

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина»  
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ»**

**Методические указания к лабораторным работам  
дисциплины  
«Математическое и компьютерное моделирование»**

Направление 090401 – Информатика и вычислительная техника  
Направленность – Вычислительные машины, комплексы,  
системы и сети

Квалификация выпускника – магистр  
Форма обучения – заочная

Рязань 2021 г.

## **..Лабораторная работа № 1**

### **Исследование элементов систем моделирования GPSS World на имитационных моделях процессов массового обслуживания.**

**Цель работы:** изучение работы симулятора GPSS World, основных операторов и управляющих карт языка GPSS. Научиться создавать простейшие модели и анализировать статистические данные, полученные в результате моделирования.

#### **1. Теоретическая часть**

Пакет моделирования дискретных систем GPSS World предназначен для имитационного моделирования сложных производственных, вычислительных и информационных систем. Имитационное моделирование обеспечивает возможность испытания, оценки и проведения экспериментов с проектируемой системой без каких-либо воздействий на нее. Эксперимент при имитационном моделировании проводится с программой, которая является моделью системы. Длительные периоды функционирования (дни, часы) исследуемой системы могут быть промоделированы на ЭВМ за несколько минут.

Имитационное моделирование представляет собой один из видов анализа сложных технических систем. Первым шагом при анализе любой конкретной системы являются выделение элементов системы и формулирование логических правил, определяющих порядок взаимодействия этих элементов. Для GPSS World исходным является формальное описание объекта проектирования в виде системы массового обслуживания (СМО). Входным языком является язык GPSS. Необходимо отметить, что средства системы GPSS World ориентированы на построение моделей вычислительных систем и проведение машинного эксперимента с целью их анализа только на самом верхнем (системном) этапе проектирования. Транслятор языка GPSS является транслятором интерпретирующего типа.

#### **1.1. Общие сведения о языке GPSS**

Язык GPSS (*General Purpose Simulating System* – общецелевая система моделирования) относится к классу языков моделирования с транзактами, т.е. ориентирован на описание процессов прохождения заявок, моделируемых транзактами, через элементы вычислительной системы, представленной в виде системы массового обслуживания.

Моделирующая система GPSS (интерпретатор) автоматически выполняет планирование событий, перевод таймера модельного времени, разрешение конфликтов между заявками на приоритетной основе, сбор статистической информации, т.е. логика моделирования в основном встроена в интерпретатор. Модель дискретной системы в интерпретаторе представлена совокупностью абстрактных объектов (элементов) следующих категорий.

1. Динамические объекты - транзакты (сообщения) моделируют заявки. Транзакты могут создаваться, перемещаться по объектам, представляющим в модели оборудование, расщепляться, ликвидироваться. Каждый транзакт может иметь атрибуты - параметры, доступные программисту.

2. Аппаратно-ориентированные объекты представляют в модели ресурсы вычислительной системы. Это устройства, память (многоканальные устройства) и логические переключатели. Устройство может быть свободно или занято определенным транзактом. Состояние памяти характеризуется только количеством свободных и занятых ячеек (их конкретные адреса не фиксируются). Логический переключатель может быть во включенном (S) и выключенном (R) состояниях.

3. Вычислительные объекты: арифметические переменные с фиксированной или плавающей точкой, булевские переменные, случайные функции.

4. Запоминающие объекты: ячейки.
5. Статистические объекты: очереди и таблицы для сбора статистических данных.
6. Группирующие объекты: группы и списки.

Программа моделирования, разрабатываемая пользователем, состоит из операционных объектов (блоков, операторов) и управляющих операторов (карт).

Операторы служат для объявления переменных, функций, памяти, действий над транзактами (создание и ликвидация, задержка, изменение маршрута и параметров), действий над устройствами, памятью, переключателями.

Управляющие карты управляют работой интерпретатора (пуск, останов, очистка и т.д.).

Интерпретатор автоматически фиксирует для каждого объекта стандартные числовые атрибуты (СЧА). СЧА могут использоваться в качестве операндов, аргументов функций, таблиц, элементов переменных. Некоторые СЧА (параметры транзактов, значения сохраняемых ячеек памяти) можно изменять программно, основная часть СЧА доступна только для чтения, но не для записи.

### **1.2. Отличие от предыдущих версий**

Система GPSS World – мощная универсальная среда моделирования как дискретных, так и непрерывных процессов, предназначенная для профессионального моделирования самых разнообразных процессов и систем. Эта система явилась следующим шагом развития системы GPSS/PC (1984 год), ориентированной на DOS. Обе системы разработаны специалистами фирмы Minuteman Software (основана в 1982 году) под руководством Спрингера Кокса. Сначала система GPSS World появилась в 1994 году с ориентацией на OS/2 фирмы IBM, и только в 2000 году она была реализована под ОС Windows фирмы Microsoft.

В GPSS World появились дополнительные возможности, вот основные из них:

- по всем классам объектов и переменных реализованы динамические графические окна, в которых представляется в реальном времени промежуточная и выходная статистика;
- гибкий процедурный язык PLUS может быть использован для построения моделей и в процедурах проведения эксперимента;
- введены средства поддержки факторного анализа, традиционного дисперсионного (ANOVA) и регрессионного анализа, оптимизация на основе методологии оптимального планирования эксперимента;
- стали доступны элементы непрерывного моделирования;
- решены проблемы с целочисленным модельным временем.

С помощью этой системы, например, можно эффективно моделировать как производственные, так и непроизводственные процессы: функционирование торговых и увеселительных заведений, портов, уличное движение, проведение военных действий, работу редакций, учреждений и сети Internet, различных систем массового обслуживания и т.д. Система имеет большой набор команд для управления процессом моделирования, которые можно как использовать в интерактивном режиме, так и включать в модель. Обеспечена возможность проведения экспериментов, сгенерированных системой, пользовательских и оптимизационных. В системе GPSS World реализована процедура визуализации процесса функционирования модели с использованием методов мультипликации.

Система GPSS World имеет новый высокоскоростной транслятор, работающий в сотни раз быстрее его предшественников. Для быстрого исправления ошибок используется полноэкранный текстовый редактор.

Системы GPSS World и GPSS/PC совместимы и обычно выдают результаты, которые являются статистически неразличимыми. Подобный уровень совместимости доступен простым устранением нескольких различий. Однако с точки зрения

функционирования система GPSS World имеет существенное отличие от GPSS/PC. Если система GPSS/PC работает в режиме интерпретатора – посстрочного выполнения программы, – то GPSS World функционирует в режиме транслятора. Любые ошибки, обнаруженные в течение трансляции, сохраняются в очереди сообщений об ошибках, так что их легко найти и исправить. Курсор автоматически перемещается в местоположение очередной ошибки, и сообщение об ошибке появляется в строке состояния в нижней части главного окна системы.

Другое существенное отличие GPSS World от GPSS/PC заключается в том, что в новой системе нет необходимости нумеровать строки программы. Если же в модели есть нумерация, то система GPSS World ее просто игнорирует. Система включает большое число различных типов окон, упрощающих просмотр и анализ объектов модели. Дружественный интерфейс облегчает работу с системой. В ней имеется библиотека распределений вероятностей, которые можно широко использовать в процессе моделирования. Кроме того, есть библиотека процедур, обеспечивающая манипуляции со строковыми данными и позволяющая выполнять расчеты и широко использовать распределения вероятности.

Система имеет встроенные средства обслуживания, которые поддерживают режим захвата и печати графических окон для выполнения моментальных снимков (Snapshot). Мощный встроенный текстовый редактор предназначен для создания, оперативного изменения, редактирования самых разнообразных имитационных моделей, и имеется большой набор команд для управления процессом моделирования.

Использование системы моделирования GPSS World не только значительно ускоряет процесс моделирования и исследования самых разнообразных систем массового обслуживания и непрерывных процессов, но и позволяет проводить оптимизационные эксперименты.

### 1.3. Основные операторы

Оператор языка GPSS содержит 4 поля: метка (необязательное поле), операция, операнды, комментарий (необязательное поле). Комментарием считаются все символы, следующие после символа «;». Количество операндов может достигать 9, операнды обозначаются буквами A, B, C, D, E, F, G, H, I. Часть операндов может быть опущена (берутся по умолчанию), если опускаются не последние операнды (A, B, D, E), запятые сохраняются.

Ниже приведены основные операторы и выполняемые ими действия. Обязательные операнды подчеркнуты.

**SEIZE A** (занять). **A** - имя устройства. Занять можно только свободное устройство. Уже занятое устройство не впускает транзакты, перед ним организуется очередь на основе относительных приоритетов.

**RELEASE A** (освободить). **A** - имя устройства. Устройство должно быть освобождено тем же транзактом, который его занял.

**PREEMT A, B, C, D, E** (захватить). **A** - имя устройства. **B** - возможность захвата занятого устройства. Если **B=PR**, возможна любая глубина прерываний на основе абсолютных приоритетов. По умолчанию приоритеты не учитываются, прерывать обслуживание прерывающего транзакта нельзя. **C** - метка оператора, к которому переходит прерванный транзакт, **D** - номер параметра, в который запишется остаток времени, оставшегося до конца обслуживания, **E** - признак снятия с обслуживания прерванного транзакта. Если **E=RE**, транзакт снимается. По умолчанию прерванный транзакт дообслуживается после обслуживания прерывающего.

**RETURN A** (вернуть). **A** - имя захваченного устройства. Освободить устройство должен тот же транзакт, который его захватил.

**NameD STORAGE A** (объявление многоканальных устройств). **NameD** – имя устройства, **A** – объем устройства.

**ENTER A, B** (войти в многоканальное устройство A, занять в нем B ячеек). По умолчанию B=1. Если в многоканальном устройстве нет требуемого количества ячеек, транзакт задерживается на входе оператора.

**LEAVE A, B** (выйти, т.е. освободить в многоканальном устройстве A и B ячеек). Освобождать можно любым транзактом, не обязательно тем, который занимал!

**GENERATE A, B, C, D, E, F, G, H, I** (генерировать транзакты).

A - среднее значение интервала; B - модификатор разброса или модификатор функции (GENE 10, 5 - интервал от 5 до 15 единиц равновероятен, GENE 10, 1 - средний интервал 10 единиц, распределение интервалов - по функции FN 1); C - время появления первого транзакта (по умолчанию 1); D - число выработанных транзактов (по умолчанию  $\infty$ ); E - приоритет (по умолчанию 0); F÷I - число и тип параметров (10PF, 7PH, ...) (по умолчанию 12 PH). При генерации транзактов значения всех параметров нулевые.

**TERMINATE A** (завершить). Оператор ликвидирует вошедший в него транзакт, вычитает A единиц из счетчика завершений. По умолчанию A=0.

**ADVANCE A, B** (задержать). A - среднее время задержки; B - модификатор разброса или модификатор функции. Оператор может впускать сколько угодно транзактов.

**TRANSFER A, B, C** (передать). A - режим выбора; B и C - метки операторов, к которым происходит переход. Основные варианты использования оператора следующие:

A=BOTH - транзакт повторяет попытки войти сначала в оператор B, а в случае неудачи - в оператор C и т.д. до тех пор, пока какой-либо из операторов его не впустит.

A=.XXX - транзакт случайным образом, с вероятностью 0.XXX передается в оператор C, с вероятностью 1 - 0.XXX - в оператор B (или в следующий за TRANSFER по порядку оператор, если операнд B опущен).

Если опущены операнды A и C, транзакт безусловно передается в оператор, метка которого задана операндом B.

**TEST X A, B, C** (проверить). X - оператор отношения. Транзакт переходит в следующий по порядку оператор, если выполняется условие A X B, в противном случае пересылается на оператор C (по умолчанию остается на входе оператора TEST).

Вспомогательный оператор отношения X∈(E, G, L, GE, LE, NE) имеет соответственно смысл "равно", "больше", "меньше", "больше или равно", "меньше или равно", "не равно". X можно писать после TEST без пробела.

**GATE X A, B** (впустить). Транзакт переходит в следующий блок, если для оборудования с именем A выполняется логическое условие X, в противном случае пересылается на оператор B (по умолчанию остается на входе оператора GATE). Возможные виды условий:

Таблица 1

Для устройств	Для памяти	Для переключателей
NU – свободно	SE - пуста	LS – включен
U – занято	SNE – не пуста	LR – выключен
I – обслуживает прерывания	SF - полна	
NI – работает без прерываний	SNF – не полна	

**QUEUE A, B** (отметить вход в очередь). A - имя очереди, B - количество занимаемых единиц (по умолчанию B=1).

**DEPART A, B** (отметить выход из очереди). Смысл операндов тот же, что для QUEUE. Оператор ставится после операторов SEIZE, PREEMT, ENTER.

**PRIORITY A, B** (назначить приоритет). A – назначаемый транзакту приоритет. B=BUFFER означает, что транзакт должен остановиться после изменения приоритета.

**ИМЯ FUNCTION RNj, CK**  
**X1,Y1/X2,Y2/.../XK,YK**

Описание непрерывной случайной функции.

Здесь  $j$  - номер используемого датчика случайных чисел генерирующий числа с плавающей точкой в диапазоне  $[0,1]$ ,  $K$  - количество точек, по которым выполняется кусочно-линейная аппроксимация функции.

**ИМЯ FUNCTION RNj, DK**

**X1,Y1/X2,Y2/.../XK,YK**

Описание дискретной случайной функции.

Значения **X** должны лежать в пределах  $(0,1)$  и быть записаны в порядке увеличения.

*Пример. Случайная дискретная функция RAND, описанная следующим образом:*

**RANDFUNCTIONRN1, D3**

**.5,2/.8,1/1,4**

принимает значение 2 с вероятностью 0.5, 1 - с вероятностью 0.3, 4 - с вероятностью 0, 2.

#### 1.4. Основные управляющие операторы (карты)

**START A, B, C, D** (старт). Оператор уведомляет интерпретатор, что ввод программы закончен, можно начинать моделирование. **A** - начальное значение кода в счетчике завершений (TG1); **B=NP** - признак подавления стандартной печати (по умолчанию распечатывается статистика в конце счета); **C** - счетчик снимков, показывающий, через какой интервал уменьшения TG1 надо распечатывать промежуточные результаты (по умолчанию не печатать); **D=1** - признак распечатки списков в конце моделирования.

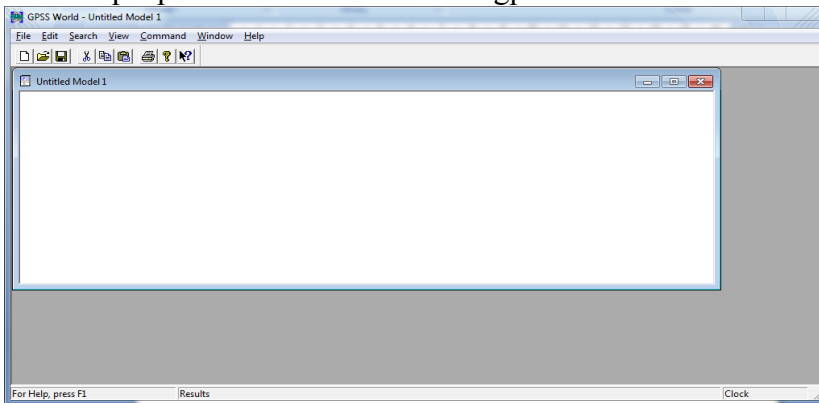
**CLEAR XLj, XFj, XHj, HBj, MXj, MLj, MBj** (очистить). Обнуляет все переменные модели, кроме указанных в нем ячеек и матриц ячеек, перед следующим прогоном модели с другими параметрами.

**RESET Fj, Qj, Sj, CHj, TBj** (сбросить). Сбрасываются вся статистика, кроме собранной для указанных в операторе устройств, очередей, памяти, списков пользователя, таблиц, и относительное время C1. Абсолютное время AC1, ячейки, переключатели на этот оператор не реагируют, транзакты из модели не удаляются. Оператор служит для сброса искаженной переходным процессом статистики.

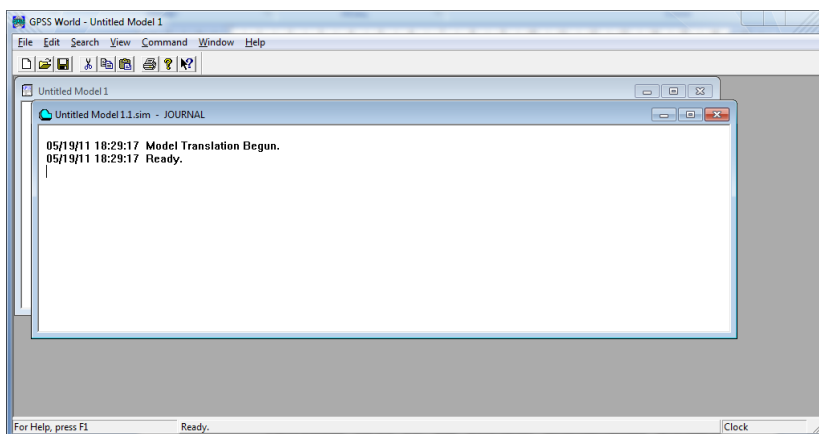
#### 1.5. Краткое описание среды моделирования GPSS World

Для запуска приложения необходимо в меню установленных программ выбрать **GPSS World Student Version**.

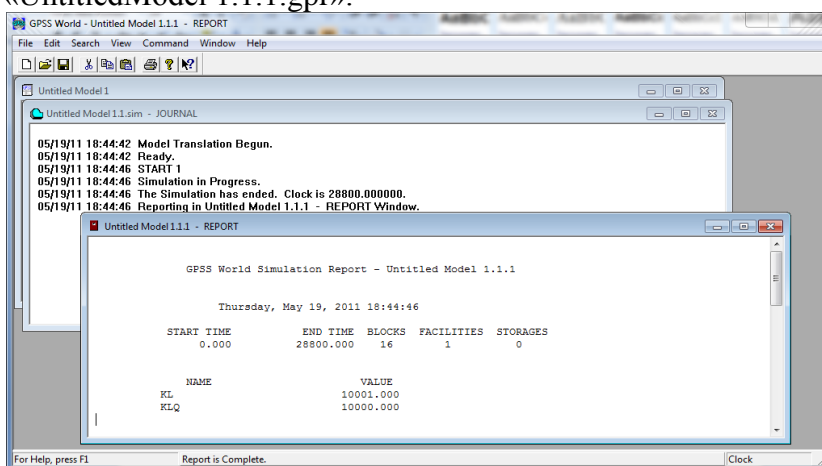
После запуска приложения из строки меню выбрать **File->New**, из открывшегося списка выбрать **Model** и нажать Ok, при этом создается новая модель и откроется поле ввода текста программы «UntitledModel 1.gps».



Для создания выполняемой модели необходимо из строки меню выбрать **Command → CreateSimulation**, после этого если нет ошибок то сформируется журнал «UntitledModel 1.1.sim».



Если же в программе найдены ошибки, то они отображаются в данном журнале. Для запуска программы необходимо из строки меню выбрать **Command** → **START**, в открывшемся диалоговом окне Start Command команде **START** задаются аргументы, после нажатия на Ok происходит выполнение программы и формирование отчета «UntitledModel 1.1.1.gpr».



Описание других команд в меню Command:

**Retranslate** (Перетранслировать) или нажатие комбинации клавиш Ctrl+Alt+R обеспечивает перетранслирование модели;

**Repeat Last Command** (Повторить последнюю команду) или нажатие комбинации клавиш Ctrl+Alt+L обеспечивает повторение выполнения последней команды;

**CONDUCT** (Управление) дает возможность проведения эксперимента;

**STEP1** (Шаг 1) или нажатие комбинации клавиш Ctrl+Alt+1 обеспечивает пошаговое выполнение оттранслированной программы;

**HALT** (Останов) прерывает процесс моделирования;

**CONTINUE** (Продолжить) обеспечивает продолжение процесса моделирования;

**CLEAR** (Очистить) – возвращение моделирования в первоначальное состояние;

**RESET** (Сброс) – сброс статистики в начальное состояние;

**SHOW ...** (Показать) вызывает диалоговое окно Show Command (Показать команду), которое обеспечивает возможность просмотра искомых параметров в окне JOURNAL;

**Custom...** (Пользователь) вызывает диалоговое окно Simulation Command (Команда моделирования) для ввода команд управления пользователем во время моделирования.

## 1.6. Содержание стандартной распечатки результатов моделирования GPSS World

Распечатка результатов работы системы GPSS World (отчет) включает в себя листинг исходной программы, таблицу перекрестных ссылок и стандартный набор статистических результатов.

Листинг исходной программы содержит текст модели на языке GPSS, составленный пользователем и дополненный номерами операторов и блоков. В случае наличия ошибок в листинг включаются диагностические сообщения о них.

Таблица перекрестных ссылок формируется в случае использования в модели символических имен объектов GPSS PC, для которых определяются числовые значения.

В конец распечатки результатов работы включается листинг стандартной статистики по работе моделируемой системы, который содержит:

1) показания модельного (относительного и абсолютного) времени на момент завершения процесса моделирования;

2) статистику по использованию блоков;

3) статистику по всем видам аппаратных объектов модели.

Стандартный набор информации об использовании блоков модели состоит из трех колонок: номера блока, его текущего содержимого и общего числа входов в него.

Стандартный набор статистической информации о приборах включает следующие данные (по колонкам):

1) Имя (номер) прибора (FACILITY);

2) Общее число входов в прибор за время моделирования (ENTRIES);

3) Коэффициент использования в течение всего времени моделирования (UTIL.);

4) Среднее время пребывания транзакта в приборе (AVE.TIME);

5) Номер транзакта, занявшего прибор (AVAIL.);

6) Номер транзакта, захватившего прибор (OWNER).

Стандартный набор статистической информации об очередях включает следующие данные (по колонкам):

1) Имя (номер) очереди (QUEUE);

2) Максимальное содержимое очереди за время моделирования (MAX);

3) Текущее содержимое очереди (CONT.).

4) Общее число входов в очередь (ENTRIES);

5) Количество "нулевых" входов в очередь (ENTRIES 0);

6) Среднее содержимое очереди (AVE.CONT.);

7) Среднее время пребывания транзакта в очереди (AVE.TIME);

8) Среднее время пребывания без учета "нулевых" входов (AVE.(-0)).

Содержание стандартной распечатки для приборов, многоканальных устройств и очередей приведено в табл.2.

## 2. Практическая часть

### 2.1. Задание 1. Изучение симулятора GPSS World

#### Порядок выполнения задания

Запустите симулятор GPSS World. Загрузите файл LAB1.GPS из директории, указанной преподавателем. Запустите моделирование командой START 1.

Просмотрите результаты моделирования и запишите их в файл на диске.

Вернитесь к листингу программы и добавьте в него операторы сбора простейшей статистики. Программа примет следующий вид (новые строки выделены жирным шрифтом):

```
GENERATE 150,10
QUEUE    QU1
SEIZE    DE1
DEPART   QU1
ADVANCE  30,10
RELEASE  DE1
TERMINATE      1
```



Запустите моделирование. Просмотрите результаты моделирования и запишите их в файл на диске.

Вернитесь к листингу программы и отредактируйте первую строку, чтобы она приобрела вид:

GENERATE 40, 30

Запустите моделирование и просмотрите отчет в генераторе отчетов.

## 2.2. Задание 2. Простейшая модель на GPSS

### Постановка задачи

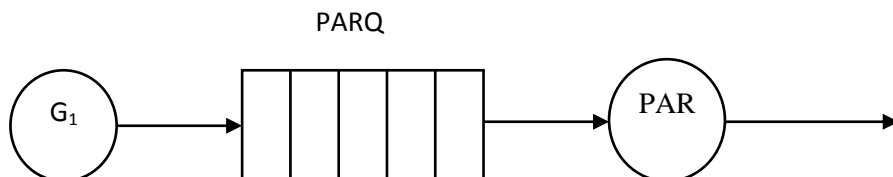
Интервалы прихода клиентов в парикмахерскую с одним креслом распределены равномерно:  $18 \pm 15$  мин. Время стрижки также распределено равномерно:  $16 \pm 6$  мин. Клиенты приходят в парикмахерскую, стригутся в порядке «первым пришел — первым обслужен» и затем уходят. Модель парикмахерской на GPSS должна обеспечить сбор статистических данных об очереди. Необходимо промоделировать работу в течение 8 часов модельного времени.

### Построение модели

Модель строится в виде непрерывной цепи блоков, к которой добавлены компоненты, предназначенные для управления моделированием. Порядок блоков в модели соответствует порядку фаз, в которых оказывается клиент при движении в реальной системе.

- клиенты приходят,
- если необходимо, ждут своей очереди,
- затем садятся в кресло к парикмахеру, который их стрижет,
- клиенты уходят.

Модель будет иметь следующее графическое (концептуальное) представление:



Первый сегмент программы непосредственно описывает моделируемую систему. Второй сегмент является вспомогательным. С его помощью задается время моделирования.

Таблица 2

Элементы GPSS	Назначение
Транзакты:	
первый сегмент программы	Клиенты
второй сегмент программы	Таймер
Приборы:	
PAR	Парикмахер
Очереди:	
PARQ	Очередь сбора статистики об ожидании клиентов

### Листинг программы

*; первый сегмент программы*

**GENERATE**        **18,15**    ; приход клиентов

**QUEUE**            **PARQ** ; присоединение к очереди

**SEIZE**            **PAR**    ; переход в кресло парикмахера

**DEPART** **PARQ**; уход из очереди  
**ADVANCE** **16,6** ; обслуживание у парикмахера  
**RELEASE** **PAR** ; освобождение парикмахера  
**TERMINATE** ; уход из парикмахерской  
; второй сегмент программы  
**GENERATE** **480** ; транзакт приходит в момент  
; времени, равный 480 мин.  
**TERMINATE** **1** ; завершение моделирования

### Результаты моделирования

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE_TIME	AVAIL	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
PAR	25	0.876	16.811	1	26	0	0	0	3

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
PARQ	4	3	28	7	0.745	12.779	17.038	0

### Анализ результатов

#### Прибор

1. Парикмахер был занят обслуживанием 25 раз, ENTRIES (число входов) = 25.
2. Он был занят в течение 87.6 % времени, UTIL. (загрузка) = 0.876.
3. Среднее время интервала обслуживания парикмахера равно 16,811 мин, AVE\_TIME (среднее время) = 16.811.
4. После окончания интервала времени, равного 8 ч, в кресле остался один необслуженный клиент, AVAIL = 1.

#### Очередь

1. В очереди к парикмахеру никогда не было более четырёх клиентов, MAX (максимальное содержимое) = 4.
2. Содержимое очереди на момент окончания моделирования равно 3, CONT. (содержимое) = 3.
3. Всего в очередь входило 28 клиентов, ENTRIES (число входов) = 28.
4. Среди этих 27 входов было 8 нулевых, ENTRIES(0) (число нулевых входов)=8.
5. Среднее число клиентов, находившихся в очереди, равно 0,745, AVE\_CONT (среднее содержимое) = 0.745 – средняя длина очереди.
6. Среднее время пребывания клиентов в очереди равно 12.779, AVE\_TIME (среднее время) = 12.779.
7. Среднее время пребывания клиентов в очереди (исключая нулевые входы) равно 17.038, AVE(-0) (среднее время, исключая нулевые входы) = 17.038.

### Порядок выполнения задания

1. Запустите симулятор GPSS World. Загрузите листинг программы.
2. Запустите моделирование командой START 1
3. Проанализируйте результаты моделирования и запишите их в файл на диске.
4. Вернитесь к листингу программы и отредактируйте ADVANCE, чтобы она приобрела вид: ADVANCE 16,16
5. Запустите моделирование и просмотрите отчет в генераторе отчетов.
6. Сравнивая результаты двух вариантов выполнения, сделать вывод об изменении длины очереди клиентов.

### 2.3. Задание 3. Выполнение своего варианта задачи Варианты 1, 4, 7, 10

#### Постановка задачи

На предприятии работает склад вычислительной техники, обслуживаемый одним кладовщиком. Он выдает запасные части ремонтникам, обслуживающим компьютеры. Время, необходимое для удовлетворения запроса ремонтника, зависит от типа требуемой запасной части. По этому признаку все запасные части и соответственно виды запросов разделены на две категории.

#### Исходные данные

Все исходные данные по вариантам приведены в табл. 3 (все числовые параметры подчиняются равномерному распределению).

Кладовщик всегда обслуживал ремонтников в соответствии с дисциплиной обслуживания «первым пришел – первым обслужен» (FIFO) независимо от категории запроса.

Таблица 3

Вариант	Категория запроса	Интервалы времени прихода ремонтников, с	Время обслуживания, с
1	1	420±360	300±200
	2	360±240	100±80
4	1	400±320	275±220
	2	320±210	215±200
7	1	370±240	240±210
	2	250±200	120±100
10	1	200±180	180±160
	2	100±90	90±80

Поскольку сломанная вычислительная машина не работает, это приводит к финансовым потерям предприятия в размере 100 рублей убытка за 1 час простоя одного компьютера. Согласно расчетам директора предприятия, изменение используемой дисциплины обслуживания на «первым пришел – первым обслужен внутри приоритетного класса» (при этом запросы второй категории обслуживаются первыми) приведет к уменьшению убытков, вызванных простоем вычислительной техники на предприятии.

#### Порядок выполнения задания

1. Создать модель работы склада в соответствии с приведенными данными для дисциплины обслуживания «первым пришел – первым обслужен» (бесприоритетная дисциплина обслуживания).
2. Провести ее моделирование в течение 8-часового рабочего дня.
3. Проанализировать полученные результаты.
4. Подсчитать потери от простоя вычислительной техники.
5. Создать модель работы склада в соответствии с приведенными данными для дисциплины обслуживания «первым пришел – первым обслужен внутри приоритетного класса».
6. Провести ее моделирование в течение 8-часового рабочего дня.
7. Проанализировать полученные результаты.
8. Посчитать потери от простоя вычислительной техники.
9. Сравнивая результаты пунктов 3, 4 и 7, 8 порядка выполнения, сделать вывод о правильности расчетов директора.

### Замечания

1. Используйте операнд установки приоритета генерируемых транзактов в блоке GENERATE.
2. Для установки времени моделирования используйте сегмент GENERATE-TERMINATE вида:

GENERATE            A  
TERMINATE        1,

где A – модельное время прогона.

В основном сегменте программы используйте все блоки TERMINATE без операндов (вход транзакта в такой блок TERMINATE не будет вызывать уменьшение содержимого счетчика завершений).

### Варианты 2, 5, 8

#### Постановка задачи

На предприятии производятся персональные компьютеры (ПК). После сборки они проходят серию испытаний на станции технического контроля. Испытания проводят два контролера ( $n = 2$ ). Если оказывается, что функционирование компьютера не отвечает требованиям по надежности, то отбракованный компьютер переправляют в цех наладки, где заменяют один или несколько блоков. Наладку производит один специалист. После наладки ПК возвращают на станцию технического контроля, где его снова проверяют. Если проверка проходит успешно, компьютер уходит в цех упаковки. Для хранения компьютеров, ожидающих испытаний и наладки, на станции технического контроля и в цехе наладки организованы стеллажи.

#### Исходные данные

Компьютеры попадают на станцию технического контроля с предыдущего участка каждые **A** минут. На станции находятся два контролера. Каждому из них требуется на проверку **B** минут. Примерно **C** % компьютеров проходят проверку успешно и попадают в цех упаковки. Остальные попадают в цех наладки на станцию технического контроля. Наладка одного компьютера занимает **D** минут. Значения данных параметров в зависимости от варианта приведены в табл. 4 (все числовые параметры подчиняются равномерному распределению).

Таблица.4

Вариант	A, мин	B, мин	C, %	D, мин
2	$10 \pm 4$	$16 \pm 6$	85%	$60 \pm 20$
5	$15 \pm 4$	$25 \pm 10$	76%	$60 \pm 40$
8	$5 \pm 1$	$9.5 \pm 4$	91%	$75 \pm 45$

#### Порядок выполнения задания

1. Напишите на GPSS модель функционирования этого предприятия.
2. Проведите ее моделирование в течение десяти восьмичасовых рабочих дней.
3. Проанализируйте полученные статистические данные.
4. Оцените, сколько мест на стеллажах необходимо предусмотреть на входе станции контроля и в цехе наладки.
5. Проведите моделирование, изменяя количество контролеров, в сторону уменьшения ( $n = 1$ ) и увеличения ( $n = 4$ ).
6. Проанализируйте изменения поведения модели.

### Замечания

1. При написании программы используйте для моделирования контролеров многоканальные устройства: ENTER-LEAVE. Количество контролеров изменяйте установкой емкости многоканального устройства (STORAGE).
2. Для установки времени моделирования используйте сегмент GENERATE-TERMINATE вида:

GENERATE            A  
TERMINATE         1,

где A – модельное время прогона.

В основном сегменте программы используйте все блоки TERMINATE без операндов (вход транзакта в такой блок TERMINATE не будет вызывать уменьшение содержимого счетчика завершений).

### Варианты 3,6,9

#### Постановка задачи

На предприятии производятся двухдиапазонные радиоприемники: длинных (ДВ) и ультракоротких (УКВ) волн. После сборки они проходят проверку. Если оказывается, что приемник неисправен, то он уходит в цех ремонта. Если же приемник работоспособен, то он проходит настройку. Сначала один специалист настраивает диапазон УКВ. После этого приемник поступает к другому специалисту, который настраивает диапазон ДВ. Далее приемник идет в цех упаковки.

#### Исходные данные

Радиоприемники попадают в цех настройки каждые A минут. Примерно B % радиоприемников оказываются неисправными. Настройка приемника в УКВ диапазоне занимает C минут, в диапазоне ДВ - D минут. Значения данных параметров в зависимости от варианта приведены в таблице 5 (все числовые параметры подчиняются равномерному распределению).

Таблица 5

Вариант	A, мин	B, %	C, мин	D, мин
3	15±8	15	70±60	30±26
6	22±11	25	50±45	35±30
9	10±8	5	40±30	25±22

#### Порядок выполнения задания

1. Напишите на GPSS модель функционирования цеха настройки предприятия.
2. Проведите моделирование работы цеха в течение 8-часового рабочего дня.
3. Проанализируйте полученные статистические данные.
4. Оцените эффективность такой организации процесса настройки радиоприемников.
5. Измените модель таким образом, чтобы порядок настройки диапазонов радиоприемников настройщиками был обратным.
6. Проведите моделирование в новых условиях.
7. Проанализируйте полученные результаты.
8. Сравните их с предыдущими и сделайте выводы.

### Замечания

Для установки времени моделирования используйте сегмент GENERATE-TERMINATE вида:

GENERATE            A  
TERMINATE         1,

где A – модельное время прогона.

В основном сегменте программы используйте все блоки TERMINATE без операндов (вход транзакта в такой блок TERMINATE не будет вызывать уменьшение содержимого счетчика завершений).

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы и цель.
2. Графическое (концептуальное) представление моделей.
3. Листинги программы для второго и третьего задания (до и после изменения). Таблицы статистической информации. Краткая расшифровка статистики, полученной в процессе моделирования.
4. Результаты выполнения задания и выводы.

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные отличия GPSSWorld от его предыдущей версии GPSSPC.
2. Дайте краткую характеристику операторам GENERATE, TERMINATE и START, поясните назначение их операндов.
3. Перечислите команды в меню Command и опишите их назначение.
4. Расскажите о назначении операторов GATE и TEST, задании условий в приведенных операторах.
5. Опишите операторы, связанные с представлением модели аппаратного объекта типа «многоканальное устройство».
6. Расскажите о назначении и особенностях применения оператора TRANSFER.
7. Опишите работу управляющих карт RESET и CLEAR.
8. Расскажите о назначении оператора STORAGE.
9. Раскройте назначение операторов сбора статистической информации об очередях и особенности их применения.
10. Объясните значение полей в файле отчета.

Таблица. 6. Содержание стандартной распечатки для приборов, многоканальных устройств и очередей

<b>Распечатка для приборов</b>	FACILITY	Имя (номер) прибора
	ENTRIES	Общее число входов в прибор за время моделирования
	UTIL.	Коэффициент использования в течение всего времени моделирования
	AVE_TIME	Среднее время пребывания транзакта в приборе
	AVAIL	Номер транзакта, занявшего прибор
	OWNER	Номер транзакта, захватившего прибор
	PEND	Количество прерванных в устройстве транзактов
	INTER	Количество прерывающих устройство транзактов
	RETRY	Количество транзактов, ожидающих специальных условий
	DELAY	Количество транзактов, ожидающих занятия устройства

<b>Распечатка для многоканаль- ных устройств</b>	STORAGE	Имя (номер) прибора
	CAP.	Емкость многоканального устройства
	REMAIN.	Текущее содержимое(в момент остановки моделирования)
	MIN	Минимальное содержимое
	MAX	Максимальное содержимое
	ENTRIES	Общее число занятий приборов
	AVL.	
	AVE.C.	Среднее содержимое

	UTIL.	Средняя загрузка
	RETRY	Количество транзактов, ожидающих специальных условий
	DELAY	Количество транзактов, ожидающих занятия устройства
<b>Распечатка для очередей</b>	QUEUE	Имя (номер) очереди
	MAX	Максимальное содержимое очереди за время моделирования
	CONT.	Текущее содержимое очереди
	ENTRIES	Общее число входов в очередь
	ENTRIES(0)	Количество "нулевых" входов в очередь
	AVE.CONT.	Среднее содержимое очереди
	AVE.TIME	Среднее время пребывания транзакта в очереди
	AVE.(-0)	Среднее время пребывания без учета "нулевых" входов
	RETRY	Количество повторных входов

## Лабораторная работа № 2

### Методы работы с моделями

**Цель работы:** изучение методов работы с моделями СМО на языке GPSS, способов задания условия окончания моделирования, формирование отчетов, переопределение параметров модели; изучение влияния квантования времени обслуживания и назначения приоритетов на качество работы СМО (пп.1-8 порядка выполнения); изучение замкнутой СМО (пп.1,2 9-12 порядка выполнения).

### 1. Теоретическая часть

#### 1.1. Модель СМО с квантованием времени обслуживания

**Механизм квантования** времени обслуживания отдельных задач (заявок на обслуживание) применяется в многозадачных вычислительных системах, реализуя тем самым псевдопараллельность выполнения этих задач.

Кроме многозадачности квантование времени обслуживания обеспечивает уменьшение среднего время пребывания заявки в СМО  $\bar{u}$ , за счёт того, что менее трудоемкие заявки будут более быстро покидать СМО. Они не будут общее среднее время ожидания находиться в общей очереди.

Концептуальная модель данной СМО представлена на рисунке 1. Она содержит три источника заявок G1, G2, G3 со средним интервалом между заявками  $M[T_i]$ ,  $i=1, 2, 3$  и средним временем их обслуживания  $M[v_i]$ ,  $i=1, 2, 3$ ; очередь QOPR и обслуживающий аппарат (OA) OPR.

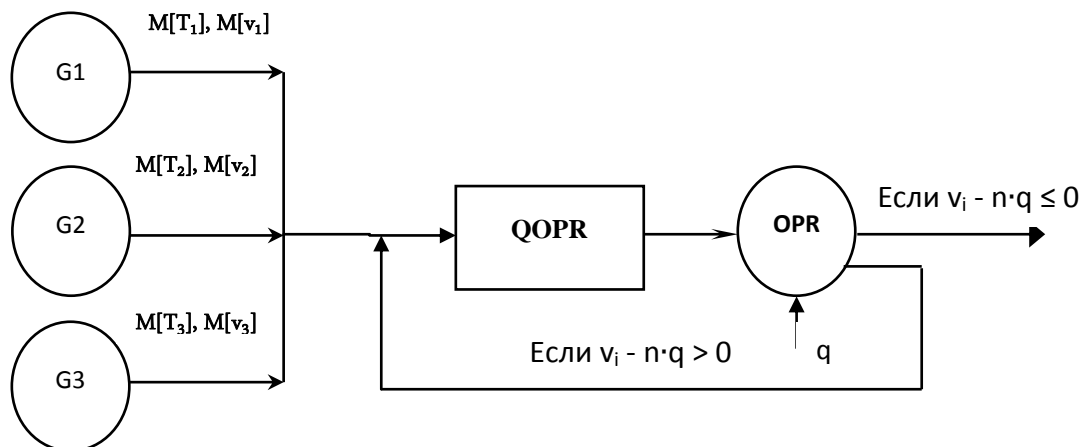


Рисунок 1.

Источники заявок (генераторы) вырабатывают заявки (транзакты) независимо друг от друга через случайные интервалы времени, распределённые по экспоненциальному закону (модель простейшего потока событий - ППС), и передают их на обработку в OPR. Поскольку OPR одновременно может обрабатывать только одну заявку, то остальные заявки помещаются в очередь QOPR, организованную на входе устройства OPR. Все заявки в очереди располагаются в соответствии со своим приоритетом.

Каждая заявка характеризуется временем обслуживания  $v_i$ , необходимым для ее обслуживания в устройстве OPR, и приоритетом  $P_i$ . Время обслуживания также является случайной величиной, распределённой по экспоненциальному закону, что соответствует ППС обслуживания. На обслуживание каждой заявки устройство OPR выделяет квант процессорного времени  $q$ .

Если обслуживаемая заявка не успевает выполняться за этот квант времени, то из времени обслуживания заявки  $v_i$  вычитается квант времени  $q$

$v_i - n \cdot q > 0$ , где  $n$  – число раз, которое заявка занимало OPR,



•

;Генератор заявок с приоритетом 1, $M[T_1]=20$ , $M[v_1]=4$		
GENERATE	20, FN\$EXP1,,,1	;Генерируем заявки с приоритетом 1 через интервалы времени ( $EXP1, M[T_1]=20$ )
ASSIGN	1,4,EXP1	;Присваиваем первому параметру транзакта (заявки) время обслуживания ( $EXP1, M[v_1]=4$ )
TRANSFER	,MET1	;Пересылаем транзакт в очередь (безусловная передача транзакта на метку MET1)
;Генератор заявок с приоритетом 1, $M[T_2]=100$ , $M[v_2]=50$		
GENERATE	100, FN\$EXP1,,,1	;Генерируем заявки с приоритетом 1 через интервалы времени ( $EXP1, M[T_2]=100$ )
ASSIGN	1,50,EXP1	;Присваиваем первому параметру транзакта (заявки) время обслуживания ( $EXP1, M[v_2]=50$ )
TRANSFER	,MET1	;Пересылаем транзакт в очередь
;Генератор заявок с приоритетом 1, $M[T_3]=50$ , $M[v_3]=10$		
GENERATE	50, FN\$EXP1,,,1	;Генерируем заявки с приоритетом 1 через интервалы времени ( $EXP1, M[T_3]=50$ )
ASSIGN	1,10,EXP1	;Присваиваем первому параметру транзакта (заявки) время обслуживания ( $EXP1, M[v_3]=10$ )
MET1 QUEUE	QOPR	;Вход транзакта в очередь
SEIZE	OPR	;Занимаем устройство OPR
DEPART	QOPR	;выход транзакта из очереди
TEST L V\$QUANT,P1,MET2		;Если кванта не хватило $q < \text{остатка } v_i$ , то
ADVANCE	V\$QUANT	;Задерживаем заявку на время кванта q
RELEASE	OPR	;иначе не метку MET2
ASSIGN	1-,V\$QUANT	;Освобождаем устройство OPR
TRANSFER	,MET1	;Вычитаем из времени обслуживания заявки $v_i$ квант времени q
FIN	TABULATE TIME	;Передаем недообслуженный транзакт в очередь
		;занести значение <b>времени пребывания</b> транзакта в таблицу TIME
TERMINATE	1	;Регистрация обслуженной заявки
		;(увеличение счетчика обслуженных заявок и удаление заявки)
MET2 ADVANCE	P1	;Если кванта хватило, то задержка на остаток времени обслуживания
RELEASE	OPR	;Освобождаем устройство OPR
TRANSFER	,FIN	;Конец обслуживания заявки

В программе для сбора статистики о транзактах, заблокированных в очереди, используются операторы QUEUE и DEPART, которые помещаются перед и после блока SEIZE соответственно. Для получения информации о **среднем времени пребывания**

заявки в системе используются операторы TABLE и TABULATE для табулирования времени пребывания заявки в СМО.

Оператор задания таблицы с именем TIME разбивает ось времени на 10 частотных интервалов. Первый интервал включает значения от 0 до 50, второй - от 50 до 100, третий - от 100 до 150 и т.д. Последний, десятый, интервал включает значения, превышающие 450. Если, например, пребывание некоторого транзакта в СМО составило 145 единиц модельного времени, то к счетчику третьего частотного интервала будет добавлена 1. Информация в таблицу с именем TIME заносится оператором TABULATE TIME, который необходимо разместить перед оператором TERMINATE 1, т.е. записать в таблицу TIME время, когда транзакт будет уничтожен (выйдет из модели).

## 1.2. Замкнутая сетевая модель СМО

Замкнутая сетевая модель СМО с постоянным количеством заявок  $N$  (рисунок 2) состоит из трёх простейших СМО<sub>1</sub>, СМО<sub>2</sub>, СМО<sub>3</sub>, каждое из которых содержит три обслуживающие аппараты (ОА) OPR1, OPR2, OPR3 и очереди к ним QOPR1, QOPR2, QOPR3.

Первоначально в СМО<sub>1</sub> в очередь QOPR1 помещается  $N$  заявок с одинаковыми приоритетами. Далее заявки попадают на обслуживание в ОА OPR1. Здесь заявка, захватившая устройство, обслуживается некоторое время  $v_1$ . Затем с некоторой вероятностью  $P$  заявка передается на обслуживание в СМО<sub>2</sub>, в противном случае заявка передается на обслуживание в СМО<sub>3</sub>. В ОА OPR2 и OPR3 заявки обслуживаются некоторое время  $v_2$  и  $v_3$  соответственно. После чего заявки вновь попадают в СМО<sub>1</sub>. Так заявки будут циркулировать до бесконечности.

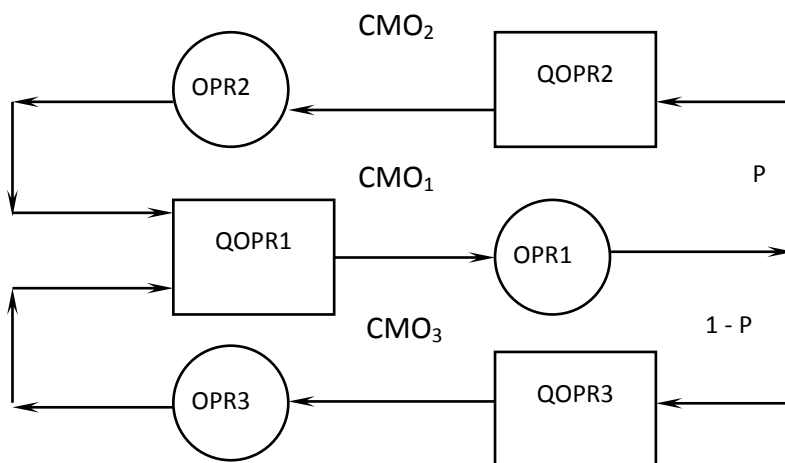


Рисунок 2.

Такие замкнутые сети СМО используются при моделировании процессов, когда в системе обрабатывается постоянное число заявок. То есть, когда результат окончания обработки одной из заявок порождает новую заявку. Например, модель диалоговой системы. СМО<sub>1</sub> задаёт вопросы, на которые отвечают либо СМО<sub>2</sub>, либо СМО<sub>3</sub>. Их ответы обдумываются в СМО<sub>1</sub> и порождают новые вопросы от СМО<sub>1</sub> к СМО<sub>2</sub> и СМО<sub>3</sub>.

### Пример замкнутой сетевой модели

Пусть время обслуживания заявок случайно и распределено по экспоненциальному закону и  $M[v_1]=100$ ,  $M[v_2]=200$ ,  $M[v_3]=50$ .

Программа на языке GPSS без управляющих операторов имеет вид:

```

EXP1  FUNCTION  RN1,C24          ;Задание функции EXP1 табличным способом
0,0/.1,.104/.2,.222/.3,.335/.4,.509/.5,.69/.6,.915
.7,1.2/.75,1.38/.8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3
  
```

.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2/.97,3.5/.98,3.9

.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8

```

GENERATE    ,,3                ;Генерируем три заявки, которые поступают в
                                ;очередь устройства OPR1

MET1 QUEUE  QOPR1
SEIZE       OPR1                ;Занимаем устройство OPR1
DEPART      QOPR1
ADVANCE     100,FN$EXP1         ;Обслуживаем заявку в OPR1
RELEASE     OPR1                ;Освобождаем устройство OPR1
TRANSFER    0.900,,MET3        ;Передаем заявку в устройство OPR3 с
                                ;вероятностью 0,9 и в устройство OPR2 с
                                ;вероятностью 0,1

        QUEUE  QOPR2
        SEIZE   OPR2                ;Занимаем устройство OPR2
        DEPART  QOPR2
        ADVANCE 200,FN$EXP1         ;Обслуживаем заявку в OPR2
        RELEASE OPR2                ;Освобождаем устройство OPR2
        TRANSFER ,MET1              ;Передаем заявку обратно в
                                ;очередь устройства OPR1

MET3 QUEUE  QOPR3
SEIZE       OPR3                ;Занимаем устройство OPR3
DEPART      QOPR3
ADVANCE     50,FN$EXP1          ;Обслуживаем заявку в устройстве OPR3
RELEASE     OPR3                ;Освобождаем устройство OPR3
TRANSFER    ,MET1              ;Возвращаем заявку в очередь устройства OPR1

GENERATE 100000                ;Задание времени моделирования
TERMINATE 1

```

Последние два оператора в случае запуска моделирования командой **START 1** задают время моделирования. Первый транзакт, сгенерированный оператором **GENERATE**, уничтожится оператором **TERMINATE** только через 100000 единиц модельного времени, вызвав тем самым окончание моделирования.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с работой симулятора языка GPSS, генератором отчетов, операторами и командами языка GPSS.
2. Ознакомиться с двумя моделями СМО, представленными выше (СМО с квантованием времени обслуживания и замкнутая сетевая модель СМО).
3. В соответствии с таблицей вариантов задания

Вариант	M[T <sub>1</sub> ]	M[T <sub>2</sub> ]	M[T <sub>3</sub> ]	M[v <sub>1</sub> ]	M[v <sub>2</sub> ]	M[v <sub>3</sub> ]
1	100	9	36	30	3	10,8
2	20	100	50	4	50	10
3	200	100	20	40	20	10
4	15	50	100	5	10	40
5	10	100	40	2	40	8
6	50	12,5	100	10	5	20
7	300	75	14	30	15	7
8	9	20	60	3	6	12
9	48	24	80	12	6	24
10	120	50	40	30	15	10

изменить средние интервалы между заявками  $M[T_i]$ , подставив соответствующее значение в первый параметр операторов GENERATE, и время обслуживания  $M[v_i]$  – второй параметр операторов ASSIGN.

- Запустить программу на выполнение, задав значение счетчика завершений равным 100000-200000. Для запуска программы необходимо ввести команду START N, где N содержит константу, задающую начальное значение счетчика завершений. Например, START 200000.

В результате получится отчет, представленный ниже (числовые данные здесь произвольные):

Начальное значение модельного времени	Конечное значение модельного времени	Число блоков в модели	Число устройств в модели	Число многоканальных устройств
START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	2493260.473	21	1	0

Метка	Последовательность блока в описании модели	Тип блока	Число вхождений транзактов в блок	Текущее количество транзактов в блоке (в конце моделирования)	
LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
MET1	1	GENERATE	124976	0	0
	2	ASSIGN	124976	0	0
	3	TRANSFER	124976	0	0
	4	GENERATE	25268	0	0
	5	ASSIGN	25268	0	0
	6	TRANSFER	25268	0	0
	7	GENERATE	49780	0	0
	8	ASSIGN	49780	0	0
	9	QUEUE	565622	23	0
	10	SEIZE	565599	1	0
	11	DEPART	565598	0	0
	12	TEST	565598	0	0
	13	ADVANCE	365598	0	0
	14	RELEASE	365598	0	0
	15	ASSIGN	365598	0	0
	16	TRANSFER	365598	0	0
FIN	17	TABULATE	200000	0	0
MET2	18	TERMINATE	200000	0	0
	19	ADVANCE	200000	0	0
	20	RELEASE	200000	0	0
	21	TRANSFER	200000	0	0

Устройство	Число вхождений	Коэффициент загрузки	Среднее время на одно занятие	Число доступных устройств	Число обслуженных транзактов				Задержка
FACILITY	ENTRIES	UTIL	AVE_TIME	AVAILABLE	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
OPR	565599	0.903	3.981	1	199975	0	0	0	23

Имя очереди	Макс. длина очереди	Текущая длина очереди	Число вхождений в очередь	Число вхождений в очередь без ожидания в очереди	Средняя длина очереди	Среднее время нахождения транзактов в очереди	Среднее время ожидания транзак. в очереди без учета транзак., обслуженных без ожидания	
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRIES	ENTRIES(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
QOPR	61	24	565622	47110	8.621	38.003	41.456	0

Имя Таблицы	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение		Диапазон	Число попаданий в диапазон	Накопленная частота
TABLE	MEAN	STD.DEV.	RETRY	RANGE	FREQUENCY	CUM.%
TIME	<b>118.68</b>	280.029	0			
				-50	10390	51.98
				50-100	42221	73.09
				100-150	18959	69.00
				150-200	9699	82.56
				200-250	5477	87.41
				250-300	3844	90.15
				300-350	2660	92.08
				350-400	1966	93.41
				400-450	1478	95.13
				450-	9746	100.00

В последней таблице жирным шрифтом выделено среднее время пребывания заявки в системе  $\bar{t}$ .

Зафиксируйте результаты.

5. Посчитайте теоретическое значение коэффициента загрузки обслуживающего аппарата  $\rho = \frac{M[v_1]}{M[T_1]} + \frac{M[v_2]}{M[T_2]} + \frac{M[v_3]}{M[T_3]}$  и сравните его с экспериментальным значением.

6. Снимите зависимость **среднего времени пребывания** заявки (транзакта) в системе от величины кванта  $q = 1, 4, 16, 64$ . Постройте график. Объясните полученную зависимость.

7. Выключите в модели квантование времени обслуживания (для этого достаточно задать значение кванта на порядок больше, чем время обслуживания  $v_i$  наиболее трудоемкой заявки). Зафиксируйте полученное при этом среднее времени пребывания заявки (транзакта) в системе. Сравните его со значениями п. 6. Почему квантование дает такой эффект?

8. Установите  $q = 1$  и назначьте приоритеты так, чтобы более высокий приоритет был у заявок с меньшей трудоемкостью. Запустить программу на выполнение. Сравнить время пребывания заявки в системе с результатами с п.6 при  $q = 1$ .

9. Провести эксперименты с замкнутой сетевой моделью СМО, настроив её в соответствии с вариантом заданий, представленным в таблице.

Вариант	$M[v_1]$	$M[v_2]$	$M[v_3]$	$P$
1	50	200	100	0,9
2	100	200	50	0,9
3	50	200	100	0,8
4	100	200	50	0,8
5	50	100	100	0,9
6	100	100	50	0,9
7	50	100	100	0,8

8	100	100	50	0,8
9	25	100	50	0,9
10	25	100	50	0,9

10. Запустить программу на выполнение командой START 1.
11. Зафиксировать для каждого СМО<sub>i</sub>  $i=1, 2, 3$  загрузку, среднюю длину очереди, среднее время ожидания.
12. Повторить моделирование для 6, 9 и 12 заявок в модели. Построить графики изменения параметров п.11 порядка выполнения как функции числа заявок в модели. Сравнить результаты.

### Контрольные вопросы

1. Стандартный вывод (на экран) результатов моделирования.
2. Переопределение параметров модели.
3. Условия окончания моделирования.
4. Изменение приоритетов и маршрута движения транзактов.
5. Что дает квантование времени обслуживания?
6. Как влияет величина кванта на эффективность работы СМО?
7. Как изменилось время пребывания транзакта в СМО при изменении приоритетов и почему?
8. Чем отличается замкнутая СМО от разомкнутой?
9. Объясните поведение средней длины очереди, среднего время ожидания и коэффициента загрузки каждой СМО от числа заявок в модели.
10. Где «узкое» место в замкнутой СМО? Как его устранить?

### Лабораторная работа № 3

#### Характеристики простейшей СМО

**Цель работы:** изучение и сравнения характеристик простейшей СМО:

- исследование зависимости основных характеристик СМО от коэффициента загрузки ОА (пункты 1÷7 порядка выполнения);
- исследование зависимости основных характеристик СМО от степени случайности длительности обслуживания заявок и интервала между приходами заявок (пункты 1, 2 и 8÷18).

#### 1 Теоретическая часть

Структурная схема СМО М/В/1 с экспоненциальным законом распределения случайного интервала между заявками на входе СМО (М – марковский процесс) и некоторым законом «В» распределения времени обслуживания в ОА.

СМО М/В/1

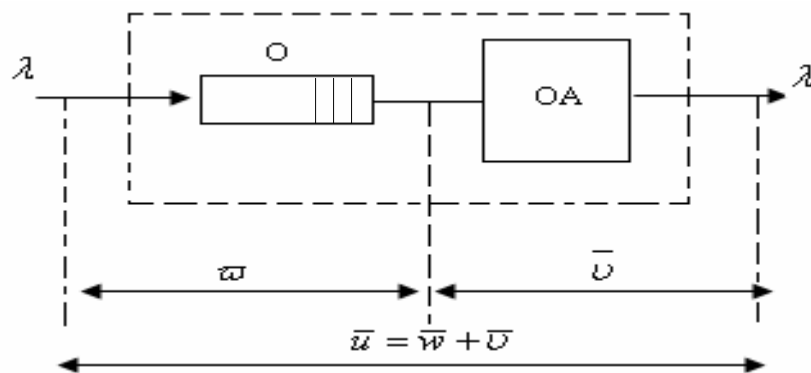


Рисунок 1

Основными параметрами СМО являются следующие:

$\lambda$  – интенсивность заявок на обслуживание на входе СМО;

$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$  – средний период между поступлениями заявок;

$\bar{w}$  – среднее время ожидания в очереди О;

$\bar{v}$  – среднее время обслуживания в ОА;

$\mu = \frac{1}{\bar{v}}$  – интенсивность обслуживания;

$\rho$  – коэффициент загрузки ОА;

$\bar{u}$  – среднее время пребывания заявки в СМО;

$\bar{\ell}$  – средняя длина очереди;

$\bar{m}$  – коэффициент мультипрограммирования СМО или среднее число заявок находящихся внутри СМО;

В – закон распределения случайной величины  $v$  – времени обслуживания в ОА,

$\gamma = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$  – коэффициент вариации случайной величины  $v$  – времени обслуживания в ОА,

где  $\sigma_v$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) времени обслуживания.

Для задания законов распределения В используются следующие обозначения:

G (General) – произвольное распределение общего вида;

M (Markovian) – экспоненциальное (показательное) распределение;

D (Deterministik) – детерминированное распределение;

U (Uniform) – равномерное распределение;

$E_k$  (Erlangian) – распределение Эрланга k-го порядка.



Обычно заданными параметрами СМО являются «В»,  $\lambda, \mu$ , или  $\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$ ,  $\bar{v} = \frac{1}{\mu}$ ,  $\gamma = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$ . Остальные являются искомыми параметрами при аналитическом и имитационном моделировании СМО.

Коэффициент загрузки ОА  $\rho = \lambda \bar{v}$ . Условие  $\rho < 1$  является условием стационарного режима работы системы. Если  $\rho > 1$ , то СМО не справляется с потоком заявок и, средняя длина очереди перед ОА не будет иметь некоторое конечное значение, так как очередь будет постоянно расти в течение времени работы СМО. Другие очевидные соотношения:

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \bar{w} + \bar{v}; \\ \bar{l} &= \lambda \bar{w}; \\ \bar{m} &= \bar{l} + \rho = \lambda \bar{u}.\end{aligned}$$

Для частного случая СМО М/М/1 из аналитической модели СМО имеем

$$\bar{w} = \frac{\rho \bar{v}}{(1-\rho)} = \frac{\lambda \bar{v}^2}{(1-\rho)}.$$

Для общего случая – СМО М/Г/1 аналитический анализ модели СМО позволяет найти среднее время ожидания в очереди в следующем виде (формула Поллачика – Хинчина):

$$\bar{w} = \frac{\lambda \bar{v}^2 (1 + \gamma^2)}{2(1-\rho)}.$$

Графические иллюстрации зависимости  $\bar{u}$  и  $\bar{w}$  от коэффициента загрузки представлены на рисунке 2.

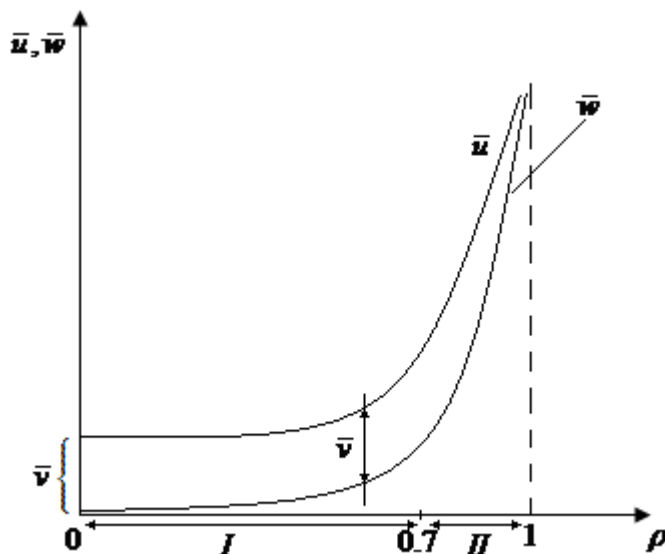


Рисунок 2

## 2 Порядок выполнения задания

1 Построить имитационную GPSS модель простейшей СМО М/М/1 (рисунок 1). Функции распределения интервала прихода заявок и длительности обслуживания заявок – экспоненциальные. Среднее значение длительности обслуживания заявок  $v_{cp} = \bar{v}$  определяется вариантом задания (например,  $\bar{v} = 100 \cdot \text{№ бригады}$ ). Время моделирования должно обеспечивать прохождение через СМО не менее 10000 заявок.

На рисунке 3 представлен образец GPSS модели для наиболее сложного варианта СМО М/Нормальный/1 с приблизительно нормальным законом распределения

длительности обслуживания заявок, который будет использоваться в п. 10 порядка выполнения. Изменить эту модель для получения СМО М/М/1.

```

EXPON    FUNCTION RN1,C24
          0,0/1,104/2,222/3,335/4,509/5,69/6,915/7,1.2/75,1.38
          .8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2
          .97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8

NORM      FUNCTION RN1,C21
          0,-3/.00621,-2.5/.02275,-2
          .06681,-1.5/.11507,-1.2/.15866,-1/.21186,-.8/.27425,-.6
          .34458,-.4/.42074,-.2/.5,0/.57926,.2/.65542,.4
          .72575,.6/.78814,.8/.84134,1/.88493,1.2/.93319,1.5
          .97725,2/.99379,2.5/.99865,3

MOJ  VARIABLE  108          ; Мат.ожидание -  $v_{cp}$ 
SKO  VARIABLE  V$MOJ/3      ;  $CKO = v_{cp}/3$  в соответствии с правилом  $3\sigma$ 
TOBS VARIABLE  V$MOJ + FN$NORM # V$SKO ;  $v = v_{cp} + f_{норм} * CKO$ 

GENERATE  120,FN$EXPON      ;  $T_{cp} = 120, \lambda = 1/T_{cp}$ 
QUEUE     OCH               ; встать в очередь
SEIZE     OAP               ; занять ОА
DEPART    OCH               ; выйти из очереди

ADVANCE   V$TOBS            ; случайное время обслуживания  $v$  в ОА
RELEASE   OAP               ; освободить устройство
TERMINATE 1

START     10000

```

Рисунок 3

2 Регулируя  $\lambda = 1/T_{cp}$  задать коэффициент загрузки ОА  $\rho = \lambda v_{cp} = 0,9$ . Запустить модель и зафиксировать параметры  $w_{cp}, u_{cp} = w_{cp} + v_{cp}, l_{cp}, l_{max}, m_{cp} = l_{cp} + \rho$ . Рассчитать параметры  $w_{cp}, u_{cp}, l_{cp}, m_{cp}$  по аналитической модели СМО. Сравнить результаты имитационного и аналитического моделирования.

3 Изменяя  $\lambda$  (в модели  $T_{cp}$ ) уменьшить  $\rho$  на 10 %. Запустить модель и зафиксировать значения параметров  $w_{cp}, u_{cp}, l_{cp}, l_{max}, m_{cp}$ . Вычислить их изменения в процентах.

4 Изменить  $\lambda$  (в модели  $T_{cp}$ ) так, чтобы  $\rho = 0,5$ . Повторить измерение и расчеты параметров в п.2.

5 Повторить п.3 относительно  $\rho = 0,5$ .

6 Сравнить процентные изменения параметров в пп. 3 и 5. Объяснить результаты.

7 Построить графики зависимостей параметров  $w_{cp}, u_{cp}, l_{cp}, l_{max}, m_{cp}$  от  $\rho$  по результатам имитационного моделирования. Построить графики зависимостей параметров  $w_{cp}, u_{cp}, l_{cp}, m_{cp}$  от  $\rho$  по аналитическим моделям. Сравнить результаты имитационного и аналитического моделирования.

8 Построить GPSS модель СМО М/У/1, где функция распределения интервала прихода заявок экспоненциальная, а длительности обслуживания заявок определена равномерным законом распределения в интервале от 0 до  $2v_{cp}$ .

9 Регулируя  $\lambda$  (в модели  $T_{cp}$ ) задать коэффициент загрузки ОА  $\rho = 0,9$ . Запустить модель и зафиксировать  $w_{cp}, u_{cp}, l_{cp}, l_{max}, m_{cp}$ . Сравнить результаты с п. 2.

10 Построить GPSS модель СМО М/Нормальный/1 (соответствует рисунку 3), где функция распределения интервала прихода заявок экспоненциальная, а длительности обслуживания заявок определена близким к нормальному законом распределения с математическим ожиданием  $v_{cp}$ , СКО  $\sigma = v_{cp}/3$  в соответствии с правилом  $3\sigma$ , и принимает ненулевые значения только в интервале от 0 до  $2v_{cp}$ .

11 Регулируя  $\lambda$  задать коэффициент загрузки ОА  $\rho = 0,9$ . Запустить модель и зафиксировать  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $l_{cp}$ ,  $l_{max}$ ,  $m_{cp}$ . Сравнить результаты с пп. 2 и 9.

12 Построить GPSS модель СМО М/D/1, где функция распределения интервала прихода заявок экспоненциальная, а длительности обслуживания заявок является неслучайной детерминированной величиной, равной  $v_{cp}$ .

13 Регулируя  $\lambda$  задать коэффициент загрузки ОА  $\rho = 0,9$ . Запустить модель и зафиксировать  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $l_{cp}$ ,  $l_{max}$ ,  $m_{cp}$ . Сравнить результаты с пп. 2, 9 и 11.

14 По результатам пунктов 2, 9, 11, 13 построить графики зависимостей  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $l_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от СКО  $\sigma$  длительности обслуживания заявок в ОА. Для СМО М/М/1  $\sigma = v_{cp}$ , для СМО М/U/1  $\sigma = \frac{v_{cp}}{\sqrt{3}}$ , для СМО М/Нормальный/1  $\sigma = v_{cp}/3$ , для СМО М/D/1  $\sigma = 0$ .

15 Используя формулу Поллачика-Хинчина построит графики зависимостей  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $l_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функции от СКО  $\sigma$ , учитывая, что  $\gamma = \frac{\sigma}{v_{cp}}$ . Сравнить графики п.14 и п. 15 порядка выполнения.

16 Построить GPSS модель СМО D/D/1, где интервал прихода заявок и длительности обслуживания заявок являются детерминированными величинами.

17 Регулируя  $\lambda$  задать коэффициент загрузки ОА  $\rho = 0,9$ . Зафиксировать  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $l_{cp}$ ,  $l_{max}$ ,  $m_{cp}$ .

18 Сравнить и объяснить в целом результаты по пп. 2, 9, 11, 13, 15 и 17.

### Содержание отчета

1. Результаты пп. 2, 9, 11, 13 и 17.
2. Графики зависимостей  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от  $\rho$  (по имитационной и аналитической моделям).
3. Процентное изменения параметров в пп. 3 и 5.
4. Графики зависимостей  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от СКО  $\sigma$  длительности обслуживания заявок в ОА (по имитационной и аналитической моделям).
5. Выводы

## Лабораторная работа № 4

### Исследование многоканальных СМО при росте суммарной производительности и неизменной суммарной производительности при увеличении числа каналов

**Цель работы:** сравнения характеристик многоканальных СМО моделирующих параллельные вычисления.

Пункты 1-2 порядка выполнения: исследование зависимости основных характеристик СМО от числа обслуживающих каналов при пропорциональном росте общей суммарной производительности системы.

Пункты 3-7 порядка выполнения: исследование зависимости основных характеристик СМО от числа обслуживающих каналов при неизменной суммарной вычислительной производительности системы.

### Теоретическая часть

Структурная схема СМО М/М/п (многоканальная СМО с очередью) имеет следующий вид:

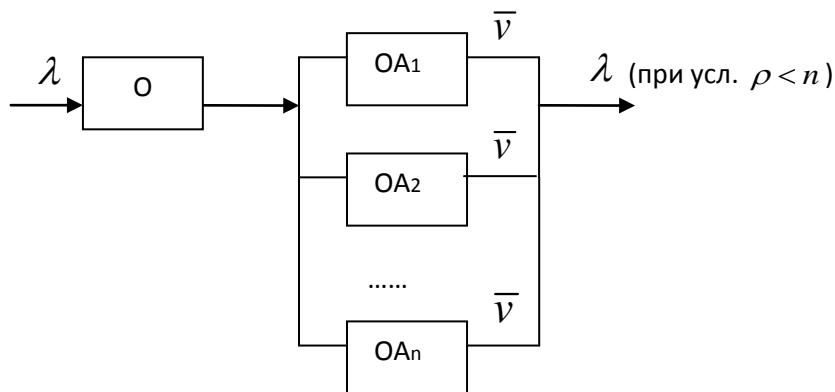


Рисунок 1

Все ОА равноправно и равноценны. Пришедшая из очереди заявка захватывает любой свободный ОА. Очередь образуется только тогда, когда все ОА заняты.

Граф переходов СМО из состояния в состояние имеет следующий вид:

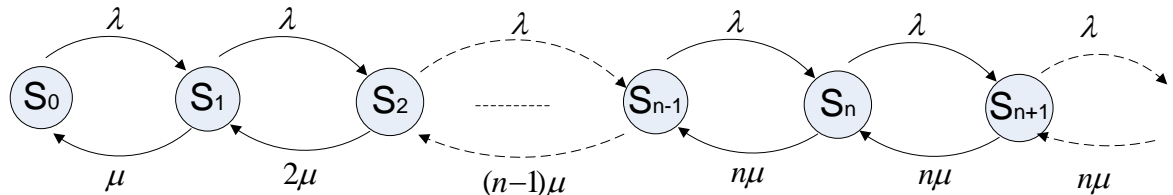


Рисунок 2

где  $\mu = \frac{1}{\bar{v}}$  – интенсивность обслуживания, величина обратная средней длительности обслуживания.

Физический индекс в выражении  $S_i$  – число заявок, находящихся внутри СМО.

$S_0$  – простой СМО (ноль заявок в СМО);

$S_1$  – в СМО одна заявка в каком-то  $OA_j$ ;

.....

$S_n$  – все каналы (ОА) загружены, в СМО n-заявок .

$S_{n+1}$  – все каналы загружены, в них n-заявок и одна в очереди и т.д.

Вероятность нахождения СМО в состоянии  $S_0$  определяется как:

$$P_0 = \left[ \sum_{i=0}^n \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)} \right]^{-1};$$

где  $\rho = \lambda \bar{v} = \frac{\lambda}{\mu}$  – коэффициент загрузки СМО.

Через вероятность  $P_0$  вычисляется среднее время ожидания в очереди  $\bar{w}$ :

$$\bar{w} = \frac{P_0 \rho^n}{(n-1)! \mu (n-\rho)^2}. \quad (1)$$

$\rho < n$  – условие стационарной работы системы. Если это условие не выполняется, система не справляется с входным потоком заявок, очередь по мере её работы будет расти до  $\infty$ , и её длина не будет иметь установившегося значения. Остальные ключевые характеристики СМО рассчитываются по формулам (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u} = \bar{w} + \bar{v}, \\ \bar{l} = \lambda \bar{w}, \\ \bar{m} = \bar{l} + \rho = \lambda \bar{u}, \\ \bar{k} = \rho, \\ R_1 = \frac{\bar{k}}{n}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $R_1 = \rho_1 = \rho/n$  – средний коэффициент загрузки одного ОА.

Для важного частного случая, двухканальной СМО  $n=2$ , имеем:

$$P_0 = \frac{2-\rho}{2+\rho}, \quad \bar{w} = \frac{\rho^2 \bar{v}}{4-\rho^2}.$$

### Порядок выполнения работы

1. Построить GPSS модель N-канальной СМО М/М/Н с общей очередью (рисунок 1). Функции распределения интервала прихода заявок и длительности обслуживания заявок – экспоненциальные. Среднее значение длительности обслуживания заявок  $v_{cp}$  каждым ОА определяется вариантом задания (например,  $\bar{v} = 100 * \text{№ бригады}$ ). Регулируя  $\lambda = 1/T_{cp}$  задать коэффициент загрузки всей СМО  $\rho = \lambda v_{cp} = 0,9$ . Коэффициент загрузки каждого ОА  $\rho_1 = \rho/N$ . Время моделирования должно обеспечивать прохождение через СМО не менее 100000 заявок. На рисунке 3 представлен образец GPSS модели N-канальной СМО М/М/Н.

Transit      TABLE      M1,0,25,30      ; Transit time =  $u_{cp}$

EXPON      FUNCTION RN1,C24  
0,0/1,104/2,222/3,335/4,509/5,69/6,915/7,1.2/.75,1.38  
.8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2  
.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8

MKU      STORAGE 2      ; Число каналов  $N=2$

GENERATE108,FN\$EXPON  
QUEUE      OCH  
ENTER      MKU  
DEPART      OCH

```

ADVANCE 100,FN$EXPON
LEAVE   MKU
TABULATE Transit
TERMINATE 1

```

```

START   100000

```

Рисунок 3

2. Меняя число каналов СМО –  $N$  от 1 до 4 зафиксировать  $l_{cp}$ ,  $l_{max}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$ . Построить графики зависимостей  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от  $N$ . Модельное значение  $v_{cp}$  можно рассчитывать по формуле  $v_{cp} = AVE.C. / \lambda$  или  $v_{cp} = UTIL. * N / \lambda$ , так как  $AVE.C. = \rho$  и  $UTIL. = \rho_1$ . Построить те же графики по теоретическим формулам (1) и (2). Сравнить и объяснить результаты.

3. На базе той же GPSS модели  $N$ -канальной СМО  $M/M/N$  с общей очередью исследование зависимости основных характеристик СМО от числа обслуживающих каналов при неизменной суммарной вычислительной производительности системы. В этом случае среднее значение длительности обслуживания заявок  $v_{icp}$  каждым  $OA_i$  зависит от числа каналов  $N$  так, чтобы суммарная производительность  $N$ -канальной СМО оставалась постоянной, то есть  $v_{icp} = N \cdot v_{cp}$ , где  $v_{cp}$  - среднее значение длительности обслуживания заявок для одноканальной СМО  $M/M/1$ , которая определяется вариантом задания (например,  $\bar{v} = 100 * N_{\text{б}} \text{ бригады}$ ). При выполнении этого условия  $\rho_N$  - коэффициент загрузки  $N$ -канальной СМО будет определяться выражением  $\rho_N = \rho_1 \cdot N$ , где  $\rho_1$  - коэффициент загрузки одноканальной СМО  $M/M/1$  или одного  $OA$  в СМО  $M/M/N$ . Условие стационарного режима работы  $N$ -канальной СМО  $\rho_N < N$ .

4. Для  $N = 1, 2, 4, 8, 16$  зафиксировать  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$ , изменяя при этом значения среднее значение длительности обслуживания заявок  $v_{icp}$  для каждого  $OA_i$  так, чтобы коэффициент загрузки СМО  $\rho_N = \lambda \cdot v_{icp} = 0,9 \cdot N$ , то есть чтобы  $v_{icp} = N \cdot v_{cp}$ . (То есть время обслуживания растёт пропорционально  $N$ ).

5. Повторить п. 4 для  $\rho_N = 0,5 \cdot N$ .

6. Построить графики зависимости  $l_{cp}$ ,  $l_{max}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от числа каналов  $N$  для  $\rho_1 = 0,9$  и  $\rho_1 = 0,5$ . Построить те же графики по теоретическим формулам (1) и (2). Сравнить и объяснить результаты.

7. Выбрать оптимальное значение  $N$  относительно параметров  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  для большого  $\rho_1 = 0,9$  и среднего  $\rho_1 = 0,5$  коэффициентов загрузки каждого  $OA$ .

### Содержание отчета

1. Модельные и теоретические графики зависимостей  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от числа каналов  $N$  при пропорциональном росте общей суммарной производительности системы ( $v_{icp} = v_{cp} = \text{const}$  и не зависит от  $N$ ).
2. Модельные и теоретические графики зависимостей  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  как функций от числа каналов  $N$  для  $\rho_1 = 0,9$  и  $\rho_1 = 0,5$  как функций от  $N$  при неизменной общей суммарной производительности ( $v_{icp} = N \cdot v_{cp}$ ).
3. Обоснование и результаты выбора оптимальной СМО при неизменной общей суммарной производительности системы относительно параметров  $l_{cp}$ ,  $w_{cp}$ ,  $u_{cp}$ ,  $m_{cp}$  для большого  $\rho_1 = 0,9$  и среднего  $\rho_1 = 0,5$  коэффициентов загрузки каждого  $OA$ .

# Лабораторная работа № 5

## Стационарный режим приоритетной дисциплины обслуживания.

### Механизм квантования. Принцип SJF

**Цель работы:** Изучение степени устойчивости обслуживания высокоприоритетных заявок, влияние механизма квантования на среднее время пребывания заявки в системе.

Пункты 1-7: исследование зависимости основных характеристик СМО с относительными приоритетами; исследование зависимости стационарного режима обслуживания заявок высокого приоритета от распределения суммарного коэффициента загрузки по потокам разного приоритета.

Пункты 8-15: исследование зависимости среднего времени пребывания в системе при квантовании процессорного времени от организации дисциплины дообслуживания заявок – принцип Shortest Job First (SJF).

## 1 Теоретическая часть

Для дисциплины обслуживания с относительными приоритетами (ДО ОП)  $\bar{w}_k$  - среднего времени ожидания заявки в очереди k-го приоритета

$$\bar{w}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \nu_i^2 (1 + \gamma_i^2)}{2(1 - R_k)(1 - R_{k-1})}, \quad (1)$$

где

$$R_s = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_s = \sum_{i=1}^s \rho_i = \sum_{i=1}^s \lambda_i \bar{\nu}_i$$

- частичная загрузка ОА потоками с 1-го по i-ый.

Сомножитель  $(1 - R_{k-1})$  в знаменателе отражает влияние заявок более высокого приоритета на увеличение времени ожидания заявки k-го приоритета, сомножитель  $(1 - R_k)$  отражает уменьшение времени ожидания заявки k-го приоритета, т.к. коэффициент загрузки  $R_k$  меньше  $R_n = R$  при  $k < n$ .

В числитель входят заявки всех типов, т.к. обслуживание заявки, занявшей ОА, не прерывается.

Для  $k = \overline{1, n}$  на графике зависимостей  $\bar{w}_k = f(R)$  получаем веер кривых, т.е. для каждого приоритета свой кривая.

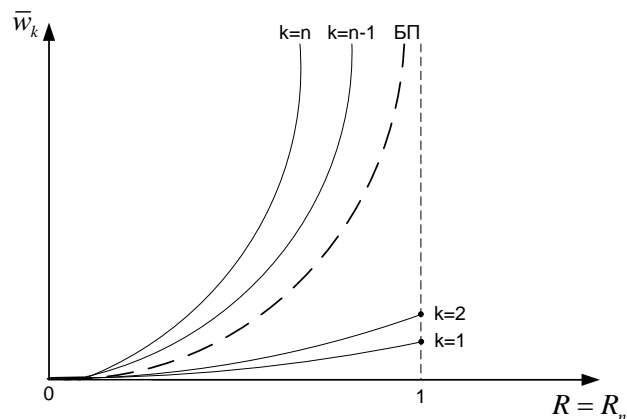


Рисунок 1

По сравнению с беспriorитетной дисциплиной обслуживания (БП ДО) уменьшается время обслуживания высокоприоритетных заявок за счет увеличения времени ожидания низкоприоритетных.

Точки на графике на асимптоте  $R=1$  означает, что СМО продолжает иметь конечное время ожидания для высоких приоритетов потоков заявок при 100 % загрузке ОА и даже при определенной общей перегрузке.

Даже при  $R \geq 1$  высокоприоритетные заявки будут иметь конечное время ожидания очереди за счет того, что для низко приоритетных заявок в этом случае дело практически не доходит.

Пусть  $\lambda_i = \lambda$ ,  $\bar{v}_i = \bar{v}$ , т.е.  $\rho_i = \rho$ ,  $n = 4$ , тогда

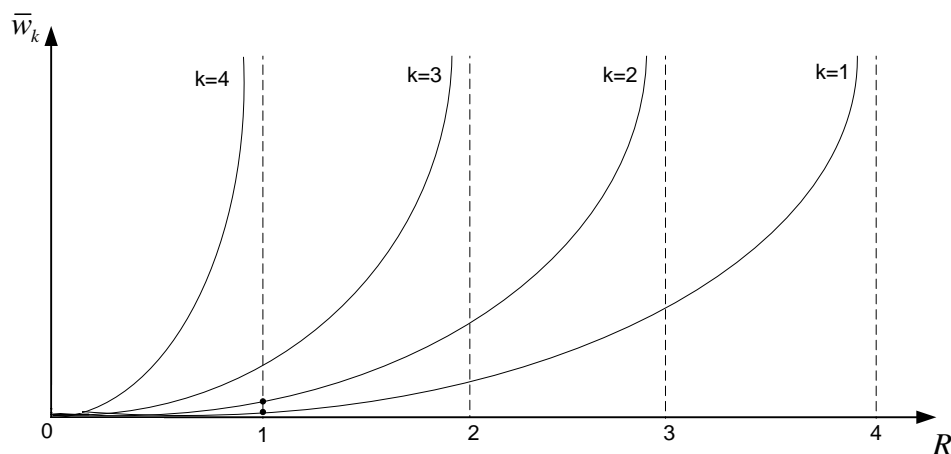


Рисунок 2

В дисциплине обслуживания заявок с приоритетами наиболее эффективный порядок состоит в том, чтобы потоку заявок с меньшей трудоемкостью (среднем временем выполнения) назначается более высокий приоритет. То есть, если у нескольких потоков заявок среднее время выполнения в обслуживающем аппарате (ОА) распределено в следующем порядке  $\bar{v}_i \leq \bar{v}_j \leq \bar{v}_k$ , то у потока  $i$  должен быть высший приоритет, у потока  $j$  – средний, у потока  $k$  – низший. Такой порядок назначения приоритетов обеспечивает минимальное среднее время пребывания заявки в СМО  $\bar{u}$ , то есть реализует принцип Shortest Job First (SJF).

Естественно, такой порядок назначения приоритетов возможен только в том случае, если к информационным потокам не предъявляются требования, связанные с их семантикой. В противном случае, может оказаться, что наиболее трудоемкому потоку заявок необходимо назначит более высокий приоритет из-за его важности или срочности в обработке.

Возможна ситуация, когда время выполнения заявок, поступающих в СМО заранее неизвестно, и все заявки поступают в общем потоке. Как в этом случае автоматически оценивать их трудоёмкость? Для этого используется механизм квантования времени работы ОА. Тогда менее трудоемкие заявки будут более быстро покидать СМО. Они не будут общее среднее время ожидания находится в общей очереди. Кроме этого для усиления принципа SJF вводится несколько очередей с разными приоритетами. Кроме основной очереди  $O_1$  добавляют еще одну (или несколько) очередей  $O_2$ ,  $O_3$  и т.д. Вновь поступившая в СМО заявка поступает сначала в высокоприоритетную очередь  $O_1$ . Не дообслуженная за один квант заявка возвращается в менее приоритетную очередь  $O_2$ , не дообслуженная за два кванта – в  $O_3$  с еще более низким приоритетом, чем  $O_2$  и т.д.

## 2 Порядок выполнения работы

1. Построить GPSS модель одноканальной СМО для обслуживания двух потоков заявок разного приоритета (рисунки 3 и 4). Функции распределения интервала прихода заявок и длительности обслуживания заявок - экспоненциальные. Интенсивности и средние значения длительностей обслуживания низкоприоритетного потока заявок:  $\lambda_1, v_{cp1}$  и высокоприоритетного потока заявок:  $\lambda_2, v_{cp2}$ . Значение  $v_{cp2}$  - определяются вариантом



задания (например,  $v_{cp2} = 100 \cdot \text{№бригады}$ ), значение  $v_{cp1} = 0,5 \cdot v_{cp2}$ . Время моделирования должно обеспечивать прохождение через СМО не менее 20000 заявок.

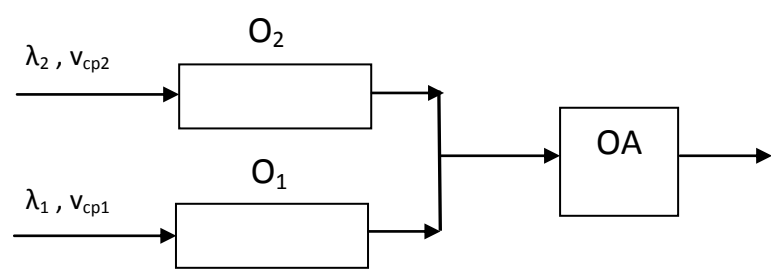


Рисунок 3

```

Transit      TABLE      M1,0,400,12      ;Transit time average
Transit1     TABLE      M1,0,400,12      ;Transit time low priority
Transit2     TABLE      M1,0,400,12      ;Transit time high priority

EXPON FUNCTION RN1,C24
0,0/.1,104/2,222/3,335/4,509/5,69/6,915/7,1.2/.75,1.38
.8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2
.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8

GENERATE 222,FN$EXPON,,,2      ;High priority
ASSIGN 1,100,EXPON
ASSIGN 2,2
QUEUE QPR2
SEIZE PRM
DEPART QPR2
TRANSFER ,MPRM

GENERATE 111,FN$EXPON,,,1      ;Low priority
ASSIGN 1,50,EXPON
ASSIGN 2,1
QUEUE QPR1
SEIZE PRM
DEPART QPR1

MPRM ADVANCE P1
RELEASE PRM
TABULATE TRANSIT      ;Время пребывания среднее по СМО
TEST E P2,2,MPR1      ;Индивидуальный учет обслуженных потоков
MPR2 TABULATE TRANSIT2      ;Время пребывания заявок 2-го приоритета
TERMINATE 1
MPR1 TABULATE TRANSIT1      ;Время пребывания заявок 1-го приоритета
TERMINATE 1

START 25000

```

Рисунок 4

2. Меняя  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$  задавать коэффициент загрузки ОА  $\rho = \rho_1 + \rho_2 = \lambda_1 \cdot v_{cp1} + \lambda_2 \cdot v_{cp2} = 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 0,9; 0,95$ . При этом доли загрузки от высокоприоритетного потока  $\rho_2 = \lambda_2 \cdot v_{cp2}$  и низкоприоритетного потока  $\rho_1 = \lambda_1 \cdot v_{cp1}$  должны совпадать:  $\rho_2 = \rho_1$ . Зафиксировать  $l_{maxi}$ ,  $l_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$  для  $i = 1, 2$  и  $u_{cp}$ .

3. Для максимального значения  $\rho = 0,95$  убедиться в выполнении стационарного режима работы СМО путем увеличения времени моделирования в 5-10 раз. При этом основные характеристики СМО  $l_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$ ,  $u_{cp}$  практически не должны изменяться. Зафиксировать  $l_{maxi}$ ,  $l_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$  для  $i = 1, 2$  и  $u_{cp}$ .

4. Построить графики зависимости  $l_{maxi}$ ,  $l_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$  для  $i = 1, 2$  и  $u_{cp}$  как функций от  $\rho$  – суммарного коэффициента загрузки ОА

5. Построить аналогичные теоретические графики, опираясь на аналитическую модели ДО ОП (формулу (1)).

6. Провести в модели (рисунки 3, 4) оптимальное назначение приоритетов и повторить пп.2-5. Сравнить результаты с вариантом до оптимального назначения приоритетов.

7. Задать и зафиксировать значение  $\rho_1 = \lambda_1 \cdot v_{cp1} = 0,9$ . Задавая значения коэффициент загрузки ОА  $\rho = \rho_1 + \rho_2$  в диапазоне  $1 \div 1,9$  путем изменения  $\lambda_2$ , найти с точностью  $\Delta\rho = 0,01$  границу сохранения статического режима работы для высокоприоритетного потока заявок применяя методику п. 3 (при изменении времени моделирования в 5-10 раз основные характеристики высокоприоритетного потока  $l_{cp2}$ ,  $w_{cp2}$ ,  $u_{cp2}$  практически не должны изменяться). Зафиксировать для найденной граничной величины  $\rho$  значения  $l_{maxi}$ ,  $l_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$  для  $i = 1, 2$ .

8. Исследуется СМО с квантованием процессорного времени (рисунок 5). GPSS модель представлена на рисунке 6. Функции распределения интервала прихода заявок и длительности обслуживания заявок – экспоненциальные. На вход СМО подаются два потока заявок  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  одного приоритета, но с разным средним временем обслуживания  $v_{cp1}$  и  $v_{cp2}$ . (длинные и короткие работы). Время моделирования должно обеспечивать прохождение через СМО не менее 20000 заявок.

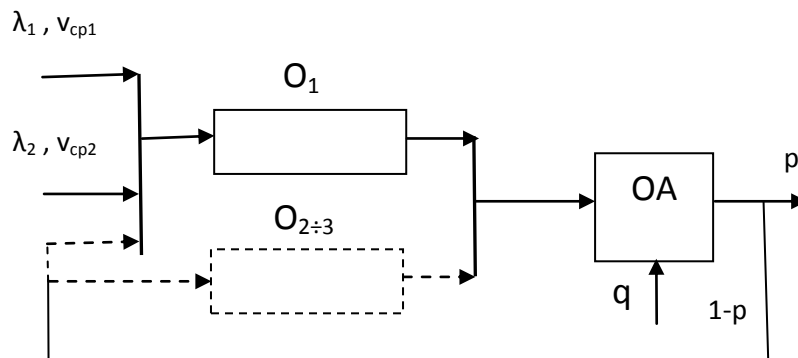


Рисунок 5

Значение  $v_{cp1}$  – определяются вариантом задания и остается постоянной. Для сравнимости результатов значения частичных загрузок  $\rho_1 = \lambda_1 \cdot v_{cp1}$ ;  $\rho_2 = \lambda_2 \cdot v_{cp2}$  и суммарной загрузки  $\rho = \rho_1 + \rho_2$  необходимо все время поддерживать постоянными и равными 0,4; 0,5 и 0,9 соответственно.

Значение  $v_{cp2}$  – при исследовании характеристик изменяется от  $v_{cp1}$  до  $0,1 \cdot v_{cp1}$  (отношение  $v_{cp1}/v_{cp2}$  от 1 до 10).

Transit	TABLE	M1,0,30,25	;Transit time
EXPON	FUNCTION	RN1,C24	
		0,0/1,104/2,222/3,335/4,509/5,69/6,915/7,12/75,138	
		.8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2	

.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8

	GENERATE 125,FN\$EXPON,,,3	; Поток трудоемких заявок
		; Начальный приоритет высокий
	ASSIGN 1,50,EXPON	; 1-й параметр - время обслуживания
	ASSIGN 2,5	; 2-й параметр - время кванта
	ASSIGN 3,1	; 3-й параметр – число проходов ОА
	TRANSFER ,MQPR1	
	GENERATE 10,FN\$EXPON,,,3	; Поток быстро обслуживаемых заявок
		; Начальный приоритет высокий
	ASSIGN 1,5,EXPON	; 1-й параметр - время обслуживания
	ASSIGN 2,5	; 2-й параметр - время кванта
	ASSIGN 3,1	; 3-й параметр – число проходов ОА
MQPR1	QUEUE QPR1	
	SEIZE PRM	
	DEPART QPR1	
MADV	TEST LE P2,P1,MET2	; Если кванта не хватило
	ADVANCE P2	; Задержка на квант
MET1	RELEASE PRM	
	ASSIGN 1-,P2	; Остаток времени обслуживания
	TEST LE P1,0,MQPR2	; Если проход ОА последний
	TABULATE TRANSIT	; Время пребывания
	TERMINATE 1	
MET2	ADVANCE P1	; Если кванта хватило
	TRANSFER ,MET1	; Задержка на остаток времени обл.
MQPR2	TEST NE P3,2,MQPR3	; Если проход был первый
	PRIORITY 2	; Понизить приоритет
	QUEUE QPR2	
	SEIZE PRM	
	DEPART QPR2	
	ASSIGN 3,2	; Второй проход
	TRANSFER ,MADV	
MQPR3	PRIORITY 1	; Если проход был второй
	QUEUE QPR3	; Еще понизить приоритет
	SEIZE PRM	
	DEPART QPR3	
	TRANSFER ,MADV	
	START 25000	

Рисунок 6

Модель СМО на рисунке 5 имеет три варианта:

- первый – очереди  $O_{2+3}$  отсутствуют, поток не дообслуженных в течение очередного кванта заявок поступает в общую очередь  $O_1$  с тем же приоритетом, что и входной поток;

- второй – кроме очереди  $O_1$  имеется очередь  $O_2$ , очередь  $O_3$  отсутствует, поток не дообслуженных за один квант заявок поступает в очередь  $O_2$  с более низким приоритетом чем входной поток;
- третий – кроме очереди  $O_1$  имеется еще две очереди  $O_2$  и  $O_3$ . Не дообслуженная за один квант заявка первый раз поступает в  $O_2$  с более низким приоритетом, чем входной поток, второй и последующие разы – в  $O_3$  с еще более низким приоритетом, чем в  $O_2$ .

Примечание 1: GPSS модель СМО на рисунке 6 представлена для третьего варианта.

Примечание 2: При выключенном механизме квантования все три варианта совпадают по результатам моделирования.

9. Выключить механизм квантования, задав достаточно большое значение кванта, например  $q \geq 10 \cdot v_{cp1}$ .
10. Снять зависимость среднего значения времени пребывания в системе без квантования  $u'_{cp}$ , и вероятности обслуживания в текущем кванте  $p$  от отношения  $v_{cp1}/v_{cp2}$ , принимающего четыре значения: 1, 2, 5, 10.
11. Включить механизм квантования, задав значение кванта  $q = 0,1 \cdot v_{cp1}$ . Используя GPSS модель 3-го варианта снять зависимость среднего значения времени пребывания в системе с квантованием  $u_{cp}$ , и вероятности обслуживания в текущем кванте  $p$  от отношения  $v_{cp1}/v_{cp2}$ , принимающего четыре значения: 1, 2, 5, 10.
12. Построить GPSS модель 2-го варианта. Повторить измерения п. 11.
13. Построить GPSS модель 1-го варианта. Повторить измерения п. 11.
14. Построить графики зависимости отношения  $u'_{cp}/u_{cp}$  как функций от  $v_{cp1}/v_{cp2}$  для всех трех вариантов организации дисциплины дообслуживания заявок при реализации принципа SJF (пп. 10-13)
15. Построить графики зависимости вероятности обслуживания в текущем кванте  $p$  как функций от  $v_{cp1}/v_{cp2}$  для пп. 10-13.

### Содержание отчета

1. Графики зависимости  $I_{maxi}$ ,  $I_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$  для разных приоритетов  $i = 1, 2$  и  $u_{cp}$  как функций от  $\rho$  – суммарного коэффициента загрузки ОА.
2. Результаты выполнения п. 3.
3. Значение предельной загрузки СМО  $\rho$  и загрузки высокоприоритетным потоком  $\rho_2$  при сохранении стационарного режима работы СМО относительно высокоприоритетного потока заявок. Основные характеристики СМО  $I_{maxi}$ ,  $I_{cpi}$ ,  $w_{cpi}$ ,  $u_{cpi}$  для разных приоритетов  $i = 1, 2$  для найденной граничной величины  $\rho$  (п. 5).
4. GPSS модель СМО с квантованием процессорного времени для вариантов 1, 2 организации дисциплины дообслуживания заявок при реализации принципа SJF (или изменения в базовом варианте 3 при реализации вариантов 1 и 2).
5. Графики зависимости отношения средних значений времени пребывания для системы без и с квантования  $u'_{cp}/u_{cp}$  как функций от отношения длительности обслуживания длинных и коротких работ  $v_{cp1}/v_{cp2}$  для вариантов 1, 2, 3 организации дисциплины дообслуживания заявок при реализации принципа SJF.
6. Графики зависимости вероятности окончания обслуживания  $p$  как функций от отношения  $v_{cp1}/v_{cp2}$  для СМО без квантования и СМО с квантованием для вариантов 1, 2, 3 организации дисциплины дообслуживания заявок при реализации принципа SJF.

## Лабораторная работа № 6

### Динамика очереди

**Цель работы:** оценка времени переходного процесса (времени установления средней длины очереди) при стационарном режиме работы СМО; оценка скорости нарастания очереди при отсутствии стационарного режима работы СМО (перегрузка СМО) и оценка скорости рассасывания очереди при восстановлении стационарного режима работы СМО.

### Постановка задачи

Необходимо исследовать поведение очереди, которую образует транспортный поток перед сужением дороги. Среднее значение времени прохождения узкого участка  $T_y$  в нормальном режиме определяется вариантом задания. Время прохождения узкого участка распределено равномерно в диапазоне  $T_y \pm 0,8T_y$ .

Средний интервал времени между транспортными средствами на трассе  $T_{и} = 1,11T_y$ . Интервалы между транспортными средствами на трассе распределены по экспоненциальному закону.

Модель на GPSS должна обеспечить сбор статистических данных об очереди транспортных средств перед узким участком дороги.

У трассы в районе сужения могут быть три режима работы:

1. Нормальный – среднее время прохождения узкого участка равняется  $T_y$  при отсутствии на нем дополнительных заторов. Коэффициент загрузки узкого участка  $\rho < 1$  ( $\rho = T_y/T_{и} = 0,9$ ). Начальная длина очереди равна 0.

2. Аварийный – с образованием дополнительного затора на узком участке, при этом среднее время прохождения узкого участка удваивается и равняется  $2T_y$ ;  $\rho > 1$  ( $\rho = 2T_y/T_{и} = 1,8$ ).

3. Нормальный – с ликвидированным дополнительным затором на узком участке ( $\rho = T_y/T_{и} = 0,9$ ) и с начальными условиями по длине очереди образовавшимися после аварийного режима 2.

### Построение модели

Модель строится в виде непрерывной цепи блоков, к которой добавлены компоненты, предназначенные для определения статистических данных очереди. Порядок блоков в модели соответствует порядку фаз, в которых оказывается транспортное средство при движении по трассе:

- транспортные средства подходят к узкому месту с интенсивностью  $1/T_{и}$ ,
- если необходимо, ждут своей очереди,
- затем проходят узкое место с меньшей скоростью за некоторое время:  $T_y \pm 0,8T_y$ ,
- транспортные средства уходят дальше по трассе.

Модель имеет следующее графическое представление:

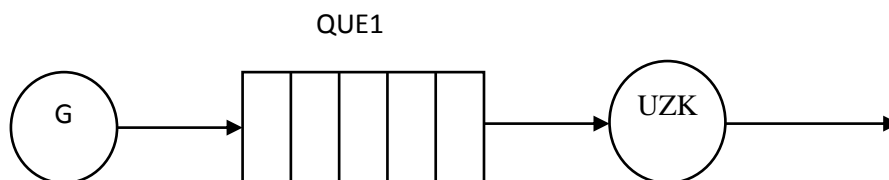


Рисунок 1

Первый сегмент программы позволяет задавать любое начальное значение длины очереди.

Второй сегмент программы непосредственно описывает моделируемую систему. В переменной LQUE0 хранится начальное значение длины очереди. В переменных NTr i хранится шкала аргументов с учетом начального значения длины очереди, по которой

после прохождения через очередь  $i$  транспортных средств фиксируется ее средняя длина. Пары блоков:

```
MET(j)    TEST EXN1,NTri,MET(j+1)
          SAVE VALUESAVi,QA$QUE1,
```

где XN1 – номер транзакта в модели (номер транспортного средства), сохраняют в величинах SAVi среднюю длину очереди после прохождения через нее  $i$  транспортных средств.

Третий сегмент является вспомогательным. С его помощью задается время моделирования.

Таблица

Элементы GPSS	Назначение
Транзакты: первый сегмент программы второй сегмент программы третий сегмент программы	Транс.средства в очереди в нач. момент Транспортные средства Таймер
Приборы: UZK	Узкое место дороги
Очереди: QUE1	Очередь сбора статистики об ожидании перед узким местом дороги

### Листинг программы

```
EXPONFUNCTIONRN1,C24
```

```
0,0/1,104/2,222/3,335/4,509/5,69/6,915/7,1.2/.75,1.38
.8,1.6/.84,1.85/.88,2.12/.9,2.3/.92,2.52/.94,2.81/.95,2.99/.96,3.2
.97,3.5/.98,3.9/.99,4.6/.995,5.3/.998,6.2/.999,7/.9998,8
```

```
LQUE0    EQU 250    ;Начальная длина очереди
```

; Первый сегмент программы - задание начальной длины очереди перед сужением

```
GENERATE 1,0,,LQUE0;Начальная длина очереди в 4-ом параметре транзакта
QUEUE QUE1,1
SEIZE UZK
DEPART QUE1,1
ADVANCE 100,60
RELEASE UZK
TERMINATE
```

; Второй сегмент программы

```
GENERATE 111,FN$EXPON ;Приход транс. средства
```

```
QUEUEQUE1,1 ;Присоединение к очереди перед сужением
SEIZEUZK ;Переход в узкое место
DEPARTQUE1,1 ;Уход из очереди
```

;Число транс.средств вошедших в сужение с учетом начальной длины очереди

NTr5 EQU LQUE0+5  
NTr10 EQU LQUE0+10  
NTr15 EQU LQUE0+15  
NTr20 EQU LQUE0+20  
NTr25 EQU LQUE0+25  
NTr50 EQU LQUE0+50  
NTr75 EQU LQUE0+75  
NTr100 EQU LQUE0+100  
NTr200 EQU LQUE0+200  
NTr500 EQU LQUE0+500  
NTr1000 EQU LQUE0+1000  
NTr2000 EQU LQUE0+2000  
NTr5000 EQU LQUE0+5000  
NTr10000 EQU LQUE0+10000  
NTr20000 EQU LQUE0+20000

TESTEXN1,NTr5,MET1 ;В сохраняемых величинах SAVi фиксируется

;средняя длина очереди QUE1

SAVEVALUE SAV5,QA\$QUE1 ;после прохождения i транс. средств

;SAVEVALUETIME5,C1 ;Можно фиксировать время вхождения i тр.ср.

MET1 TEST E XN1,NTr10,MET2  
SAVEVALUE SAV10,QA\$QUE1  
MET2 TEST E XN1,NTr15,MET3  
SAVEVALUE SAV15,QA\$QUE1  
MET3 TEST E XN1,NTr20,MET4  
SAVEVALUE SAV20,QA\$QUE1  
MET4 TEST E XN1,NTr25,MET5  
SAVEVALUE SAV25,QA\$QUE1  
MET5 TEST E XN1,NTr50,MET6  
SAVEVALUE SAV50,QA\$QUE1  
MET6 TEST E XN1,NTr75,MET7  
SAVEVALUE SAV75,QA\$QUE1  
MET7 TEST E XN1,NTr100,MET8  
SAVEVALUE SAV100,QA\$QUE1  
MET8 TEST E XN1,NTr200,MET9  
SAVEVALUE SAV200,QA\$QUE1  
MET9 TEST E XN1,NTr500,MET10  
SAVEVALUE SAV500,QA\$QUE1  
MET10 TEST E XN1,NTr1000,MET11  
SAVEVALUE SAV1000,QA\$QUE1  
MET11 TEST E XN1,NTr2000,MET12  
SAVEVALUE SAV2000,QA\$QUE1  
MET12 TEST E XN1,NTr5000,MET13  
SAVEVALUE SAV5000,QA\$QUE1  
MET13 TEST E XN1,NTr10000,MET14  
SAVEVALUE SAV10000,QA\$QUE1  
MET14 TEST E XN1,NTr20000,MET15  
SAVEVALUE SAV20000,QA\$QUE1

MET15 ADVANCE 100,60 ; Проход узкого места  
RELEASEUZZK ; Конец узкого места

TERMINATE

; Уход из модели

; Третий сегмент программы

GENERATE 1000000

; Время моделирования

TERMINATE 1

; Завершение моделирования

START 1

### **Порядок выполнения работы**

1. Задать первый режим работы трассы. Измерить среднюю длину очереди  $l_{cp1}$  перед сужением трассы. Определить время установления средней длины очереди.
2. Задать второй режим работы трассы. Определить скорость нарастания длины очереди перед сужением трассы. Определить время увеличения средней длины очереди в 10 и 100 раз по сравнению с  $l_{cp1}$  в нормальном режиме. Учитывая дискретность шкалы отсчета провести линейную интерполяцию величин SAVi.
3. Задать третий режим работы трассы. Задать начальное значение длины очереди, равное  $100 \cdot l_{cp1}$ . Определить скорость рассасывания длины очереди перед сужением трассы. Определить время уменьшения средней длины очереди в 2 и 10 раз по сравнению начальным значением после аварийного режима. Учитывая дискретность шкалы отсчета провести линейную интерполяцию величин SAVi.

Замечание. Приближенно, время прохождения  $i$ -го транзакта в системе можно определить как  $(i + l_{cp}) \cdot T_i$ .

### **Содержание отчета**

1. Коэффициент загрузки узкого участка в 1, 2 и 3 режимах.
2. Средняя длина очереди  $l_{cp1}$  в нормальном режиме. Время установления  $l_{cp1}$ .
3. Скорость нарастания длины очереди в аварийном режиме. Время увеличения средней длины очереди в 10 и 100 раз по сравнению с  $l_{cp1}$  в нормальном режиме
4. Скорость рассасывания длины очереди перед сужением трассы после перехода из аварийного в нормальный режим. Время уменьшения средней длины очереди в 2 и 10 раз по сравнению начальным значением  $100 \cdot l_{cp1}$  после аварийного режима.



## Рекомендуемая литература

1. Афонин В.В., Федосин С.А., Моделирование систем. Практикум по GPSS/PC. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2001.
2. Шрайбер Т. Дж. Моделирование на GPSS. М.:Машиностроение, 1980.
3. Феррари Д. Оценка производительности вычислительных систем. М.: Мир, 1981.
4. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004.– 320 с.: ил. (Серия «Проектирование»).
5. Гнеденко Б.В, Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987.
6. Ермаков С.М., Мелос В.Б., Математический эксперимент с моделями сложных стохастических систем. – СПб.: Изд. ГУ, 1992.
7. Колбанев М.О., Яковлев С.А. Модели и методы оценки характеристик обработки информации в интеллектуальных сетях связи. – СПб.: Изд-во Госуниверситета, 2002.
8. Моделирование. Основные понятия и определения. Этический кодекс. Сборник статей под редакцией М.Б. Игнатьева и Л.А. Мироновского. – СПб., 2001
9. Поляк Ю.Г., Филимонов В.А. Статистическое машинное моделирование средств связи. – М.: Радио и связь, 1988.
10. Романцев В.В., Яковлев С.А. Моделирование систем массового обслуживания. – СПб.: Полином, 1995.
11. Советов Б.Я. Информационная технология. – М.: Высшая школа, 1994.
12. Советов Б.Я., Яковлев С.А., Моделирование систем (3-е изд.). – М.: Высшая школа, 2001.
13. Советов Б.Я., Яковлев С.А., Моделирование систем. Практикум. – М.: Высшая школа, 1999.
14. Яковлев С.А. Комплексный компьютерный учебник «Имитационное моделирование систем»/Тез.докл. Междунар. конф. «Современные технологии обучения». – СПб., 1995.