегда.

При исследовании сети СМО прежде всего необходимо рассчитать интенсивности входных потоков на каждую СМО в отдельности. Для этого строится граф передач, по которому записывается матрица передач. По построенной матрице записывается систем линейных уравнений, решая которую можно получить интенсивности входных потоков для отдельных СМО.

Внимание! При построении графа передач и соответствующей ему матрицы передач внимательно следите за правильностью построения. Для самопроверки: из любой СМО *все* заявки должны уходить. Для выполнения этого условия на графе сумма вероятностей, соответствующих дугам, выходящим из данного состояния, должна равняться единице. Соответственно, в матрице передач, сумма вероятностей по любой строке должна равняться единице. Заявки поступают в сеть из источника, и покидают сеть в источник.

Планирование машинных экспериментов

Рассмотрите основные понятия планирования эксперимента: отклик, фактор, уровень, поверхность отклика. Обратите внимание на функцию отклика: в каких случаях необходимо строить планы первого или второго порядка. Рассмотрите, какое количество опытов необходимо для проведения полного факторного эксперимента.

Полный факторный эксперимент является избыточным. определите причины этого. В планах первого порядка для уменьшения избыточности используется дробный факторный эксперимент. Изучите принципы его построения. Ответьте на вопрос, почему дробный факторный эксперимент сохраняет все свойства полного, какими эффектами взаимодействия лучше заменять линейные эффекты в первую очередь, как определяется дробность плана. При построении полного факторного эксперимента с большим числом факторов лучше применять метод чередований. При произвольном построении плана можно продублировать некоторые опыты, пропустив при этом другие. обратите внимание, почему так важны свойства ротатабельности и ортогональности.

В планах второго порядка обратите внимание на необходимое количество опытов, каким образом можно достроить план первого порядка до плана второго порядка, что такое звездное плечо.

При изучении методов поиска оптимальной области обратите внимание на их достоинства и недостатки, проведите сравнительный анализ этих методов.

При изучении вопросов стратегического планирования особое внимание уделите ограниченности ресурсов проведения эксперимента. Исследуйте, какие параметры функциональной модели можно изменять с тем, чтобы укладываться в заданные ограничения. Необходимо помнить, что один из параметров функциональной модели (количество повторений эксперимента) определяется на этапе тактического планирования. Именно поэтому этапы стратегического и тактического планирования тесно взаимосвязаны между собой и могут проходить в несколько итераций.

3.3 Самостоятельное изучение тем теоретической части курса

3.3.1 Проверка качества генераторов последовательностей случайных чисел

Так как при статистическом моделировании базовой последовательностью случайных чисел является последовательность с равномерным законом распределения на интервале $[0,1]$, то отдельное внимание уделено генерации квазиравномерных случайных чисел. Также рассматриваются различные методы проверок генераторов случайных чисел. В настоящее время наибольшее распространение получил алгоритмический способ генерации случайных чисел в связи с ростом быстродействия современных компьютеров, что существенно снижает основ-

ной недостаток данного способа (существенные затраты машинного времени). Поэтому все рассматриваемые методы генерации относятся к алгоритмическим.

Необходимо помнить, что любая последовательность случайных чисел, полученная путем машинной генерации, на самом деле является псевдослучайной. Это связано прежде всего с конечным числом разрядов любого числа в машинном представлении: генерируемая последовательность является дискретной. Другая причина псевдослучайности генерируемых последовательностей является алгоритмический (а следовательно детерминированный) способ генерации. Тем не менее, при использовании качественных генераторов случайных чисел, можно получать последовательности, близкие по своим свойствам к теоретическим.

В учебном пособии [1] рассмотрены различные методы проверки качества генераторов квазиравномерных последовательностей случайных чисел. В сущности, эти же методы могут быть использованы для проверки генераторов случайных чисел и с другими законами распределения. Единственно, проверка равномерности должна быть в этом случае заменена на проверку соответствующего закона распределения. При проверке качества генераторов особое внимание необходимо уделять длине отрезка апериодичности. Для улучшения этой характеристики существуют отдельные методы.

3.3.2 Системное время. Управляющие блоки GPSS

В различных блоках языка используются параметры, характеризующие интервалы времени. Помните, что с точки зрения языка единица времени абстрактна и не имеет физического смысла. Что понимается под единицей времени в модели, знает только исследователь, который эту модель строит. По условию задачи различные временные характеристики могут быть определены в разных масштабах (секунды, минуты, часы и т.д.). Приводите в модели все временные характеристики к единому масштабу, иначе модель будет функционировать неверно.

Внимание! Помните, что все блоки генерации в модели работают одновременно и независимо друг от друга. Поэтому, если в модели содержится несколько блоков генерации транзактов, то отдельные сегменты программы (начинающиеся с блока генерации и заканчивающиеся блоком уничтожения транзактов) могут располагаться в любой последовательности. При перестановке таких сегментов ничего не меняется! Например, таймер в примерах всегда расположен в конце програм-

мы. Это определяется просто стилем программирования, но никак не необходимостью. Если таймер поставить в начало программы, модель будет работать точно так же: генераторы транзактов работают параллельно.

Транзакты также перемещаются по модели независимо друг от друга. По умолчанию каждый транзакт после генерации перемещается последовательно от блока к блоку до тех пор, пока не встретит занятое устройство/память или явную задержку. Перемещение одних транзактов не зависит от перемещения других.

СЧА, связанные с системным временем, используются для проверки временных соотношений пребывания транзактов в системе.

В СЧА C1 и AC1 хранится текущее значение системного времени. СЧА C1 содержит значение относительного системного времени (с момента последнего блока RESET). СЧА AC1 содержит значение абсолютного системного времени (с момента последнего блока CLEAR). Данные СЧА доступны пользователю в любой точке программы.

Каждый транзакт при генерации снабжается отметкой времени. Время пребывания транзакта в модели содержится в СЧА M1 или MP и отсчитывается от момента рождения:

$$M1 = AC1 - \langle \text{дата рождения} \rangle.$$

Блок START воспринимается как команда симулятору начать выполнение прочитанной части модели.

Блок RESET предназначается для стирания в заданный момент времени статистики о предыстории процесса. Достигнутое состояние объектов при этом сохраняется.

Применение блока RESET позволяет уменьшить затраты машинного времени на сбор статистики о стационарном (в смысле вероятностных характеристик) процессе в тех случаях, когда предшествующий ему переходный процесс вносит заметные искажения в накапливаемую статистику.

Блок CLEAR переводит всю модель — всю статистику и все объекты — в исходное состояние. Исключением является лишь датчик случайных чисел — он не возвращается к начальному значению. Применение блока CLEAR позволяет осуществить независимые реализации моделируемого случайного процесса.

3.3.3 Обоснование модели и анализ результатов моделирования

Задачу обоснованности модели решают в несколько этапов, которые включают в себя как общий сравнительный анализ модели и исследуемой системы, так и целый ряд статистических испытаний, используемых для проверки различных гипотез.

При проверке адекватности модели сравнивают дисперсию адекватности и выборочную дисперсию по критерию Фишера. Если построена линейная модель, то обязательно необходима проверка на линейность, которая проводится путем сравнения свободного коэффициента регрессии и значения отклика в центре эксперимента.

При проверке значимости коэффициентов необходимо помнить, что здесь расчетный коэффициент должен быть больше табличного значения, а не наоборот.

4 Рекомендуемая литература

1. Салмина, Н. Ю. Имитационное моделирование: Учебное пособие [Электронный ресурс] / Салмина Н. Ю. — Томск: ТУСУР, 2015. — 118 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5200>.
2. Салмина, Н. Ю. Моделирование систем: Учебное пособие (Часть 1) [Электронный ресурс] / Н. Ю. Салмина. — Томск: ТУСУР, 2013. — 118 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5198>
3. Салмина, Н. Ю. Моделирование систем: Учебное пособие (часть 2) [Электронный ресурс] / Н. Ю. Салмина. — Томск: ТУСУР, 2013. — 114 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5199>