



- детальный анализ и подробное описание выявленных свойств исследуемой системы с обоснованием использования одной из разработанных моделей;
- постановка и решение задачи проектирования или модернизации системы с заданными свойствами (удовлетворяющей заданным ограничениям на характеристики функционирования);
- детальный анализ спроектированной или модернизированной системы.

## 2. Содержание работы

Выбор объекта исследования (системы), детальное описание алгоритма функционирования системы в форме концептуальной модели. Разработка и параметризация *имитационных и аналитических моделей* исследуемой системы и проведение на их основе экспериментов с целью исследования характеристик функционирования и выявления свойств системы с использованием замкнутых и разомкнутых СеМО или одноканальных и многоканальных СМО с неоднородным потоком заявок.

В процессе исследований могут использоваться следующие программные средства:

- GPSS World – система имитационного моделирования;
- AnyLogic – система имитационного моделирования;
- ITMOdel – аналитический расчет моделей массового обслуживания.

## 3. Этапы работы

Комплексная учебно-исследовательская работа выполняется в четыре этапа, каждый из которых содержит несколько подэтапов.

### Этап 1. Выбор объекта исследования и разработка концептуальной модели

#### 1.1. Выбор и описание объекта исследования

В качестве объекта исследования выбирается любая дискретная система со стохастическим характером функционирования. Примерами таких систем могут служить всевозможные системы обслуживания клиентов: вычислительные системы и сети, магазины, банки, аэропорты, ателье, автомастерские, агентства, парикмахерские, бензозаправочные станции и т.п. Необходимо самостоятельно выбрать и предложить любую реальную или гипотетическую систему обслуживания, которая с использованием предположений и допущений может быть представлена в виде СеМО, содержащей не менее трёх узлов, или в виде одно- или многоканальной СМО, в которую поступают не менее трех классов заявок, обслуживаемых в соответствии с заданными дисциплинами.

Предложенная система должна быть наглядно представлена в виде рисунка или схемы и достаточно подробно описана в терминах той прикладной области, к которой она относится. Для неё должен быть определен состав исходных параметров (системных параметров) и заданы их значения или допустимая область изменения этих значений.

#### 1.2. Разработка концептуальной модели

Основное назначение концептуальной модели – выявление наиболее существенных аспектов структурно-функциональной организации системы, учет которых необходим для получения требуемых результатов. В концептуальной модели в словесной форме приводятся сведения о природе и параметрах элементарных явлений исследуемой системы, о виде и степени взаимодействия между ними, о месте и значении каждого элементарного явления в процессе функционирования системы.

*Этапы построения концептуальной модели:*

- принятие предположений и допущений;
- определение исходных параметров и их описание;

- выявление особенностей нагрузки и структурно-функциональной организации системы, влияющих на временные аспекты работы системы.

## Этап 2. Разработка моделей

### 2.1. Разработка имитационной модели

Результатом разработки являются *детальные* имитационные GPSS и AnyLogic модели исследуемой системы, учитывающие наиболее существенные особенности нагрузки и структурно-функциональной организации системы. Например, такие как неоднородность нагрузки, законы распределения нагрузочных параметров отличные от экспоненциальных, блокировки обслуживающих приборов, дисциплины буферизации и т.п.

Имитационные GPSS и AnyLogic модели должны сопровождаться подробными комментариями, достаточными для их понимания.

### 2.2. Разработка аналитической модели исследуемой системы

Сформулировать предположения и допущения о структурно-функциональных и нагрузочных параметрах исследуемой системы, позволяющие построить модель, поддающуюся исследованию аналитическими методами с использованием программы ITMOdel.

В качестве модели исследуемой системы, для которой существуют аналитические методы расчёта характеристик, может использоваться:

- однородная экспоненциальная замкнутая сеть массового обслуживания (ЗСеМО);
- однородная экспоненциальная разомкнутая сеть массового обслуживания (РСеМО);
- система массового обслуживания (СМО) с неоднородным потоком заявок.

Разработка аналитической модели предполагает введение ряда упрощающих предположений и допущений, позволяющих выполнить расчёт характеристик модели с использованием известных аналитических методов расчёта однородных экспоненциальных СеМО и неоднородных СМО.

Затем необходимо выполнить параметризацию аналитической модели (ЗСеМО, РСеМО, СМО), заключающуюся в подготовке исходных данных для модели (модельных параметров) путем пересчёта известных параметров исследуемой системы (системных параметров).

Для моделей, представленных в виде ЗСеМО и РСеМО, должны быть определены следующие параметры:

- количество узлов СеМО  $n$ ;
- количество обслуживающих приборов в узлах СеМО  $K_1, \dots, K_n$ ;
- матрица вероятностей передач  $P = p_{ij}, i, j = 1, \dots, n$  или коэффициенты передач  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ ;
- для *замкнутой* СеМО – число заявок  $M$ , циркулирующих в сети;  
для *разомкнутой* СеМО – интенсивность  $\lambda_i$  входящего потока заявок, поступающих в сеть;
- средние длительности обслуживания заявок в узлах СеМО  $b_1, \dots, b_n$ .

Для моделей, представленных в виде СМО с неоднородным потоком заявок, необходимо определить следующие параметры:

- количество обслуживающих приборов  $N$ ;
- количество классов заявок  $H > 1$ ;
- интенсивности  $\lambda_1, \dots, \lambda_H$  входящих потоков заявок классов  $1, \dots, H$ , которые предполагаются простейшими;

- средние значения  $b_1, \dots, b_H$  и коэффициенты вариации  $v_{.1}, \dots, v_{.H}$  длительностей обслуживания заявок классов  $1, \dots, H$ ;
- дисциплина обслуживания заявок: без приоритетов (ДО БП), с относительными приоритетами (ДО ОП) или с абсолютными приоритетами (ДО АП).

### Этап 3. Проведение экспериментов на моделях

#### 2.1. Проведение имитационных экспериментов на моделях GPSS и AnyLogic

Для детальных имитационных моделей GPSS и AnyLogic исследуемой системы определить длительность имитационного эксперимента, изменяя количество заявок (транзактов), проходящих через имитационную модель, которая обеспечивает приемлемые точность результатов (в пределах 1-3%) и затраты машинного времени на проведение эксперимента.

Рекомендуется провести 3 - 5 экспериментов, пропуская через модели от 1000 до 1000000 транзактов.

Оценить влияние нагрузочных параметров на характеристики системы. Рекомендуется проводить исследования в диапазоне загрузок от 0,2 до 0,8 при различных предположениях о законах распределения временных параметров.

Результаты представить в табличной и графической форме.

Провести сравнение результатов, полученных на имитационных моделях GPSS и AnyLogic.

#### 2.2. Расчет характеристик обслуживания заявок и изучение свойств СеМО или СМО с неоднородным потоком заявок на аналитических моделях с использованием программы ITMOdel

##### *Программа исследований СеМО*

1) Выполнить расчет точных значений характеристик функционирования экспоненциальной ЗСеМО.

Результаты представляются в табличном виде (форма 1).

2) Изменяя число заявок в сети, определить критическое число заявок, начиная с которого производительность ЗСеМО не изменяется с заданной точностью (прирост производительности не превосходит 1-5%).

3) Проанализировать сетевые характеристики функционирования ЗСеМО при изменении числа заявок в сети.

Результаты представляются в табличном виде (форма 2).

4) Определить "узкое место" (наиболее загруженный узел) сети и устранить его путем изменения в этом узле:

- длительности обслуживания заявок;
- количества обслуживающих приборов.

5) Определить, как изменились сетевые характеристики ЗСеМО (критическое число заявок в сети, производительность сети, время пребывания заявок в сети) при устранении "узкого места".

Результаты представляются в табличном виде (форма 2).

6) Выполнить расчет точных значений характеристик функционирования экспоненциальной РСеМО и сравнить результаты с ЗСеМО.

Результаты представляются в табличном виде (форма 1).

7) Определить предельную интенсивность поступления заявок в РСеМО, при которой в сети существует стационарный режим.

8) Проанализировать сетевые характеристики функционирования РСеМО при изменении интенсивности входящего потока заявок от значения, при котором загрузка "узкого места" составляет 0,2 - 0,3, до значения, при котором его загрузка составляет 0,9 - 0,95.

Результаты представляются в табличном виде (форма 2).

*Примечание.* Исследования целесообразно начинать с изначально построенной модели системы ЗСеМО или РСеМО, затем, выполнив толерантное преобразование ЗСеМО в РСеМО или наоборот, продолжить исследование сетевых моделей.

#### **Программа исследований СМО с неоднородным потоком заявок**

1) Выполнить расчет точных значений характеристик функционирования СМО с неоднородным потоком заявок для каждого класса заявок и объединенного потока при дисциплинах обслуживания без приоритетов (ДО БП), с относительными (ДО ОП) и абсолютными (ДО АП) приоритетами.

Результаты представляются в табличном виде (форма 3 и форма 4).

*Примечание.* Назначение приоритетов (их старшинства) следует выполнять исходя из особенностей функционирования исследуемой системы.

2) Провести исследования характеристик СМО для ДО БП, ДО ОП и ДО АП от суммарной загрузки, изменяя пропорционально длительности обслуживания заявок всех классов, таким образом, чтобы обеспечить изменение суммарной загрузки системы в пределах от 0,2-0,3 до 0,9-0,95.

3) По полученным результатам построить графики зависимостей характеристик обслуживания разных классов от приоритета и от суммарной загрузки системы для ДО БП, ДО ОП и ДО АП. Сделать выводы о влиянии приоритетов и суммарной загрузки системы на характеристики обслуживания заявок, а также установить, для каких классов заявок существует защита от перегрузок.

#### **Этап 4. Обработка и анализ результатов моделирования**

В процессе выполнения модельных экспериментов все полученные результаты рекомендуется заносить в таблицы, формы которых представлены ниже. Для представления результатов имитационного моделирования исследуемой системы самостоятельно составляется таблица, включающая ее основные вероятностно-временные характеристики.

Обработка полученных результатов заключается в их представлении в форме сводных таблиц и/или графических зависимостей, позволяющих выполнить детальный анализ свойств исследуемой системы.

В процессе анализа свойств системы должны быть выявлены наиболее существенные особенности исследуемой системы, сформулированы выводы о зависимостях характеристик функционирования системы от значений параметров. Примерный перечень вопросов, подлежащих проработке и рекомендуемая последовательность их изложения, приведена ниже.

1) По результатам **имитационного моделирования** должны быть представлены:

- а) результаты в табличной и графической формах;
- б) выводы по полученным результатам, включающие в себя, кроме констатации очевидных фактов (типа "характеристика увеличивается" или "характеристика уменьшается"), объяснение характера полученной зависимости.

В качестве основных результатов имитационного моделирования должны быть представлены.

а) Оценка точности результатов имитационного моделирования по отношению к результатам аналитического моделирования, рассматриваемых в качестве эталонных для упрощенных моделей. При этом необходимо ответить на следующие вопросы:

- Какова длительность переходного режима работы СеМО или СМО и от чего она зависит?
- Какова погрешность имитационного моделирования?
- Для каких характеристик погрешности имитационного моделирования имеют минимальные и максимальные значения, и чем это можно объяснить?

б) Оценка влияния коэффициентов вариации (КВ) длительностей обслуживания и интервалов между поступающими заявками на характеристики функционирования СеМО или СМО. При этом необходимо ответить на следующие вопросы:

- Каким законом (Эрланга, экспоненциальным, гиперэкспоненциальным) можно аппроксимировать распределения следующих *характеристик* функционирования СеМО или СМО:
  - времени пребывания и ожидания заявок в сети и в узлах СеМО или в СМО,
  - интервалов между заявками, выходящими из РСеМО или СМО?
- Как влияют КВ длительностей обслуживания и интервалов между поступающими в разомкнутую СеМО или СМО заявками на средние значения и КВ характеристик СеМО или СМО (загрузку узлов или СМО, времена ожидания и пребывания и т.д.)?
- В случае использования сетевых моделей определить, одинаково ли ведут себя характеристики ЗСеМО и РСеМО при изменении КВ длительностей обслуживания заявок?
- В случае использования СМО-моделей определить, одинаково ли влияет на характеристики СМО изменение КВ длительностей обслуживания заявок и КВ интервалов между заявками во входных потоках?

2) По результатам *аналитического моделирования* должны быть представлены:

а) таблицы результатов;

б) графики зависимостей характеристик СеМО от числа циркулирующих в ЗСеМО заявок и от интенсивности поступления заявок в РСеМО или графики зависимостей характеристик СМО от приоритета и от суммарной загрузки системы для ДО БП, ДО ОП и ДО АП;

в) выводы по полученным результатам, включающие в себя, кроме констатации очевидных фактов (типа "характеристика увеличивается" или "характеристика уменьшается"), объяснение характера полученной зависимости; при этом следует ответить на следующие вопросы.

*Сетевые модели (ЗСеМО и РСеМО)*

- Чему равно критическое число заявок в ЗСеМО и почему при достижении критического числа заявок в ЗСеМО не меняется производительность ЗСеМО?
- Чем определяется предельная производительность (пропускная способность) ЗСеМО? Как ее можно определить, не прибегая к подробным расчетам?
- Как изменяется время пребывания заявок в ЗСеМО? Почему эта зависимость имеет именно такой характер?
- Чему равны производительность и пропускная способность РСеМО?
- Как и почему именно так ведет себя зависимость времени пребывания заявок в РСеМО от интенсивности источника? В чем отличие этой зависимости от аналогичной для ЗСеМО при изменении числа заявок в ЗСеМО?

*СМО с неоднородным потоком заявок*

- Чем отличается влияние на характеристики обслуживания СМО ДО БП, ДО ОП, и ДО АП?
- Пояснить понятие режима перегрузок и определить, при каких дисциплинах обслуживания и заявки каких классов защищены от перегрузок?
- Продемонстрировать выполнение закона сохранения времени ожидания при изменении дисциплин обслуживания и вычислить значение константы.

Ответы на все сформулированные выше вопросы не должны быть простой констатацией фактов (типа «лучше», «больше», «одинаково» и т.п.), а должны сопровождаться подробными пояснениями и обоснованиями.

**УКАЗАНИЕ:** при выборе объема представляемых в отчете результатов (числа таблиц, графиков и зависимостей на одном графике) следует руководствоваться следующими соображениями:

- 1) для каждой модели результаты должны быть представлены
  - в случае использования СМО-моделей как минимум для 2-х характеристик обслуживания классов заявок и 2-х характеристик объединенного потока;
  - в случае использования сетевых моделей как минимум для 2-х сетевых и 2-х узловых характеристик СеМО, при этом следует иметь в виду, что основной *сетевой* характеристикой для ЗСеМО является производительность сети, а для РСемо - время пребывания заявок в сети;
- 2) на одном графике не следует изображать только одну зависимость, а рекомендуется представлять не менее 2-х зависимостей (например, времени ожидания и времени пребывания), позволяющих выполнить их сравнительный анализ;
- 3) несмотря на то, что в отчете графические зависимости могут быть представлены не для всех характеристик, следует четко представлять и при необходимости объяснить их характер и поведение при изменении соответствующего параметра.

#### **Этап 5. Проектирование или модернизация системы с заданными свойствами**

На основании анализа результатов модельных экспериментов сформулировать требования к качеству функционирования системы в виде ограничений на характеристики и критерий эффективности.

Формирование критерия эффективности предполагает построение обобщенного показателя эффективности на основе множества частных показателей на основе одного из следующих подходов:

- построение составного критерия эффективности в виде аддитивного  $F_1$  или мультипликативного  $F_2$  функционала;

$$F_1 = \sum_{i=1}^K \alpha_i x_i; \quad F_2 = \frac{\prod_{i=1}^k x_i}{\prod_{i=k+1}^K x_i},$$

где  $x_1, \dots, x_K$  – частные показатели эффективности;  $\alpha_i$  – весовой коэффициент показателя  $x_i$  (весовые коэффициенты выбираются на основе экспертных оценок);

- выбор в качестве критерия эффективности  $F$  одного частного показателя при ограничениях, налагаемых на остальные показатели эффективности:

$$F = x_j \text{ при ограничениях } x_i < x_i^* \text{ или } x_i > x_i^* \text{ для всех } x_i \neq x_j.$$

Решить задачу проектирования новой или модернизации существующей системы с заданными свойствами, заключающую в определении параметров структуры и функционирования системы, обеспечивающих заданные ограничения на характеристики системы.

Для упрощения решения задачи процесс проектирования или модернизации системы можно разделить на последовательность этапов:

- определение требований к параметрам отдельных элементов системы;
- выбор структурной организации системы (определение структурных параметров);

- выбор режима функционирования системы (определение функциональных параметров);
- определение требований к параметрам нагрузки, обеспечивающим функционирование системы с заданным качеством.

При многоэтапном проектировании или модернизации значения параметров определяются с использованием аналитического моделирования в отношении факторов, учитываемых на каждом из этапов, но не в отношении системы в целом. Поэтому многоэтапное проектирование позволяет получить лишь приближенные решения, качество которых проверяется путем детального анализа системы.

Выполнить детальный анализ спроектированной или модернизированной системы с целью оценки полученных параметров, выявления предельных возможностей, «узких мест» в системе и т.д. Анализ спроектированной или модернизированной системы для определения ее фактической эффективности целесообразно проводить с использованием детальных имитационных моделей.

#### **4. Порядок выполнения работы**

- 4.1. Ознакомиться с постановкой задачи.
- 4.2. Самостоятельно выбрать объект исследования и согласовать его с преподавателем (этап 1).
- 4.3. Разработать имитационные и аналитические модели и провести их параметризацию (этап 2).
- 4.4. Выполнить модельные эксперименты с использованием программных средств GPSS World, AnyLogic, ITMOdel (этап 3).
- 4.5. Обработать полученные экспериментальные результаты (этап 4).
- 4.6. Сформулировать и решить задачу проектирования новой или модернизации существующей системы (этап 5).
- 4.7. Составить отчет по проделанной работе.

#### **5. Программные средства**

В процессе выполнения комплексной учебно-исследовательской работы следует использовать следующие программные средства.

1. Система имитационного моделирования **GPSS World**.
2. Система имитационного моделирования **AnyLogic**.
3. Программа **ITMOdel** для аналитического расчета характеристик СМО и сетевых моделей массового обслуживания.

#### **6. Оформление и содержание отчета**

6.1. Отчёт по курсовой работе должен быть оформлен в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оформлению научно-исследовательских работ, и включать в себя:

- 1) титульный лист (см. файл kr\_titlist.doc);
- 2) ЗАДАНИЕ на курсовую работу (см. файл kr\_zadan.doc);
- 3) СОДЕРЖАНИЕ с указанием страниц (все страницы пояснительной записки кроме титульного листа и задания должны быть пронумерованы с учётом того, что титульный лист – это страница 1);
- 3) ВВЕДЕНИЕ, содержащее краткое описание выполненной работы;
- 4) рубрикацию в виде *разделов* пояснительной записки и *пунктов* внутри разделов, которые должны быть пронумерованы: разделы 1, 2, ..., пункты внутри раздела 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2, ...);
- 5) ссылки на используемую литературу;
- 6) ЗАКЛЮЧЕНИЕ с основными результатами работы;

7) СПИСОК использованной литературы, оформленный в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003.

6.2. Отчёт по курсовой работе должен содержать:

1) Описание гипотетической или реальной системы обслуживания в терминах некоторой прикладной области, в качестве моделей которой могут служить сетевые или СМО модели. Например: магазин, бензозаправка, аэропорт, автомастерская и т.п.

2) Постановку задачи и результаты исследования системы обслуживания с использованием детальных имитационных моделей GPSS и AnyLogic:

- имитационная GPSS-модель системы (листинг GPSS-программы) с необходимыми комментариями;
- имитационная AnyLogic-модель системы (диаграмма модели) с необходимыми комментариями;
- результаты имитационного моделирования системы, представленные в форме таблиц и графиков;
- анализ результатов имитационного моделирования системы при различных параметрах нагрузки;
- сравнение результатов, полученных на имитационных моделях GPSS и AnyLogic.

3) Постановку задачи исследования системы с использованием замкнутых и разомкнутых СеМО или СМО с неоднородным потоком заявок и все исходные данные с указанием размерностей, которые должны быть выбраны в соответствии с моделируемой системой.

4) Результаты исследования системы с использованием модели в виде ЗСеМО и РСемо или СМО с неоднородным потоком заявок на аналитических моделях:

- описание ЗСеМО и РСемо или СМО;
- результаты аналитического расчета характеристик системы, сведенные в таблицы (форма 1 и 2 или 3 и 4) и их анализ;
- анализ результатов устранения "узкого места" в СеМО.

5) Результаты сравнительного анализа (графики, выводы) характеристик разомкнутых и замкнутых СеМО или результаты сравнительного анализа (графики, выводы) характеристик СМО для различных дисциплин обслуживания и загрузок системы.

6) Сравнение результатов, полученных на имитационных и аналитических моделях.

7) Детальный анализ и подробное описание выявленных свойств исследуемой системы с обоснованием использования одной из разработанных моделей.

8) Постановку и решение задачи проектирования или модернизации системы с заданными свойствами (удовлетворяющей заданным ограничениям на характеристики функционирования).

9) Детальный анализ спроектированной или модернизированной системы.

**7. Рекомендуемые формы таблиц**

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Форма 1**

Характеристики СеМО	Замкнутая СеМО					Разомкнутая СеМО				
	Уз.1	Уз.2	Уз.3	Уз.4	Сеть	Уз.1	Уз.2	Уз.3	Уз.4	Сеть
Загрузка										
Длина очереди										
Число заявок										
Время ожидания										
Время пребывания										
Производительность										

**Форма 2**

Характеристики СеМО	(Критич.число = ) Число заявок в ЗСеМО					(Предельная инт.= ) Интенсивн. потока в РСеМО				
Ср. длина очереди										
Ср. число заявок										
Ср. время ожидания										
Ср. время пребывания										
Производительность										

Примечание: вместо предлагаемой таблицы результаты могут быть представлены в виде графиков с указанием на них численных значений характеристик и варьируемых параметров.

**Форма 3**

Класс заявок	Загрузка	Характеристики обслуживания класса заявок в СМО											
		Ср. время ожидания			Ср. время пребывания			Ср. длина очереди			Ср. число заявок в системе		
		БП	ОП	АП	БП	ОП	АП	БП	ОП	АП	БП	ОП	АП
1													
2													
...													
Н													

**Форма 4**

A	R	b	ДО	Характеристики обслуживания объединенного потока заявок в СМО				
				Ср. время ожидания	Ср. время пребывания	Ср. длина очереди	Ср. число заявок	Константа закона сохранения времени ожидания
			БП					
			ОП					
			АП					

A - интенсивность объединенного потока заявок; R – суммарная нагрузка системы; b – средняя длительность обслуживания объединенного потока заявок.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Длительность моделирования: \_\_\_\_\_

Количество транзактов: \_\_\_\_\_

Результаты имитационного моделирования представляются в форме самостоятельно разработанных таблиц, содержащих основные временные и безразмерные характеристики модели исследуемой системы.

**8. Литература**

1. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
2. Конспект лекций по дисциплине "Моделирование".
3. Электронные учебно-методические материалы по дисциплине «Моделирование», представленные на портале кафедры ВТ ([www.cis.ifmo.ru](http://www.cis.ifmo.ru)).