

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова  
Факультет физики, математики и информационных технологий

# **ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**Основы теории массового обслуживания**

**Павлодар**

Ф СО ПГУ 7.18.1/14

УТВЕРЖДАЮ

**Декан ФФМиИТ**

\_\_\_\_\_ С.К. Глеуменов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

Составитель: магистр ИС, старший преподаватель Вихлянова Т.В

(должность, уч. степень, звание, подпись)

Кафедра Информатика и информационные системы

### **ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

Основы теории массового обслуживания

для студентов специальности (ей) 050703 Информационные системы

Рекомендована на заседании кафедры от «\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

Протокол № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Нурбекова Ж.К.

(подпись)

Одобрена методическим советом факультета ФФМиИТ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г. Протокол № \_\_\_\_\_

Председатель МС \_\_\_\_\_ Даутова А.З.

## Тема 1 Модели массового обслуживания

С системами массового обслуживания (СМО) мы встречаемся повседневно. Любому из нас приходилось когда-то ждать обслуживания в очереди (например, в магазине, на авто заправке, в библиотеке, кафе и т. д.). Аналогичные ситуации возникают при потребности воспользоваться телефонной связью или выполнить свою программу на компьютере. Более того, любое производство можно представить как последовательность систем обслуживания. К типичным системам обслуживания относят также ремонтные и медицинские службы, транспортные системы, аэропорты, вокзалы и другие.

Особое значение приобрели такие системы при изучении процессов в информатике. Это, прежде всего, компьютерные системы, сети передачи информации, ОС, базы и банки данных. Системы обслуживания играют значительную роль в повседневной жизни. Опыт моделирования разных типов дискретных событийных систем свидетельствует о том, что приблизительно 80% этих моделей основаны на СМО.

Что же характеризует эти системы как СМО? Такие системы можно описать, если задать:

- 1) входящий поток требований или заявок, которые поступают на обслуживание;
- 2) дисциплину постановки в очередь и выбор из нее;
- 3) правило, по которому осуществляется обслуживание;
- 4) выходящий поток требований;
- 5) режимы работы.

Входящий поток. Для задания входящего потока требований необходимо описать моменты времени их поступления в систему (закон поступления) и количество требований, которое поступило одновременно. Закон поступления может быть детерминированный (например, одно требование поступает каждые 5 мин) или вероятностный (требования могут появляться с равной вероятностью в интервале  $5::i:2$  мин). В общем случае входящий поток требований описывается распределением вероятностей интервалов времени между соседними требованиями. Часто предполагают, что эти интервалы времени независимые и имеют одинаковое распределение случайных величин, которые образуют стационарный входящий поток требований. Классическая теория массового обслуживания рассматривает так называемый пуассоновский (простейший) поток требований. Для этого потока число требований  $k$  для любого интервала времени распределено по закону Пуассона.

На практике обоснованием того, что входящий поток требований имеет распределение Пуассона, является то, что требования поступают от большого числа независимых источников за определенный интервал времени. Примерами могут быть вызовы абонентов в телефонной сети, запросы к распределенной базе данных от абонентов сети за некоторое время и другие. Для того, чтобы при моделировании задать пуассоновский поток требований

в систему, достаточно задать экспоненциальное распределение интервалов времени поступления для соседних требований.

Дисциплины постановки в очередь и выбора из нее определяют порядок постановки требований в очередь, если заняты устройства обслуживания, и порядок выбора из очереди, если освобождается обслуживающее устройство. Простейшая дисциплина допускает постановку в очередь в порядке поступления требований. Такую дисциплину называют «раньше поступил – раньше отслужился» (РПРО, в англоязычной литературе FIFO ~ First In-First Out), например, очередь к телефону-автомату.

Организация очереди по правилу «последний поступил -' первый отслужился» (ПППО, в англоязычной литературе LIFO - Last InFirst Out) допускает, что на обслуживание выбираются последние требования из очереди. Это правило также называется «стеком» или «магазином» .

Правило выбора из очереди может быть случайным (RANDOM).

Возможна также организация выбора из очереди по параметрам (например, мужчины в очереди пропускают женщин вперед). На очередь могут накладываться ограничения по длине очереди или по времени пребывания в ней. Например, если в очереди находится более трех требований, то новое требование, которое поступило, покидает систему; или, если время пребывания в очереди более двух минут, то требование покидает систему.

Очередь может быть с ограниченным количеством мест ожидания в ней - это так называемый буфер (например, бункер, в который поступают заготовки раньше, чем они будут обработаны станком).

Для ускорения работы компьютеров используются буферы при об, мене информацией между быстрыми и медленными устройствами (буферы ввода-вывода). Информация заранее размещается в буфере, а потом считывается из него. В сетях ЭВМ буферы используются для организации очередей сообщений или пакетов, если линия связи занята.

Правила обслуживания характеризуются длительностью обслуживания (распределением времени обслуживание), количеством требований, которые обслуживаются одновременно и дисциплиной обслуживания. Время обслуживания бывает детерминированным или заданным вероятностным законом распределения. Обслуживание может организовываться с помощью одного устройства - это так называемые системы с одним устройством (каналом) обслуживания - или с несколькими идентичными устройствами обслуживания, например, если установлено несколько кабин с телефонами-автоматами. Системы с идентичными устройствами обслуживания называют многоканальными системами. Устройства обслуживания могут быть объединены в последовательную цепочку. Это многофазные системы обслуживания, в которых требования последовательно проходят несколько фаз обслуживания, перед тем

Очереди как элементы упорядочения процессов в производстве, сбыте и потреблении товаров имеют место во всех сферах маркетинговой деятельности. Основные параметры очереди характеризуются свойствами

входящего потока требований, потока обслуживания и дисциплины очереди. Расчеты систем обслуживания производятся с целью уменьшения нагрузок на обслуживающие приборы, уменьшения длины очередей, снижения затрат на обслуживание, увеличения пропускной способности системы и т. п. Основные показатели работы систем: длина очереди, время нахождения требования в системе, доля времени, в течение которого прибор бывает свободен.

Наиболее универсальной моделью системы массового обслуживания является модель с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением времени обслуживания.

Распределение Пуассона – распределение вероятностей случайных величин  $x_i$ , принимающих целые неотрицательные значения  $k = 0, 1, 2, \dots, n$  с вероятностями [3, 4, 9, 20]

$$(5.1)$$

где  $\lambda > 0$  – параметр.

Математическое ожидание, дисперсия и моменты более высоких порядков равны  $\lambda$ . Сумма независимых случайных величин  $X_i$ , имеющих распределение Пуассона с параметрами  $\lambda_i$ , подчиняется также распределению Пуассона с параметрами  $\sum \lambda_i$ . Это предельное распределение безгранично делимо: если сумма случайных величин имеет распределение Пуассона, то каждое слагаемое можно представить как распределенное по закону Пуассона.

Поток событий – это последовательность событий, происходящих одно за другим в случайные моменты времени.

Поток называют стационарным, если вероятность появления некоторого числа событий в какой-то промежуток времени зависит только от величины временного промежутка.

Поток событий называют потоком без последствия, если для любых не перекрывающихся участков времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от числа событий, попадающих на другие.

Поток событий называют ординарным, если вероятность попадания на элементарный участок  $\Delta t$  двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события.

Если поток обладает всеми тремя свойствами, он называется простейшим (пуассоновским).

Время обслуживания (как и время между поступлениями в систему обслуживания), когда поток обслуживания (или поступления в систему) обладает этими тремя свойствами, распределено по экспоненциальному закону

$$g(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (5.2)$$

где  $\mu$  – параметр, величина, обратная среднему времени обслуживания одной заявки:  $\mu = 1/m_{t \text{ обсл.}}$

Величина  $\lambda$  должна быть меньше, чем  $\mu$ , иначе очередь будет расти до бесконечности по геометрической прогрессии.

Когда входящий поток – пуассоновский, а время обслуживания распределено по экспоненциальному закону, при одном приборе обслуживания, система обозначается  $M/M/1$ . Буква  $G$  в обозначении системы массового обслуживания означает произвольное распределение,  $E_k$  – распределение Эрланга порядка  $k$ ,  $D$  – детерминированный поток (равные промежутки времени между поступлениями требований в систему или применительно к прибору обслуживания – неслучайное и одинаковое время обслуживания для всех требований). Например,  $E_3/G/2$  означает, что входящий поток системы – эрланговский третьего порядка, поток обслуживания имеет произвольное распределение времени обслуживания, число обслуживающих приборов равно двум.

При формулировании задачи важную роль играет дисциплина очереди, здесь рассматривается следующая: требование приходит в систему и дожидается обслуживания, а например, не уходит, если очередь велика, и, кроме того, каждое требование обслуживается в свою очередь без каких-либо приоритетов.

Отношение  $\lambda/\mu = \rho$  – загрузка системы (коэффициент загрузки).

Расчетные формулы для системы  $M/M/1$  имеют следующий вид:

вероятность того, что обслуживающий прибор свободен,

$$P_0 = 1 - \rho. \quad (5.3)$$

среднее число требований в системе (находящихся в очереди и на обслуживании)

$$E(n) = \rho/(1 - \rho); \quad (5.4)$$

среднее время ожидания обслуживания

$$E(t) = \rho/[\mu(1 - \rho)]; \quad (5.5)$$

средняя длина очереди, ожидающей обслуживания,

$$E(n_o) = \rho^2/(1 - \rho); \quad (5.6)$$

среднее время, проведенное требованием в системе,

$$E(t_c) = 1/[\mu(1 - \rho)]. \quad (5.7)$$

*Пример 1.* Требования поступают на обслуживающее устройство (в кассу магазина для оплаты покупок) случайно, причем средний промежуток времени между поступлениями требований равен 1,0 мин, среднее время обслуживания – 0,8 мин. Определить: среднее число требований в системе; среднее время ожидания обслуживания; среднюю длину очереди, ожидающей обслуживания; среднее время, проведенное требованием в системе; вероятность отсутствия требований в системе, если она состоит из одного прибора и имеет пуассоновский входящий поток и экспоненциальное время обслуживания ( $M/M/1$ ).

*Решение.* Так как средний промежуток времени между поступлениями требований известен:  $m_{t\text{ пост}} = 1$  мин, то среднее число покупателей, приходящих к кассе для расчета за покупки в течение 1 мин,

$$\lambda = 1/m_{t\text{ пост}}; \lambda = 1/1 = 1 \text{ покупатель/мин.}$$

Поскольку среднее время обслуживания  $m_{t\text{ обсл}} = 0,8$  мин, то среднее число покупателей, обслуживаемых в 1 мин,

$$\mu = 1/m_{t\text{ обсл}}; \mu = 1/0,8 = 1,25,$$

т. е. в среднем кассир обслуживает более одного покупателя в минуту.

Тогда вероятность простоя системы (в данном случае кассы и кассира)

$$P_0 = 1 - \rho; P_0 = 1 - 0,8 = 0,2,$$

т. е. 20 % рабочего времени система простаивает.

Среднее число покупателей в системе (стоят в очереди плюс один рассчитывается за покупку)

$$E(n) = \rho/(1 - \rho); E(n) = 0,8/(1 - 0,8) = 4 \text{ покупателя.}$$

Среднее время ожидания в очереди

$$E(t) = \rho/\mu(1 - \rho); E(t) = 0,8/(1,25 \cdot 0,2) = 3,2 \text{ мин.}$$

Средняя длина очереди, ожидающей обслуживания,

$$E(n_0) = \rho^2/(1 - \rho); E(n) = 0,8^2/(1 - 0,8) = 3,2 \text{ покупателя.}$$

т. е., как правило, немногим больше трех покупателей стоят в очереди.

Среднее время, проведенное покупателем в системе, ожидая сначала в очереди, а потом и собственно своего обслуживания кассиром,

$$E(t_c) = 1/\mu(1 - \rho); E(t_c) = 1/[1,25 \cdot (1 - 0,8)] = 4 \text{ мин.}$$

*Пример 2.* При этих же условиях задачи рассматривается ситуация: добавлен еще один кассовый аппарат с кассиром при тех же условиях: все покупатели стоят в одной очереди и, как только один из кассиров освобождается, первый из стоящих в очереди поступает к нему на обслуживание (т. е. имеет место система  $M/M/2$ ). Как изменятся первые три основных показателя?

*Решение.* Вероятность простоя системы

$$P_0 = (2 - \rho)/(2 + \rho); P_0 = (2 - 0,8)/(2 + 0,8) = 0,43,$$

т. е. 43 % рабочего времени кассиры будут простаивать.

Среднее число требований в системе

$$E(n) = 2\rho/(4 - \rho^2); E(n) = 2 \cdot 0,8/(4 - 0,8^2) = 0,48,$$

т. е. практически очереди нет.

Среднее время ожидания обслуживания

$$E(t) = \rho^2/[\mu(4 - \rho^2)]; E(t) = 0,8^2/1,25(4 - 0,8^2) = 0,15 \text{ мин.}$$

При увеличении числа обслуживающих приборов на единицу практически не стало очереди и покупателям не приходится терять время в ней.

Модели  $M/M/m$  (здесь  $m$  – число обслуживающих приборов) можно использовать в любых случаях, нужно только помнить, что они дают завышенные показатели при одних и тех же значениях  $\lambda$  и  $\mu$ , когда законы распределения величин, формирующих случайные потоки, более упорядочены.

## Тема 2 Вероятностные сети систем массового обслуживания

Существует большое множество методов анализа сетей связи, среди которых основу составляют методы математического анализа и имитационного моделирования. В последнее время большой интерес представляет также тензорный метод анализа сетей [1], который можно выделить в отдельную категорию, поскольку идея метода коренным образом отличается от остальных методов. Тензорный метод занимает особую позицию, являясь не похожим на другие методы. Особенностью данного метода является то, что его автор попытался объединить все процессы, происходящие в системе, и взглянуть на систему с более общей точки зрения. Так, при анализе какой-либо сложной сети, необходимо сначала получить результаты для одного элемента данной сети, а затем распространить эти результаты на всю сеть. Более того, введение таких понятий, как «преобразование», «инвариантность» и «группа» приводит к появлению новой математической сущности. Такой сущностью является геометрический объект, который представлен не одной, а бесконечным множеством матриц. Изменение системы координат (топологии сети) приводит к изменению компонентов геометрического объекта (компонентов матриц), при этом сам геометрический объект остается неизменным. Это позволяет рассматривать целый класс сетей как один объект, а переход между ними осуществлять с помощью специальной матрицы перехода.

Математический анализ сетей связи зачастую требует больших усилий, поскольку сущность методов состоит в нахождении аналитических соотношений между искомыми величинами. Вывод формул оказывается достаточно сложным, особенно для сетей с большим числом элементов, но полученные результаты имеют большую ценность, поскольку дают возможность прямого решения поставленной задачи и анализа зависимости результата от изменения различных факторов. Аналитические соотношения получены, главным образом, для сетей с небольшим числом элементов. Имитационное моделирование, напротив, практически не требует трудоемкого вывода математических формул – всё, что требуется от исследователя, это знание средств имитационного моделирования и параметров моделируемой системы. При этом появляется сразу несколько очевидных преимуществ: можно смоделировать практически любые физические объекты, экспериментальное исследование которых затруднено или невозможно. В этом случае имитационное моделирование приобретает особое значение как метод подтверждения результатов, полученных другими методами, заменяя собой практический эксперимент. В данной работе применение среды GPSS показало, что тензорный метод анализа позволяет при заданных интенсивностях поступления заявок и объемах буферов получать достоверные результаты для верхней границы среднего времени задержки в узлах обслуживания, что позволяет говорить о возможности применения данного метода к анализу телекоммуникационных сетей большой размерности.

Моделью сетей интегрального обслуживания в данной работе являются сети массового обслуживания двух типов: контурные и ортогональные. Основные результаты по тензорному анализу сетей представлены в [1, 2].

При анализе сетей интегрального обслуживания с помощью имитационного моделирования составляющими общей модели являются модели систем массового обслуживания с различными дисциплинами обслуживания.

Система массового обслуживания (СМО) состоит из обслуживающего прибора и очереди. Блок-схема такой системы представлена на рис. 1.

**Рис. 1. Блок-схема системы массового обслуживания**

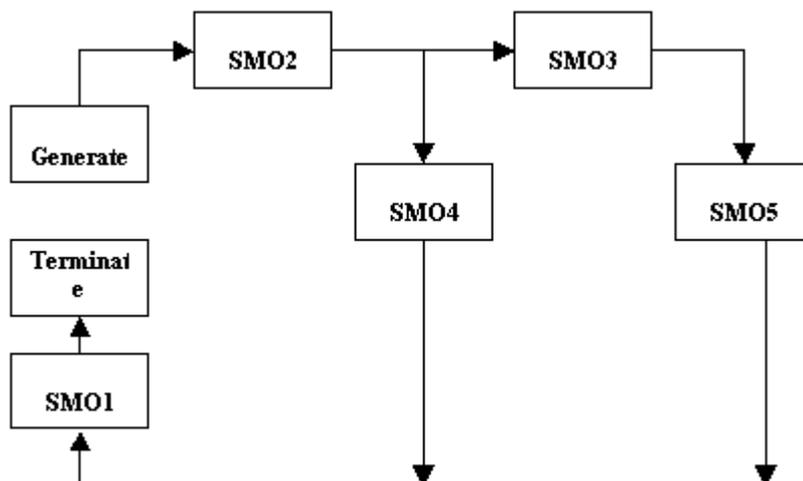
Текст программы на языке GPSS может выглядеть следующим образом:

```
GENERATE      (Exponential (1,0,T))
TEST L       Q$Line1,N, Destroy
QUEUE       Line1
SEIZE       SMO1
ADVANCE     (Exponential (1,0,To))
RELEASE     SMO1
DEPART     Line1
```

В данной программе блок GENERATE создает поток транзактов, поступающий на СМО. С помощью блока TEST задается ограничение размера буфера N. Блоки QUEUE и DEPART необходимы для накопления информации о средней длине очереди и времени задержки.

При моделировании сети связи необходимо произвести объединение СМО в соответствии со структурой сети.

Транзакты представляют собой заявки, циркулирующие в системе, а системы массового обслуживания выполняют функции обработки и маршрутизации сообщений. Обобщенная блок-схема реализации сети при имитационном моделировании приведена на рис. 2.



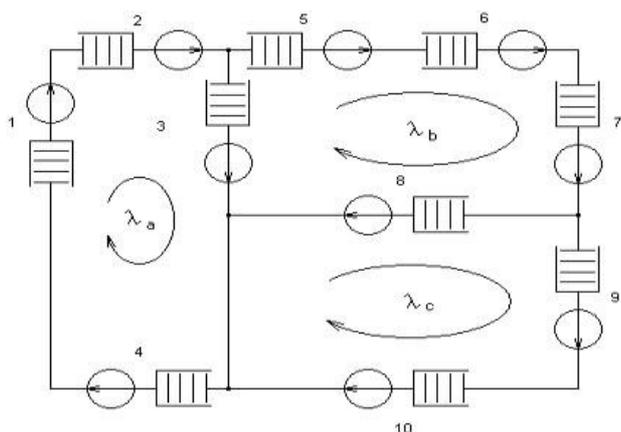
**Рис. 2. Обобщенная блок-схема сети связи**

Особенностью сети является взаимосвязанность систем массового обслуживания между собой: транзакты не удаляются после каждой системы массового обслуживания, а поступают на следующую СМО, в результате чего происходит продвижение сообщений по сети. Следует заметить, что в случае ограниченного буфера в СМО часть сообщений теряется, и поток на выходе системы массового обслуживания отличается от первоначального. Кроме того, происходит изменение структуры самого потока сообщений.

Рассмотрим моделирование контурной сети интегрального обслуживания с СМО вида М/М/1/Ν. Сравнение результатов моделирования будем производить с расчетом характеристик сети с помощью тензорного метода.

Расчет тензорным методом позволяет анализировать характеристики сетей, состоящих практически из любого числа систем массового обслуживания. Увеличение числа СМО приводит лишь к увеличению времени расчета без значительного усложнения самого принципа вычислений.

Для анализа использована сеть, состоящая из 10 систем массового обслуживания. Структура такой сети приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Структура анализируемой сети**

Постановка задачи звучит следующим образом: заданы средние длины очередей систем массового обслуживания и средние значения времени задержки пакетов (сообщений). Необходимо определить такие интенсивности потоков сообщений в ветвях, при которых значения средних длин очередей и времен задержек будут соответствовать заданным.

Решение системы уравнений [1, 2] дает следующие значения интенсивностей потоков сообщений в ветвях и контурах:  $\lambda_a = 0.09831$  Эрл,  $\lambda_b = 0.0644$  Эрл,  $\lambda_c = 0.02318$  Эрл.

Имитационное моделирование производится на основе заданных интенсивностей потоков сообщений и фиксированных объемов буферов.

Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Значения, полученные как тензорным методом, так и методом имитационного моделирования, отличаются не более чем на 1,5 процента. Во

многом эти погрешности обусловлены использованием при имитационном моделировании интенсивностей, отличных от тех, которые были получены тензорным методом. Это объясняется использованием целочисленных значений временных задержек при моделировании систем массового обслуживания и создании потоков вызовов.

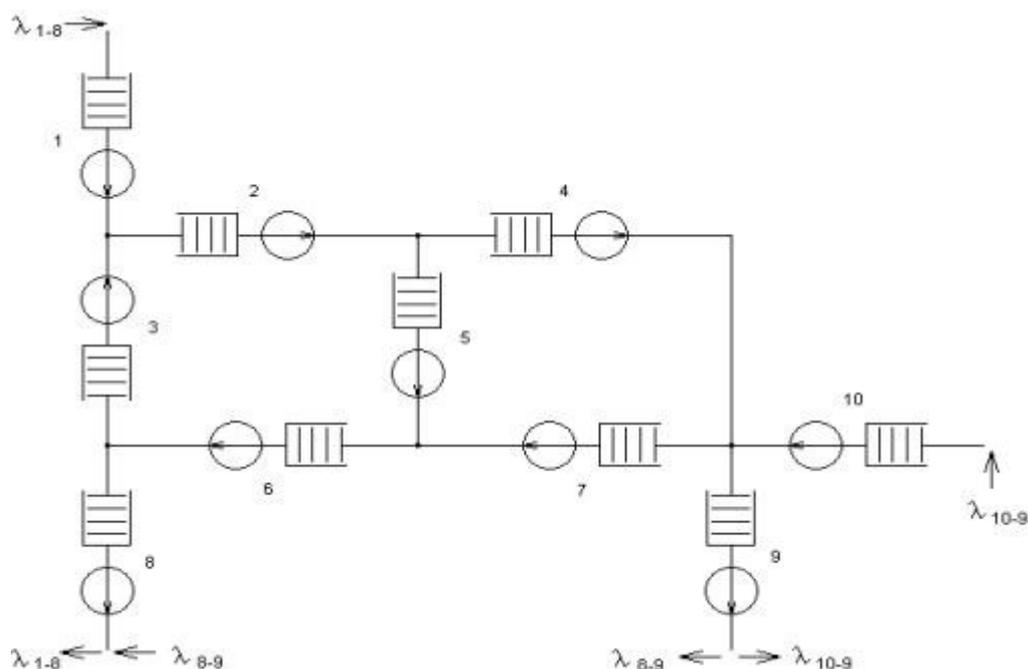
**Таблица 1**

**Результаты исследования контурной сети двумя методами**

(ТМ – тензорный метод, ИМ – имитационное моделирование, П – относительная погрешность)

СМ О	$\lambda$ , Эрл	Средние длины очереди			Средние временные задержки, с		
		ТМ	ИМ	П, %	ТМ	ИМ	П, %
1	0,098	1,215	1,214 0,08	12,56	12,567	0,05	
2	0,096	1,877	1,876	0,05	19,50	19,503	0,02
3	0,031	0,299	0,298	0,33	10,36	10,350	0,09
4	0,073	1,853	1,827	1,40	25,60	25,221	1,48
5	0,064	5,610	5,598	0,22	90,60	90,764	0,17
6	0,058	4,310	4,295	0,35	73,85	73,871	0,03
7	0,051	1,928	1,921	0,36	36,2	36,116	0,23
8	0,019	2,310	2,295	0,65	89,50	89,843	0,38
9	0,023	3,010	2,989	0,70	114,00	113,02	0,86
10	0,021	1,900	1,885	0,78	77,0	77,784	1,00

Кроме контурных сетей особый интерес представляют ортогональные сети. В данной работе для анализа использована ортогональная сеть, состоящая из 10 систем массового обслуживания с классификацией М/М/1/Н. Структура такой сети приведена на рис. 4.



**Рис. 4. Структура анализируемой сети**

Постановка задачи звучит следующим образом: заданы средние длины очередей систем массового обслуживания и средние величины временных задержек пакетов (сообщений), а также интенсивности воздействующих сообщений. Необходимо определить такие интенсивности потоков сообщений в ветвях, при которых задержки сообщений в системах массового обслуживания и средние значения длины очередей в соответствующих ветвях будут соответствовать заданным величинам. Решение системы уравнений дает следующие значения интенсивностей потоков сообщений в ветвях и средних длин очередей:  $\lambda_a = 0,01458$  Эрл,  $\lambda_b = 0,008$  Эрл,  $N_1 = 0,112$ ,  $N_8 = 1,24$ ,  $N_9 = 0,675$ ,  $N_{10} = 1,67$ .

Имитационное моделирование производится на основе заданных интенсивностей потоков сообщений и фиксированных объемов буферов. Результаты расчета тензорным методом и методом имитационного моделирования сведены в таблицу 2.

**Таблица 2**  
**Сравнение результатов, полученных обоими методами**  
(П – погрешность)

СМ О	Тензорный метод		Имитационное моделирование			
	Среднее время задержки $T_i$	Средняя длина очереди $N_i$	Среднее время задержки $T_i$	Средняя длина очереди $N_i$	П $\delta N$ , %	П $\delta T$ , %
0,773 52,60 60,77 10,25	11,3	0,112	11,278	0,113	0,885	0,195

90,73 01						
354,0 2	453,0	2,110	450,547	2,084	1,232	0,542
4	254,3	1,875	259,303	1,847	1,493	1,967
5	270,0	1,870	273,363	1,839	1,658	1,230
6	190,0	1,785	191,983	1,780	0,280	1,033
7	935,0	2,330	925,045	2,366	1,522	1,065
8	276,0	1,240	280,041	1,260	1,587	1,443
9	49,0	0,675	48,886	0,686	1,630	0,233
10	173,0	1,67	173,939	1,667	0,178	0,540

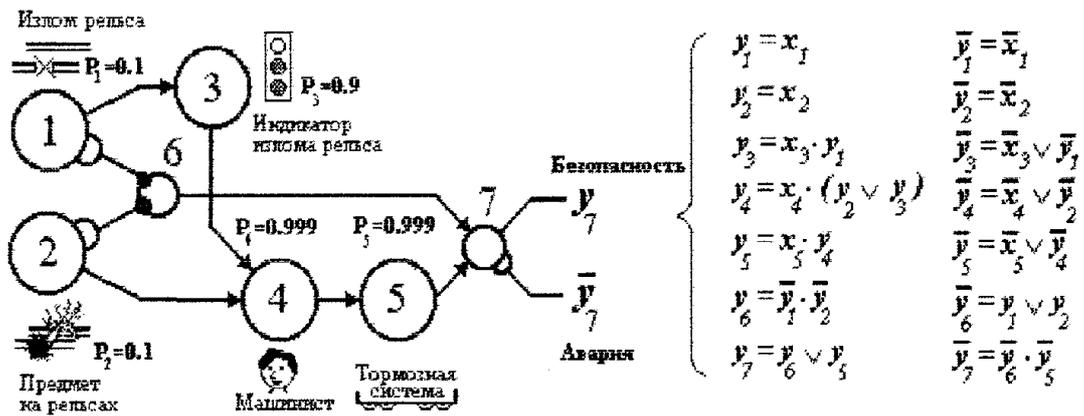
Результаты позволяют сделать очевидные выводы: значения средней длины очереди и среднего времени задержки, полученные тензорным методом и методом имитационного моделирования, практически совпадают с точностью до 2 процентов. При этом средняя погрешность составляет порядка одного процента, а максимальная погрешность не превышает 1,967 %. Максимальная погрешность наблюдается в случае СМО с номером 4, для которой загрузка является наибольшей и составляет 0,725. Значительная погрешность во многом может быть обусловлена формулой расчета вероятности потерь в системе массового обслуживания, неточность которой возрастает при увеличении размера буфера и загрузки СМО.

Помимо этого, погрешность объясняется использованием формулы для расчета вероятности потерь на основе предполагаемых интенсивностей потоков сообщений, которые в общем случае отличаются от действительных интенсивностей, что имеют место в исследуемой сети.

В заключение следует отметить, что использование пакета GPSS World не только обеспечивает подтверждение результатов, полученных с помощью аналитического метода анализа сетей, но и позволяет в совокупности с тензорным методом синтезировать сети с заданными характеристиками, что дает значительный выигрыш как по времени, так и по стоимости исследований телекоммуникационных сетей.

### **Тема 3 Вероятностное моделирование**

Излагаются новые результаты развития общего логико-вероятностного метода для автоматического построения аналитических, статистических, марковских и сетевых математических моделей систем произвольной структуры.



**Общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ)** включает в себя следующие четыре этапа [1,2]: 1) постановка задачи моделирования путем построения специальной структурной схемы функциональной целостности (СФЦ); 2) определение логической функции работоспособности системы (ФРС); 3) построение многочлена расчетной вероятностной функции (ВФ); 4) вычисление вероятностных показателей системы. Современная теория и технология автоматизированного ОЛВМ [3-6][основывается на ручной структурной постановке задачи моделирования, путем построения СФЦ исследуемой системы. Все последующие этапы определения расчетных математических моделей (логической и вероятностной) выполняются автоматически с помощью ЭВМ. Для этого разработаны специальные программные комплексы автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) [7].

Технологию автоматизированного ОЛВМ проиллюстрируем простым примером построения математических моделей безопасности, аварии и риска гипотетического участка железной дороги (ж.д.). СФЦ системы приведена на рис. 1.

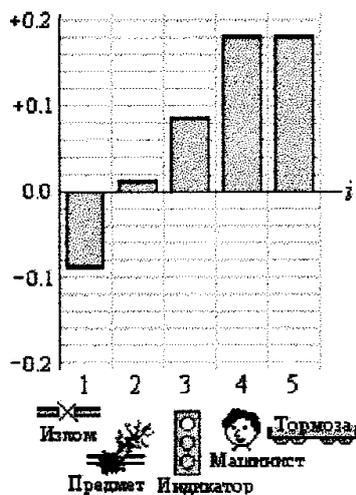
Она состоит из пяти логически связанных бинарных событий:  $x_1$ - излом рельса,  $x_2$ - предмет на рельсах;  $x_3$ - безотказная работа индикатора излома рельса;  $x_4$ - своевременное включение машинистом тормозной системы поезда;  $x_5$ - безотказность тормозной системы. Подробное описание постановки и ручного решения данной задачи приведено в [4]. Здесь мы остановимся на технологических аспекты использования ОЛВМ для автоматического построения нескольких видов математических моделей систем, структуры которых могут быть представлены с помощью аппарата схем функциональной целостности.

**Технология автоматизированного аналитического ОЛВМ** предусматривает ввод в ЭВМ СФЦ системы, вероятностных параметров ее элементов и логического критерия исследуемого режима ее функционирования. В примере критерием безопасности является выходная функция  $y_7$ . Далее, с помощью ПК АСМ [7], автоматически формируются логическая ФРС и многочлен расчетной вероятностной функции безопасности:

$$y_j = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (1)$$

$$\varphi_{j, k} = \varphi_{j, k} \cdot 0 \quad (2)$$

С помощью ОЛВМ можно автоматически получать логические и вероятностные модели большой размерности, до нескольких сотен и тысяч слагаемых. В отличие от классических монотонных ЛВМ, общий логико-вероятностный метод реализует функционально полный набор операций алгебры логики "И", "ИЛИ", "НЕ". Это позволяет автоматически строить как все виды монотонных, так и новый класс - немонотонные аналитические модели систем произвольной структуры. В настоящее время в автоматизированном ОЛВМ реализованы следующие новые возможности моделирования.



Учет в вероятностной модели системы различных законов распределения вероятностей ее элементов (экспоненциальный, нормальный, Вейбулла-Гнеденко и др.).

1. Расчет показателей роли отдельных элементов в определении общесистемной вероятностной характеристики:

$$\xi_i = P_E(\text{при } P_i = 1) - P_E(\text{при } P_i = 0) - \text{значимость}$$

$$e_i^+ = P_E(\text{при } P_i = 1) - P_E - \text{положительный вклад}$$

$$T \quad \varepsilon \quad k \quad - \text{отрицательный вклад}$$

На рис. 2 приведены графики значимости элементов в обеспечение безопасности рассматриваемого участка ж.д.

2. Учет групп несовместных (зависимых) событий (ГНС) и множественных (больше двух) собственных состояний элементов системы. Он основывается на нескольких специальных (новых) законах алгебры логики и правилах вычисления вероятностей: Если  $x_i \cdot x_j = 0$ , то:  $\bar{x}_i \vee \bar{x}_j = I$ ;  $\bar{x}_i \cdot x_j = x_j$ ;  $x_i \vee \bar{x}_j = \bar{x}_j$ ;  $P\{\bar{x}_i \vee \bar{x}_j\} = 1$ ;

$$P\{x_i \vee x_j\} = P_i + P_j; P\{\bar{x}_i \cdot \bar{x}_j\} = 1 - (P_i + P_j)$$

Так, если допустить в рассматриваемом примере, что исходные события  $x_1$  и  $x_2$  несовместные ( $x_1 \cdot x_2 = 0$ ), то вероятностная модели безопасности (2) изменится:

$$P_E = p\{y_7\} = 1 - P_1 - P_2 - P_1P_3P_4P_5 + P_2P_4P_5 = 0.98964$$

Учет ГНС позволил существенно повысить качество моделирования и расширить область применения технологии автоматизированного аналитического ОЛВМ.

**Технология автоматизированного статистического ОЛВМ** предусматривает ввод в ЭВМ тех же исходных данных (СФЦ, параметров элементов и ЛКФ), однако далее, с помощью ПК АСМ [7], автоматически формируется имитационная (статистическая) модель исследуемой системы. В настоящее время реализованы два подхода к автоматизации процессов логико-вероятностного построения статистических моделей систем. *Первый подход* основывается на так называемом логико-статистическом методе (ЛСМ) академика И. А. Рябина. В ЛСМ и ОЛВМ первые два этапа совпадают. В результате формируется явная аналитическая форма логической ФРС (например (1)). Далее она рассматривается как основа, для организации проведения машинных статистических испытаний и получения оценок вероятностных показателей исследуемой системы. Таким образом, в ЛСМ исключена необходимость автоматического построения (иногда очень громоздких!) многочленов расчетных ВФ. *Второй подход* основывается на так называемом итерационном логико-статистическом методе (ИЛСМ), разработанным доцентом А.О.Алексеевым [3]. В ИЛСМ исключена необходимость явного построения на ЭВМ всех аналитических моделей - и многочленов ВФ и логических ФРС. Получение оценок вероятностных характеристик систем в ИЛСМ основывается на специальных машинных процедурах статистического решения любых (монотонных и немонотонных) систем логических уравнений, задаваемых СФЦ (см. например рис. 1), и расчета значимости всех элементов. Так, с помощью ИЛСМ реализованного в [7], были получены результаты статистического вероятностного анализа безопасности участка ж.д.,  $P_E^* = 0.99066$ ,  $\xi_1^* = -0.09268$ ,  $\xi_2^* = 0.00661$ ,  $\xi_3^* = -0.09647$ ,  $\xi_4^* = 0.16483$ ,  $\xi_5^* = 0.117784$ . Эти результаты согласуются с аналитическими решениями задачи (см. (2) и рис.2).

**Технология автоматизированного ОЛВМ построения марковских моделей систем** первоначально была разработана для расчета условных законов живучести систем к воздействию на их элементы различных последовательностей поражающих факторов [2]. Был автоматизирован самый громоздкий и трудоемкий процесс построения, на основе СФЦ и ЛКФ, самой цепи Маркова, т.е. графа переходов состояний системы и всех допустимых переходов. В ОЛВМ множество марковских состояний работоспособности системы определяется путем автоматического преобразования логической ФРС в совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ). Затем, на основе специальных правил поразрядного сравнения пар конъюнкций полученной СДНФ автоматически определяются допустимые логические функции переходов (ЛФП) между марковскими состояниями системы и рассчитываются их параметры. Например, правила поразрядного сравнения переменных  $\tilde{x}_i(j) \Rightarrow \tilde{x}_i(k)$  конъюнкций СДНФ логической ФРС для определения

переменных  $\bar{x}_i, i = 1, 2, \dots, H$ , ЛПФ  $\wp_{j,k}$  между состояниями  $S_j \Rightarrow S_k$  цепи Маркова для невозстанавливаемых систем, следующие:

Если  $x_i(j) \Rightarrow x_i(k)$ , то  $\wp_{j,k} = \wp_{j,k} \cdot x_i$  - не поражение элемента  $x_i$ ;

Если  $x_i(j) \Rightarrow \bar{x}_i(k)$ , то  $\wp_{j,k} = \wp_{j,k} \cdot \bar{x}_i$  - поражение элемента  $x_i$ ; (4)

Если  $\bar{x}_i(j) \Rightarrow \bar{x}_i(k)$ , то  $\wp_{j,k} = \wp_{j,k} \cdot I$  - элемент  $x_i$  уже поражен;

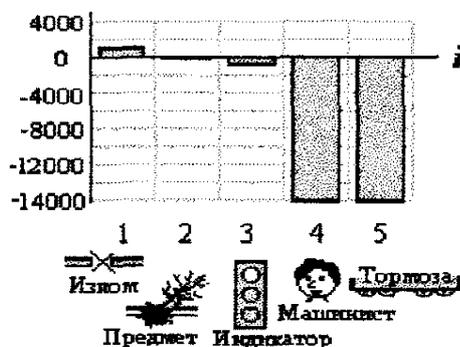
Если  $\bar{x}_i(j) \Rightarrow x_i(k)$ , то  $\wp_{j,k} = \wp_{j,k} \cdot 0$  - элемент  $x_i$  не восстанавливается,

Построенная по указанным правилам марковская цепь системы, СФЦ которой приведена на рис. 1, характеризуется 13-ю комбинаторными марковскими состояниями безопасности и 70-ю допустимыми переходами между этими состояниями. Правила, аналогичные (4), и соответствующие машинные программы разработаны для нескольких видов поражающих воздействий, систем с ГНС и восстановлением элементов. Технология ОЛВМ построения цепей Маркова позволяет полностью автоматизировать процессы построение практически всех известных видов и классов дискретных и непрерывных марковских и полумарковских моделей систем большой размерности, состояния которых описываются конъюнкциями простых логических переменных.

**Технология автоматизированного ОЛВМ построения моделей реальной эффективности.** Способность ОЛВМ строить немонотонные модели устойчивости (надежности, живучести и безопасности)  $\bar{E}$  впервые позволила объединить эти модели с множеством других, специальных моделей, характеризующих условную эффективность  $E_j$  функционирования систем в различных состояниях [2,5].

$$W_c = \sum_{j=1}^M P_c(Y_j) \cdot E_j \quad (5)$$

Здесь  $M$ - количество областей состояний  $x_i^N$  в которых система функционирует с разной эффективностью  $E_j$ , а  $\bar{E}$  - вероятность нахождения системы в этих состояниях



**Рис.3. График значимости элементов по риску системы**

(определяется автоматически ПК АСМ). Тогда  $W_c^*$  - математическое ожидание эффективности системы с учетом ее устойчивости.

Оценим с помощью (4) риск аварии на рассматриваемом в примере участке ж.д. Для этого допустим, что авария по причинам одновременного возникновения излома рельса и предмета на рельсах оценивается в 15000 уе. последующих затрат, авария только из-за излома рельса - 10000 уе., а только из-за предмета на рельсах - 5000 уе. Тогда, реальный риск затрат вследствие аварии на участке ж.д. можно автоматически оценить, с помощью ПК АСМ по критерию

$$W_c^* = 15000 \cdot P_c(\bar{y}_7 \cdot y_1 \cdot y_2) + 10000 \cdot P_c(\bar{y}_7 \cdot y_1 \cdot \bar{y}_2) = 5000 \cdot P_c(\bar{y}_7 \cdot \bar{y}_1 \cdot y_2) = 92,8 \text{ у.е.}$$

**Технология автоматизированного ОЛВМ анализа сетевых систем** предусматривает построение математических моделей таких объектов, в структуре которых должны учитываться не только комбинации, но и последовательности элементарных событий во времени. Такие комбинаторно-последовательные модели могут использоваться при решении задач учета ненадежности переключающих устройств, при поиске на множестве решений, синтезе сетевых планы и др. Для автоматизации процессов построения последовательных моделей функционирования систем потребовалась разработка специальных правил построения и записи функций алгебры логики. Комбинаторно-последовательной является, например, **ФРС (1)**. Представляет интерес противоположная комбинаторно-последовательная логическая модель аварии участка ж.д. [6]:

$$\bar{y}_7 = x_1 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot \bar{x}_4 \vee x_2 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \vee x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5 \quad (6)$$

Функция (6) формируется автоматически и представляет все возможные минимальные комбинации и последовательности событий, приводящие к ж.д. аварии. Это позволяет использовать технологию автоматизированного ОЛВМ не только для вероятностного анализа безопасности, но и для управления безопасностью в реальном масштабе времени функционирования системы.

#### Тема 4 Система моделирования GPSS

Система моделирования **GPSS (General Purpose Simulating System)** предназначена для построения статистических моделей сложных дискретных технических и производственных систем. Общим для исследуемых в среде **GPSS** систем является наличие различных случайных факторов, существенным образом влияющих на смену состояний. При этом предполагается, что множество состояний исследуемой системы является дискретным и смена состояний происходит в некоторые моменты времени. Интервалы между моментами смены состояний могут быть как случайными, так и детерминированными величинами. В течение всего интервала между моментами смены состояний исследуемая система состоянием не меняет.

Существенной особенностью **GPSS** является ориентация на построение моделей таких систем, в которых возможно возникновение очередей различного рода. К таким системам относятся всевозможные системы массового обслуживания (СМО), вычислительные системы (ВС), транспортные и железнодорожные системы и т.д. С помощью средств **GPSS** экспериментатор имеет возможность описать как алгоритм функционирования исследуемой системы, так и воздействие случайных факторов на систему. Таким образом, **GPSS** может рассматриваться и как некоторый язык описания сложных систем.

Составив описание, пользователь **GPSS** получает возможность постановки различных экспериментов, в ходе которых многократно воспроизводятся случайные ситуации, соответствующие возможным случаям воздействия внешних факторов на исследуемую систему, находящуюся в различных состояниях. В процессе имитации случайных ситуаций накапливается информация о качестве функционирования исследуемой системы в виде количественных показателей. Имитация случайных ситуаций продолжается до тех пор, пока объем выборки не станет достаточным для вычисления статистически достоверных оценок показателей качества функционирования.

На основании оценок качества функционирования системы, полученных в результате эксперимента с моделью, может быть проведен поиск как наилучших условий работы, так и наилучшей структуры исследуемой системы. Для решения задач оптимизации **GPSS** поддерживает стыковку с алгоритмическим языком FORTRAN; в этом случае программа задания начальных условий моделирования, определения направления движения в допустимой области варьирования изменяемых параметров системы пишется на языке FORTRAN, а модель системы строится на основе объектов **GPSS**. Кроме того, с помощью FORTRAN-надстройки над **GPSS**-моделью удастся существенно упростить, сделать более гибкой и саму **GPSS**-модель.

Процессы функционирования различных систем и сетей связи могут быть представлены той или иной совокупностью систем массового обслуживания (СМО) - стохастических, динамических, дискретнонепрерывных математических моделей. Исследование характеристик таких моделей может проводиться либо аналитическими методами, либо путем имитационного моделирования [1-6]. Имитационная модель отображает стохастический процесс смены дискретных состояний СМО в непрерывном времени в форме моделирующего алгоритма. При его реализации на ЭВМ производится накопление статистических данных по тем атрибутам модели, характеристики которых являются предметом исследований.

По окончании моделирования накопленная статистика обрабатывается, и результаты моделирования получаются в виде выборочных распределений исследуемых величин или их выборочных моментов. Таким образом, при имитационном моделировании систем массового обслуживания речь всегда

идет о статистическом имитационном моделировании [5;6]. Сложные функции моделирующего алгоритма могут быть реализованы средствами универсальных языков программирования (Паскаль, Си), что предоставляет неограниченные возможности в разработке, отладке и использовании модели. Однако подобная гибкость приобретается ценой больших усилий, затрачиваемых на разработку и программирование весьма сложных моделирующих алгоритмов, оперирующих со списковыми структурами данных. Альтернативой этому является использование специализированных языков имитационного моделирования [5-7]. Специализированные языки имеют средства описания структуры и процесса функционирования моделируемой системы, что значительно облегчает и упрощает программирование имитационных моделей, поскольку основные функции моделирующего алгоритма при этом реализуются автоматически. Программы имитационных моделей на специализированных языках моделирования близки к описаниям моделируемых систем на естественном языке, что позволяет конструировать сложные имитационные модели пользователям, не являющимся профессиональными программистами. Одним из наиболее эффективных и распространенных языков моделирования сложных дискретных систем является в настоящее время язык GPSS [1;4;7].

Он может быть с наибольшим успехом использован для моделирования систем, формализуемых в виде систем массового обслуживания. В качестве объектов языка используются аналоги таких стандартных компонентов СМО, как заявки, обслуживаемые приборы, очереди и т.п. Достаточный набор подобных компонентов позволяет конструировать сложные имитационные модели, сохраняя привычную терминологию СМО. На персональных компьютерах (ПК) типа IBM/PC язык GPSS реализован в рамках пакета прикладных программ GPSS/PC [8]. Основной модуль пакета представляет собой интегрированную среду, включающую помимо транслятора со входного языка средства ввода и редактирования текста модели, ее отладки и наблюдения за процессом моделирования, графические средства отображения атрибутов модели, а также средства накопления результатов моделирования в базе данных и их статистической обработки. Кроме основного модуля в состав пакета входит модуль создания стандартного отчета GPSS/PC, а также ряд дополнительных модулей и файлов. В данном издании, состоящем из двух частей, излагаются основы моделирования систем и сетей связи с использованием пакета GPSS/PC. В первой части рассматриваются основные понятия и средства GPSS/PC, приемы конструирования GPSS-моделей и технология работы с пакетом.

Изложение материала сопровождается небольшими учебными примерами. Относительно подробное рассмотрение языка GPSS/PC вызвано отсутствием в литературе учебного материала по данной версии языка. Во второй части рассматриваются примеры GPSS-моделей различных систем и сетей массового обслуживания, используемых для формализации процессов функционирования систем и сетей связи. Приводится также ряд примеров моделирования систем и сетей связи с использованием GPSS/PC. Подробно

комментируются тексты GPSS-моделей и результаты моделирования. 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О GPSS/PC Исходная программа на языке GPSS/PC, как и программа на любом языке программирования, представляет собой последовательность операторов. Операторы GPSS/PC записываются и вводятся в ПК в следующем формате: номер \_строки имя операция операнды ; комментарии Все операторы исходной программы должны начинаться с номера 0\_строки - целого положительного числа от 1 до 9999999. После ввода операторов они располагаются в исходной программе в соответствии с нумерацией строк. Обычно нумерация производится с некоторым шагом, отличным от 1, чтобы иметь возможность добавления операторов в нужное место исходной программы.

Некоторые операторы удобно вводить, не включая их в исходную программу. Такие операторы вводятся без номера строки. В настоящем издании при описании формата операторов и в примерах моделей номера строк будут опускаться для лучшей читаемости текста. Отдельные операторы могут иметь имя для ссылки на эти операторы в других операторах. Если такие ссылки отсутствуют, то этот элемент оператора не является обязательным. В поле операции записывается ключевое слово (название оператора), указывающее конкретную функцию, выполняемую данным оператором. Это поле оператора является обязательным. У некоторых операторов поле операции включает в себя также вспомогательный операнд. В полях операндов записывается информация, уточняющая и конкретизирующая выполнение функции, определенной в поле операции. Эти поля в зависимости от типа операции содержат до семи операндов, расположенных в определенной последовательности и обозначаемых обычно первыми буквами латинского алфавита от A до G.

Некоторые операторы вообще не имеют операндов, а в некоторых операнды могут быть опущены, при этом устанавливаются их стандартные значения (по умолчанию). При записи операндов используется позиционный принцип: пропуск операнда отмечается запятой. Необязательные комментарии в случае их присутствия отделяются от поля операндов точкой с запятой. Комментарии не могут содержать букв русского алфавита. Операторы GPSS/PC записываются, начиная с первой позиции, в свободном формате, т.е. отдельные поля разделяются произвольным количеством пробелов. При вводе исходной программы в интегрированной среде GPSS/PC размещение отдельных полей операторов с определенным количеством интервалов между ними производится автоматически. Каждый оператор GPSS/PC относится к одному из четырех типов: операторы-блоки, операторы определения объектов, управляющие операторы и операторы-команды. Операторы-блоки формируют логику модели. В GPSS/PC имеется около 50 различных видов блоков, каждый из которых выполняет свою конкретную функцию. За каждым из таких блоков стоит соответствующая подпрограмма транслятора, а операнды каждого блока служат параметрами этой подпрограммы. Операторы определения объектов служат для описания параметров некоторых объектов GPSS/PC (о самих объектах речь пойдет дальше).

Примерами параметров объектов могут быть количество каналов в многоканальной системе массового обслуживания, количество строк и столбцов матрицы и т.п. Управляющие операторы служат для управления процессом моделирования (прогоном модели). Операторы-команды позволяют управлять работой интегрированной среды GPSS/PC.

Управляющие операторы и операторы-команды обычно не включаются в исходную программу, а вводятся непосредственно с клавиатуры ПК в процессе интерактивного взаимодействия с интегрированной средой. После трансляции исходной программы в памяти ПК создается так называемая текущая модель, являющаяся совокупностью разного типа объектов, каждый из которых представляет собой некоторый набор чисел в памяти ПК, описывающих свойства и текущее состояние объекта. Объекты GPSS/PC можно разделить на семь классов: динамические, операционные, аппаратные, статистические, вычислительные, запоминающие и группирующие. Динамические объекты, соответствующие заявкам в системах массового обслуживания, называются в GPSS/PC транзактами. Они "создаются" и "уничтожаются" так, как это необходимо по логике модели в процессе моделирования. С каждым транзактом может быть связано произвольное число параметров, несущих в себе необходимую информацию об этом транзакте. Кроме того, транзакты могут иметь различные приоритеты. Операционные объекты GPSS/PC, называемые блоками, соответствуют операторам-блокам исходной программы.

Они, как уже говорилось, формируют логику модели, давая транзактам указания: куда идти и что делать дальше. Модель системы на GPSS/PC можно представить совокупностью блоков, объединенных в соответствии с логикой работы реальной системы в так называемую блок-схему. Блок-схема модели может быть изображена графически, наглядно показывая взаимодействие блоков в процессе моделирования. Аппаратные объекты GPSS/PC - это абстрактные элементы, на которые может быть расчленено (декомпозировано) оборудование реальной системы. К ним относятся одноканальные и многоканальные устройства и логические переключатели. Многоканальное устройство иногда называют памятью. Одноканальные и многоканальные устройства соответствуют обслуживающим приборам в СМО. Одноканальное устройство, которое для краткости далее будем называть просто устройством, может обслуживать одновременно только один транзакт. Многоканальное устройство (МКУ) может обслуживать одновременно несколько транзактов. Логические переключатели (ЛП) используются для моделирования двоичных состояний логического или физического характера. ЛП может находиться в двух состояниях: включено и выключено. Его состояние может изменяться в процессе моделирования, а также опрашиваться для принятия определенных решений. Статистические объекты GPSS/PC служат для сбора и обработки статистических данных о функционировании модели. К ним относятся очереди и таблицы. Каждая очередь обеспечивает сбор и обработку данных о транзактах, задержанных в какой-либо точке модели, например перед одноканальным устройством.

Таблицы используются для получения выборочных распределений некоторых случайных величин, например времени пребывания транзакта в модели. К вычислительным объектам GPSS/PC относятся переменные (арифметические и булевские) и функции. Они используются для вычисления некоторых величин, заданных арифметическими или логическими выражениями либо табличными зависимостями. Запоминающие объекты GPSS/PC обеспечивают хранение в памяти ПК отдельных величин, используемых в модели, а также массивов таких величин. К ним относятся так называемые сохраняемые величины и матрицы сохраняемых величин. К объектам группирующего класса относятся списки пользователя и группы. Списки пользователя используются для организации очередей с дисциплинами, отличными от дисциплины "раньше пришел - раньше обслужен". Группы в данном издании рассматриваться не будут. Каждому объекту того или иного класса соответствуют числовые атрибуты, описывающие его состояние в данный момент модельного времени. Кроме того, имеется ряд так называемых системных атрибутов, относящихся не к отдельным объектам, а к модели в целом. Значения атрибутов всех объектов модели по окончании моделирования выводятся в стандартный отчет GPSS/PC. Большая часть атрибутов доступна программисту и составляет так называемые стандартные числовые атрибуты (СЧА), которые могут использоваться в качестве операндов операторов исходной программы. Все СЧА в GPSS/PC являются целыми числами. Каждый объект GPSS/PC имеет имя и номер. Имена объектам даются в различных операторах исходной программы, а соответствующие им номера транслятор присваивает автоматически. Имя объекта представляет собой начинающуюся с буквы последовательность букв латинского алфавита, цифр и символа "подчеркивание".

При необходимости имени любого объекта, кроме имени блока, можно поставить в соответствие любой номер с помощью оператора описания EQU, имеющего следующий формат: имя EQU номер. Блокам присваиваются их порядковые номера в исходной программе (непутать с номерами строк!). Для ссылки на какой-либо стандартный числовой атрибут некоторого объекта соответствующий операнд оператора исходной программы записывается одним из следующих способов: СЧА \$имя ; СЧА j , где СЧА - системное обозначение (название) конкретного стандартного числового атрибута данного объекта; имя - имя объекта; j - номер объекта; \$ - символ-разделитель. Прогон текущей модели, т.е. собственно моделирование, выполняется с помощью специальной управляющей программы, которую называют симулятором (от английского SIMULATE - моделировать, имитировать). Работа GPSS-модели под управлением симулятора заключается в перемещении транзактов от одних блоков к другим, аналогично тому, как в моделируемой СМО перемещаются заявки, соответствующие транзактам. В начальный момент времени в GPSS-модели нет ни одного транзакта. В процессе моделирования симулятор генерирует транзакты в определенные моменты времени в соответствии с теми

логическими потребностями, которые возникают в моделируемой системе. Подобным же образом транзакты покидают модель в определенные моменты времени в зависимости от специфики моделируемой системы. В общем случае в модели одновременно существует большое число транзактов, однако в каждый момент времени симулятор осуществляет продвижение только какого-либо одного транзакта. Если транзакт начал свое движение, он перемещается от блока к блоку по пути, предписанному блок-схемой. В тот момент, когда транзакт входит в некоторый блок, на исполнение вызывается подпрограмма симулятора, соответствующая типу этого блока, а после ее выполнения, при котором реализуется функция данного блока, транзакт "пытается" войти в следующий блок. Такое продвижение транзакта продолжается до тех пор, пока не произойдет одно из следующих возможных событий: 1) транзакт входит в блок, функцией которого является удаление транзакта из модели; 2) транзакт входит в блок, функцией которого является задержка транзакта на некоторое определенное в модели время; 3) транзакт "пытается" войти в следующий блок, однако блок "отказывается" принять его. В этом случае транзакт остается в том блоке, где находился, и позднее будет повторять свою попытку войти в следующий блок. Когда условия в модели изменятся, такая попытка может оказаться успешной, и транзакт сможет продолжить свое перемещение по блок-схеме. Если возникло одно из описанных выше условий, обработка данного транзакта прекращается, и начинается перемещение другого транзакта.

Таким образом, выполнение моделирования симулятором продолжается постоянно. Проходя через блоки модели, каждый транзакт вносит вклад в содержимое счетчиков блоков. Значения этих счетчиков доступны программисту через СЧА блоков:  $W$  - текущее содержимое блока и  $N$  - общее количество входов в блок. Каждое продвижение транзакта в модели является событием, которое должно произойти в определенный момент модельного времени. Для того, чтобы поддерживать правильную временную последовательность событий, симулятор имеет таймер модельного времени, который автоматически корректируется в соответствии с логикой, предписанной моделью. Таймер GPSS/PC имеет следующие особенности: 1) регистрируются только целые значения (все временные интервалы в модели изображаются целыми числами); 2) единица модельного времени определяется разработчиком модели, который задает все временные интервалы в одних и тех же, выбранных им единицах; 3) симулятор не анализирует состояние модели в каждый следующий момент модельного времени (отстоящий от текущего на единицу модельного времени), а продвигает таймер к моменту времени, когда происходит ближайшее следующее событие. Значения таймера доступны программисту через системные СЧА  $S1$  (относительное время) и  $AS1$  (абсолютное время). Центральной задачей, выполняемой симулятором, является определение того, какой транзакт надо выбрать следующим для продвижения в модели, когда его предшественник прекратил свое продвижение.

С этой целью симулятор рассматривает каждый транзакт как элемент некоторого списка. В относительно простых моделях используются лишь два основных списка: список текущих событий и список будущих событий. Список текущих событий включает в себя те транзакты, планируемое время продвижения которых равно или меньше текущего модельного времени (к последним относятся транзакты, движение которых было заблокировано ранее). Он организуется в порядке убывания приоритетов транзактов, а в пределах каждого уровня приоритета - в порядке поступления транзактов. Список будущих событий включает в себя транзакты, планируемое время продвижения которых больше текущего времени, т.е. события, связанные с продвижением этих транзактов, должны произойти в будущем. Этот список организуется в порядке возрастания планируемого времени продвижения транзактов. Симулятор GPSS/PC помещает транзакты в зависимости от условий в модели в тот или иной список и переносит транзакты из списка в список, просматривает списки, выбирая следующий транзакт для обработки, корректирует таймер модельного времени после обработки всех транзактов в списке текущих событий.

**2. ОСНОВНЫЕ БЛОКИ GPSS/PC И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ОБЪЕКТЫ**

**2.1. Блоки, связанные с транзактами** С транзактами связаны блоки создания, уничтожения, задержки транзактов, изменения их атрибутов и создания копий транзактов. Для создания транзактов, входящих в модель, служит блок GENERATE (генерировать), имеющий следующий формат: имя GENERATE A,B,C,D,E В поле A задается среднее значение интервала времени между моментами поступления в модель двух последовательных транзактов. Если этот интервал постоянен, то поле B не используется. Если же интервал поступления является случайной величиной, то в поле B указывается модификатор среднего значения, который может быть задан в виде модификатора-интервала или модификатора-функции. Модификатор-интервал используется, когда интервал поступления транзактов является случайной величиной с равномерным законом распределения вероятностей. В этом случае в поле B может быть задан любой СЧА, кроме ссылки на функцию, а диапазон изменения интервала поступления имеет границы A-B, A+B. Например, блок GENERATE 100,40 создает транзакты через случайные интервалы времени, равномерно распределенные на отрезке [60;140]. Модификатор-функция используется, если закон распределения интервала поступления отличен от равномерного. В этом случае в поле B должна быть записана ссылка на функцию (ее СЧА), описывающую этот закон, и случайный интервал поступления определяется, как целая часть произведения поля A (среднего значения) на вычисленное значение функции. В поле C задается момент поступления в модель первого транзакта. Если это поле пусто или равно 0, то момент появления первого транзакта определяется операндами A и B. Поле D задает общее число транзактов, которое должно быть создано блоком GENERATE. Если это поле пусто, то блок генерирует неограниченное число транзактов до завершения моделирования. В поле E задается приоритет, присваиваемый генерируемым

транзак- там. Число уровней приоритетов неограничено, причем самый низкий приоритет - нулевой. Если поле Е пусто, то генерируемые транзакты имеют нулевой приоритет. Транзакты имеют ряд стандартных числовых атрибутов. Например, СЧА с названием PR позволяет ссылаться на приоритет транзакта. СЧА с названием M1 содержит так называемое резидентное время транзакта, т.е. время, прошедшее с момента входа транзакта в модель через блок GENERATE. СЧА с названием XN1 содержит внутренний номер транзакта, который является уникальным и позволяет всегда отличить один транзакт от другого. В отличие от СЧА других объектов, СЧА транзактов не содержат ссылки на имя или номер транзакта. Ссылка на СЧА транзакта всегда относится к активному транзакту, т.е. транзакту, обрабатываемому в данный момент симулятором. Важными стандартными числовыми атрибутами транзактов являются значения их параметров. Любой транзакт может иметь неограниченное число параметров, содержащих те или иные числовые значения. Ссылка на этот СЧА транзактов всегда относится к активному транзакту и имеет вид Pj или P\$ имя, где j и имя - номер и имя параметра соответственно. Такая ссылка возможна только в том случае, если параметр с указанным номером или именем существует, т.е. в него занесено какое-либо значение. Для присваивания параметрам начальных значений или изменения этих значений служит блок ASSIGN (присваивать), имеющий следующий формат: имя ASSIGN A,B,C В поле A указывается номер или имя параметра, в который заносится значение операнда B. Если в поле A после имени (номера) параметра стоит знак + или -, то значение операнда B добавляется или вычитается из текущего содержимого параметра.

В поле C может быть указано имя или номер функции-модификатора, действующей аналогично функции-модификатору в поле B блока GENERATE. Например, блок ASSIGN 5,0 записывает в параметр с номером 5 значение 0, а блок ASSIGN COUNT+,1 добавляет 1 к текущему значению параметра с именем COUNT. Для записи текущего модельного времени в заданный параметр транзакта служит блок MARK (отметить), имеющий следующий формат: имя MARK A B поле A указывается номер или имя параметра транзакта, в который заносится текущее модельное время при входе этого транзакта в блок MARK. Содержимое этого параметра может быть позднее использовано для определения транзитного времени пребывания транзакта в какой-то части модели с помощью СЧА с названием MP. Например, если на входе участка модели поместить блок MARK MARKER, то на выходе этого участка СЧА MP\$MARKER будет содержать разность между текущим модельным временем и временем, занесенным в параметр MARKER блоком MARK. Если поле A блока MARK пусто, то текущее время заносится на место отметки времени входа транзакта в модель, используемой при определении резидентного времени транзакта с помощью СЧА M1. Для изменения приоритета транзакта служит блок PRIORITY (приоритет), имеющий следующий формат: имя PRIORITY A,B В поле A записывается новый приоритет транзакта. В поле B может содержаться ключевое слово BU, при наличии которого транзакт, вошедший в

блок, помещается в списке текущих событий после всех остальных транзактов новой приоритетной группы, и список текущих событий просматривается с начала. Использование такой возможности будет рассмотрено ниже. Для удаления транзактов из модели служит блок TERMINATE (за-вершить), имеющий следующий формат: имя TERMINATE A Значение поля A указывает, на сколько единиц уменьшается со-держимое так называемого счетчика завершений при входе транзакта в данный блок TERMINATE.

## **Тема 5 Моделирование СМО с одним устройством обслуживания**

Во многих областях практической деятельности человека мы сталкиваемся с необходимостью пребывания в состоянии ожидания. Подобные ситуации возникают в очередях в билетных кассах, в крупных аэропортах, при ожидании обслуживающим персоналом самолетов разрешения на взлет или посадку, на телефонных станциях в ожидании освобождения линии абонента, в ремонтных цехах в ожидании ремонта станков и оборудования, на складах снабженческо-сбытовых организаций в ожидании разгрузки или погрузки транспортных средств. Во всех перечисленных случаях имеем дело с массовостью и обслуживанием. Изучением таких ситуаций занимается теория массового обслуживания.

В теории систем массового обслуживания (в дальнейшем просто -СМО) обслуживаемый объект называют требованием. В общем случае под требованием обычно понимают запрос на удовлетворение некоторой потребности, например, разговор с абонентом, посадка самолета, покупка билета, получение материалов на складе.

Средства, обслуживающие требования, называются обслуживающими устройствами или каналами обслуживания. Например, к ним относятся каналы телефонной связи, посадочные полосы, мастера-ремонтники, билетные кассиры, погрузочно-разгрузочные точки на базах и складах.

Совокупность однотипных обслуживающих устройств называется обслуживающими устройствами. Такими системами могут быть телефонные станции, аэродромы, билетные кассы, ремонтные мастерские, склады и базы снабженческо-сбытовых организаций и т.д.

В теории СМО рассматриваются такие случаи, когда поступление требований происходит через случайные промежутки времени, а продолжительность обслуживания требований не является постоянной, т.е. носит случайный характер. В силу этих причин одним из основных методов математического описания СМО является аппарат теории случайных процессов.

Основной задачей теории СМО является изучение режима функционирования обслуживающей системы и исследование явлений, возникающих в процессе обслуживания. Так, одной из характеристик

обслуживающей системы является время пребывания требования в очереди. Очевидно, что это время можно сократить за счет увеличения количества обслуживающих устройств. Однако каждое дополнительное устройство требует определенных материальных затрат, при этом увеличивается время бездействия обслуживающего устройства из-за отсутствия требований на обслуживание, что также является негативным явлением. Следовательно, в теории СМО возникают задачи оптимизации: каким образом достичь определенного уровня обслуживания (максимального сокращения очереди или потерь требований) при минимальных затратах, связанных с простоем обслуживающих устройств.

СМО классифицируются на разные группы в зависимости от состава и от времени пребывания в очереди до начала обслуживания, и от дисциплины обслуживания требований.

По составу СМО бывают одноканальные (с одним обслуживающим устройством) и многоканальными (с большим числом обслуживающих устройств). Многоканальные системы могут состоять из обслуживающих устройств как одинаковой, так и разной производительности.

По времени пребывания требований в очереди до начала обслуживания системы делятся на три группы:

- 1) с неограниченным временем ожидания (с ожиданием),
- 2) с отказами;
- 3) смешанного типа.

В СМО с неограниченным временем ожидания очередное требование, застав все устройства занятыми, становится в очередь и ожидает обслуживания до тех пор, пока одно из устройств не освободится.

В системах с отказами поступившее требование, застав все устройства занятыми, покидает систему. Классическим примером системы с отказами может служить работа автоматической телефонной станции.

В системах смешанного типа поступившее требование, застав все (устройства занятыми, становятся в очередь и ожидают обслуживания в течение ограниченного времени. Не дождавшись обслуживания в установленное время, требование покидает систему.

В системах с определенной дисциплиной обслуживания поступившее требование, застав все устройства занятыми, в зависимости от своего приоритета, либо обслуживается вне очереди, либо становится в очередь.

Основными элементами СМО являются: входящий поток требований, очередь требований, обслуживающие устройства, (каналы) и выходящий поток требований.

Изучение СМО начинается с анализа входящего потока требований.

Входящий поток требований представляет собой совокупность требований, которые поступают в систему и нуждаются в обслуживании. Входящий поток требований изучается с целью установления закономерностей этого потока и дальнейшего улучшения качества обслуживания.

В большинстве случаев входящий поток неуправляем и зависит от ряда случайных факторов. Число требований, поступающих в единицу времени, случайная величина. Случайной величиной является также интервал времени между соседними поступающими требованиями. Однако среднее количество требований, поступивших в единицу времени, и средний интервал времени между соседними поступающими требованиями предполагаются заданными.

Среднее число требований, поступающих в систему обслуживания за единицу времени, называется интенсивностью поступления требований и определяется следующим соотношением:

$$[\rho]c$$

где  $T$  - среднее значение интервала между поступлением очередных требований.

Для многих реальных процессов поток требований достаточно хорошо описывается законом распределения Пуассона. Такой поток называется простейшим.

Простейший поток обладает такими важными свойствами:

1) Свойством стационарности, которое выражает неизменность вероятностного режима потока по времени. Это значит, что число требований, поступающих в систему в равные промежутки времени, в среднем должно быть постоянным. Например, число вагонов, поступающих под погрузку в среднем в сутки должно быть одинаковым для различных периодов времени, к примеру, в начале и в конце декады.

2) Отсутствия последействия, которое обуславливает взаимную независимость поступления того или иного числа требований на обслуживание в непересекающиеся промежутки времени. Это значит, что число требований, поступающих в данный отрезок времени, не зависит от числа требований, обслуженных в предыдущем промежутке времени.

Например, число автомобилей, прибывших за материалами в десятый день месяца, не зависит от числа автомобилей, обслуженных в четвертый или любой другой предыдущий день данного месяца.

3) Свойством ординарности, которое выражает практическую невозможность одновременного поступления двух или более требований (вероятность такого события неизмеримо мала по отношению к рассматриваемому промежутку времени, когда последний устремляют к нулю).

При простейшем потоке требований распределение требований, поступающих в систему подчиняются закону распределения Пуассона:

вероятность  $[\rho]c$  того, что в обслуживающую систему за время  $t$  поступит именно  $k$  требований:

$$[\rho]c^k$$

где  $[\rho]c$ . - среднее число требований, поступивших на обслуживание в единицу времени.

На практике условия простейшего потока не всегда строго выполняются.

Часто имеет место не стационарность процесса (в различные часы дня и различные дни месяца поток требований может меняться, он может быть интенсивнее утром или в последние дни месяца). Существует также наличие последствия, когда количество требований на отпуск товаров в конце месяца зависит от их удовлетворения в начале месяца. Наблюдается и явление неоднородности, когда несколько клиентов одновременно пребывают на склад за материалами. Однако в целом пуассоновский закон распределения с достаточно высоким приближением отражает многие процессы массового обслуживания.

Почему такое предположение в ряде важных случаев оказывается верным, дает ответ общая теорема А.Я.Хинчина, которая представляет исключительную теоретическую и практическую ценность. Эта теорема имеет место в случае, когда входящий поток можно представить в виде суммы большого числа независимых потоков, ни один из которых не является сравнимым по интенсивности со всем суммарным потоком. Приведем “не строгую” формулировку этой теоремы (полная формулировка и доказательство приведены в).

Теорема (А.Я.Хинчин) Если входящий поток представляет собой сумму большого числа независимых между собой стационарных и ординарных потоков, каждый из которых вносит малый вклад в общую сумму, то при одном дополнительном условии аналитического характера (которое обычно выполняется на практике) поток близок к простейшему.

Применение этой теоремы на практике можно продемонстрировать, на следующем примере: поток судов дальнего плавания в данный грузовой порт, связанный со многими портами мира, можно считать близким к простейшему. Это дает нам право считать поток прибытия судов в порт распределенным согласно процесса Пуассона.

Кроме того, наличие пуассоновского потока требований можно определить статистической обработкой данных о поступлении требований на обслуживание.

Одним из признаков закона распределения Пуассона является равенство математического ожидания случайной величины и дисперсии этой же величины, т.е.

$[p_i c]$

Одной из важнейших характеристик обслуживающих устройств, которая определяет пропускную способность всей системы, является время обслуживания.

Время обслуживания одного требования ( $[p_i c]$ )- случайная величина, которая может изменяться в большом диапазоне. Она зависит от стабильности работы самих обслуживающих устройств, так и от различных параметров, поступающих в систему, требований (к примеру, различной грузоподъемности транспортных средств, поступающих под погрузку или выгрузку) .

Случайная величина  $[p_i c]$  полностью характеризуется законом распределения, который определяется на основе статистических испытаний.

На практике чаще всего принимают гипотезу о показательном законе распределения времени обслуживания.

Показательный закон распределения времени обслуживания имеет место тогда, когда плотность распределения резко убывает с возрастанием времени  $t$ . Например, когда основная масса требований обслуживается быстро, а продолжительное обслуживание встречается редко. Наличие показательного закона распределения времени обслуживания устанавливается на основе статистических наблюдений.

При показательном законе распределения времени обслуживания вероятность  $[p_{ic}]$  события, что время обслуживания продлится не более чем  $t$ , равна:

$$[p_{ic}]$$

где  $v$  – интенсивность обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством, которая определяется из соотношения:

$$[p_{ic}], (1)$$

где  $[p_{ic}]$  – среднее время обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством.

Следует заметить, что если закон распределения времени обслуживания показательный, то при наличии нескольких обслуживающих устройств одинаковой мощности закон распределения времени обслуживания несколькими устройствами будет также показательным:

$$[p_{ic}]^n$$

где  $n$  – количество обслуживающих устройств.

Важным параметром СМО является коэффициент загрузки  $[p_{ic}]$ , который определяется как отношение интенсивности поступления требований  $[p_{ic}]$  к интенсивности обслуживания  $v$ .

$$[p_{ic}](2)$$

где  $a$  – коэффициент загрузки;  $[p_{ic}]$  – интенсивность поступления требований в систему;  $v$  – интенсивность обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством.

Из (1) и (2) получаем, что

$$[p_{ic}]$$

Учитывая, что  $[p_{ic}]$  – интенсивность поступления требований в систему в единицу времени, произведение  $[p_{ic}]$  показывает количество требований, поступающих в систему обслуживания за среднее время обслуживания одного требования одним устройством.

Для СМО с ожиданием количество обслуживаемых устройств  $n$  должно быть строго больше коэффициента загрузки (требование установившегося или стационарного режима работы СМО) :

$$[p_{ic}] < 1.$$

В противном случае число поступающих требований будет больше суммарной производительности всех обслуживающих устройств, и очередь будет неограниченно расти.

Для СМО с отказами и смешанного типа это условие может быть ослаблено, для эффективной работы этих типов СМО достаточно

потребовать, чтобы минимальное количество обслуживаемых устройств было не меньше коэффициента загрузки  $[\rho]$ :  $[\rho]$

### **Тема 6 Моделирование систем управления запасами**

Процессы функционирования различных систем и сетей связи могут быть представлены той или иной совокупностью систем массового обслуживания (СМО) - стохастических, динамических, дискретно-непрерывных математических моделей. Исследование характеристик таких моделей может проводиться либо аналитическими методами, либо путем имитационного моделирования [1-6].

Имитационная модель отображает стохастический процесс смены дискретных состояний СМО в непрерывном времени в форме моделирующего алгоритма. При его реализации на ЭВМ производится накопление статистических данных по тем атрибутам модели, характеристики которых являются предметом исследований. По окончании моделирования накопленная статистика обрабатывается, и результаты моделирования получаются в виде выборочных распределений исследуемых величин или их выборочных моментов. Таким образом, при имитационном моделировании систем массового обслуживания речь всегда идет о статистическом имитационном моделировании [5;6].

Сложные функции моделирующего алгоритма могут быть реализованы средствами универсальных языков программирования (Паскаль, Си), что предоставляет неограниченные возможности в разработке, отладке и использовании модели. Однако подобная гибкость приобретается ценой больших усилий, затрачиваемых на разработку и программирование весьма сложных моделирующих алгоритмов, оперирующих со списковыми структурами данных. Альтернативой этому является использование специализированных языков имитационного моделирования [5-7].

Специализированные языки имеют средства описания структуры и процесса функционирования моделируемой системы, что значительно облегчает и упрощает программирование имитационных моделей, поскольку основные функции моделирующего алгоритма при этом реализуются автоматически. Программы имитационных моделей на специализированных языках моделирования близки к описаниям моделируемых систем на естественном языке, что позволяет конструировать сложные имитационные модели пользователям, не являющимся профессиональными программистами.

Одним из наиболее эффективных и распространенных языков моделирования сложных дискретных систем является в настоящее время язык GPSS [1;4;7]. Он может быть с наибольшим успехом использован для моделирования систем, формализуемых в виде систем массового обслуживания. В качестве объектов языка используются аналоги таких стандартных компонентов СМО, как заявки, обслуживающие приборы,

очереди и т.п. Достаточный набор подобных компонентов позволяет конструировать сложные имитационные модели, сохраняя привычную терминологию СМО.

На персональных компьютерах (ПК) типа IBM/PC язык GPSS реализован в рамках пакета прикладных программ GPSS/PC [8]. Основной модуль пакета представляет собой интегрированную среду, включающую помимо транслятора со входного языка средства ввода и редактирования текста модели, ее отладки и наблюдения за процессом моделирования, графические средства отображения атрибутов модели, а также средства накопления результатов моделирования в базе данных и их статистической обработки. Кроме основного модуля в состав пакета входит модуль создания стандартного отчета GPSS/PC, а также ряд дополнительных модулей и файлов.

В данном издании, состоящем из двух частей, излагаются основы моделирования систем и сетей связи с использованием пакета GPSS/PC.

В первой части рассматриваются основные понятия и средства GPSS/PC, приемы конструирования GPSS-моделей и технология работы с пакетом.

Изложение материала сопровождается небольшими учебными примерами.

Относительно подробное рассмотрение языка GPSS/PC вызвано отсутствием в литературе учебного материала по данной версии языка.

Во второй части рассматриваются примеры GPSS-моделей различных систем и сетей массового обслуживания, используемых для формализации процессов функционирования систем и сетей связи. Приводится также ряд примеров моделирования систем и сетей связи с использованием GPSS/PC. Подробно комментируются тексты GPSS-моделей и результаты моделирования.

Исходная программа на языке GPSS/PC, как и программа на любом языке программирования, представляет собой последовательность операторов. Операторы GPSS/PC записываются и вводятся в ПК в следующем формате:

1номер 0\_1 строки имя операция операнды ; комментарии

Все операторы исходной программы должны начинаться с 1номе-

1ра 0\_1 строки 0- целого положительного числа от 1 до 9999999. После ввода операторов они располагаются в исходной программе в соответствии с нумерацией строк. Обычно нумерация производится с некоторым шагом, отличным от 1, чтобы иметь возможность добавления операторов в нужное место исходной программы. Некоторые операторы удобно вводить, не включая их в исходную программу. Такие операторы вводятся без номера строки.

В настоящем издании при описании формата операторов и в примерах моделей номера строк будут опускаться для лучшей читаемости текста.

Отдельные операторы могут иметь 1имя 0для ссылки на эти операторы в других операторах. Если такие ссылки отсутствуют, то этот элемент оператора не является обязательным.

В поле 1операции 0записывается ключевое слово (название оператора), указывающее конкретную функцию, выполняемую данным оператором.

Это поле оператора является обязательным. У некоторых операторов поле операции включает в себя также 1вспомогательный операнд 0. В полях 1операндов 0записывается информация, уточняющая и конкретизирующая выполнение функции, определенной в поле операции. Эти поля в зависимости от типа операции содержат до семи операндов, расположенных в определенной последовательности и обозначаемых обычно первыми буквами латинского алфавита от A до G. Некоторые операторы вообще не имеют операндов, а в некоторых операнды могут быть опущены, при этом устанавливаются их стандартные значения (по умолчанию). При записи операндов используется позиционный принцип: пропуск операнда отмечается запятой.

Необязательные 1комментарии 0в случае их присутствия отделяются от поля операндов точкой с запятой. Комментарии не могут содержать букв русского алфавита.

Операторы GPSS/PC записываются, начиная с первой позиции, в свободном формате, т.е. отдельные поля разделяются произвольным количеством пробелов. При вводе исходной программы в интегрированной среде GPSS/PC размещение отдельных полей операторов с определенным количеством интервалов между ними производится автоматически.

Каждый оператор GPSS/PC относится к одному из четырех типов: операторы-блоки, операторы определения объектов, управляющие операторы и операторы-команды.

1Операторы-блоки 0формируют логику модели. В GPSS/PC имеется около 50 различных видов блоков, каждый из которых выполняет свою конкретную функцию. За каждым из таких блоков стоит соответствующая подпрограмма транслятора, а операнды каждого блока служат параметрами этой подпрограммы.

1Операторы определения об 0ъектов 0служат для описания параметров некоторых объектов GPSS/PC (о самих объектах речь пойдет дальше). Примерами параметров объектов могут быть количество каналов в многоканальной системе массового обслуживания, количество строк и столбцов матрицы и т.п.

1Управляющие операторы 0служат для управления процессом моделирования (прогоном модели). 1Операторы-команды 0позволяют управлять работой интегрированной среды GPSS/PC. Управляющие операторы и операторы-команды обычно не включаются в исходную программу, а вводятся непосредственно с клавиатуры ПК в процессе интерактивного взаимодействия с интегрированной средой.

После трансляции исходной программы в памяти ПК создается так называемая 1текущая модель, 0являющаяся совокупностью разного типа

Объектов 0, каждый из которых представляет собой некоторый набор чисел в памяти ПК, описывающих свойства и текущее состояние объекта. Объекты GPSS/PC можно разделить на семь классов: динамические, операционные, аппаратные, статистические, вычислительные, запоминающие и группирующие.

Динамические объекты, соответствующие заявкам в системах массового обслуживания, называются в GPSS/PC транзактами 0. Они "создаются" и "уничтожаются" так, как это необходимо по логике модели в процессе моделирования. С каждым транзактом может быть связано произвольное число параметров, несущих в себе необходимую информацию об этом транзакте. Кроме того, транзакты могут иметь различные приоритеты.

Операционные объекты GPSS/PC, называемые блоками 0, соответствуют операторам-блокам исходной программы. Они, как уже говорилось, формируют логику модели, давая транзактам указания: куда идти и что делать дальше. Модель системы на GPSS/PC можно представить совокупностью блоков, объединенных в соответствии с логикой работы реальной системы в так называемую блок-схему 0. Блок-схема модели может быть изображена графически, наглядно показывая взаимодействие блоков в процессе моделирования.

Аппаратные объекты GPSS/PC - это абстрактные элементы, на которые может быть расчленено (декомпозировано) оборудование реальной системы. К ним относятся одноканальные 0и 1многоканальные устройства и 1логические переключатели. 0Многоканальное устройство иногда называют 1памятью 0.

Одноканальные и многоканальные устройства соответствуют обслуживающим приборам в СМО. Одноканальное устройство 1, 0которое для краткости далее будем называть просто устройством, может обслуживать одновременно только один транзакт. Многоканальное устройство (МКУ) может обслуживать одновременно несколько транзактов. Логические переключатели (ЛП) используются для моделирования двоичных состояний логического или физического характера. ЛП может находиться в двух состояниях: включено и выключено. Его состояние может изменяться в процессе моделирования, а также опрашиваться для принятия определенных решений.

Статистические объекты GPSS/PC служат для сбора и обработки статистических данных о функционировании модели. К ним относятся 1очереди 0и 1таблицы 0.

Каждая очередь обеспечивает сбор и обработку данных о транзактах, задержанных в какой-либо точке модели, например перед одноканальным устройством. Таблицы используются для получения выборочных распределений некоторых случайных величин, например времени пребывания транзакта в модели.

К вычислительным объектам GPSS/PC относятся 1переменные 0(арифметические и булевские) и 1функции 0. Они используются для

вычисления некоторых величин, заданных арифметическими или логическими выражениями либо табличными зависимостями.

Запоминающие объекты GPSS/PC обеспечивают хранение в памяти ПК отдельных величин, используемых в модели, а также массивов таких величин. К ним относятся так называемые сохраняемые величины  $O_i$  и матрицы сохраняемых величин.

К объектам группирующего класса относятся списки пользователя и группы. Списки пользователя используются для организации очередей с дисциплинами, отличными от дисциплины "раньше пришел – раньше обслужен". Группы в данном издании рассматриваться не будут.

Каждому объекту того или иного класса соответствуют числовые атрибуты  $O_i$ , описывающие его состояние в данный момент модельного времени. Кроме того, имеется ряд так называемых системных атрибутов, относящихся не к отдельным объектам, а к модели в целом. Значения атрибутов всех объектов модели по окончании моделирования выводятся в стандартный отчет GPSS/PC. Большая часть атрибутов доступна программисту и составляет так называемые стандартные числовые атрибуты (СЧА), которые могут использоваться в качестве операндов операторов исходной программы. Все СЧА в GPSS/PC являются целыми числами.

Каждый объект GPSS/PC имеет имя  $O_i$  и номер  $O_i$ . Имена объектам даются в различных операторах исходной программы, а соответствующие им номера транслятор присваивает автоматически. Имя объекта представляет собой начинающуюся с буквы последовательность букв латинского алфавита, цифр и символа "подчеркивание". При необходимости имени любого объекта, кроме имени блока, можно поставить в соответствие любой номер с помощью оператора описания EQU, имеющего следующий формат:

имя  $O_i$  EQU номер

Блокам присваиваются их порядковые номера в исходной программе (не путать с номерами строк!).

Для ссылки на какой-либо стандартный числовой атрибут некоторого объекта соответствующий операнд оператора исходной программы записывается одним из следующих способов:

Ш1

1СЧА  $O_i$  \$ имя  $O_i$  ;

Ш1.5

1СЧАj  $O_i$  ,

где 1СЧА  $O_i$  - системное обозначение (название) конкретного стандартного числового атрибута данного объекта; имя  $O_i$  - имя объекта; j  $O_i$  - номер объекта; \$ - символ-разделитель.

1Прогон текущей модели, т.е. собственно моделирование, выполняется с помощью специальной управляющей программы, которую называют симулятором (от английского SIMULATE - моделировать, имитировать).

Работа GPSS-модели под управлением симулятора заключается в перемещении транзактов от одних блоков к другим, аналогично тому, как в моделируемой СМО перемещаются заявки, соответствующие транзактам.

В начальный момент времени в GPSS-модели нет ни одного транзакта. В процессе моделирования симулятор генерирует транзакты в определенные моменты времени в соответствии с теми логическими потребностями, которые возникают в моделируемой системе. Подобным же образом транзакты покидают модель в определенные моменты времени в зависимости от специфики моделируемой системы. В общем случае в модели одновременно существует большое число транзактов, однако в каждый момент времени симулятор осуществляет продвижение только какого-либо одного транзакта.

Если транзакт начал свое движение, он перемещается от блока к блоку по пути, предписанному блок-схемой. В тот момент, когда транзакт входит в некоторый блок, на исполнение вызывается подпрограмма симулятора, соответствующая типу этого блока, а после ее выполнения, при котором реализуется функция данного блока, транзакт "пытается" войти в следующий блок. Такое продвижение транзакта продолжается до тех пор, пока не произойдет одно из следующих возможных событий:

1) транзакт входит в блок, функцией которого является удаление транзакта из модели;

2) транзакт входит в блок, функцией которого является задержка транзакта на некоторое определенное в модели время;

3) транзакт "пытается" войти в следующий блок, однако блок "отказывается" принять его. В этом случае транзакт остается в том блоке, где находился, и позднее будет повторять свою попытку войти в следующий блок. Когда условия в модели изменятся, такая попытка может оказаться успешной, и транзакт сможет продолжить свое перемещение по блок-схеме.

## **Тема 7 Моделирование сложных систем**

СМО с ожиданием распространены наиболее широко. Их можно разбить на 2 большие группы - разомкнутые и замкнутые. Эти системы определяют так же, как системы с ограниченным входящим потоком.

К замкнутым относятся системы, в которых поступающий поток требований ограничен. Например, мастер, задачей которого является наладка станков в цехе, должен периодически их обслуживать. Каждый налаженный станок становится в будущем потенциальным источником требований на подналадку.

В подобных системах общее число циркулирующих требований конечно и чаще всего постоянно.

Если питающий источник обладает бесконечным числом требований, то системы называются разомкнутыми. Примерами подобных систем могут

служить магазины, кассы вокзалов, портов и др. Для этих систем поступающий поток требований можно считать неограниченным.

Мы рассмотрим здесь классическую задачу теории массового обслуживания в тех условиях, в каких она была рассмотрена и решена К.Эрлангом. на  $n$  одинаковых приборов поступает простейший поток требований интенсивности  $[\rho]$ . Если в момент поступления имеется хотя бы один свободный прибор, оно немедленно начинает обслуживаться. Если же все приборы заняты, то вновь прибывшее требование становится в очередь за всеми теми требованиями, которые поступили раньше и ещё не начали обслуживаться. Освободившийся прибор немедленно приступает к обслуживанию очередного требования, если только имеется очередь. Каждое требование обслуживается только одним прибором, и каждый прибор обслуживает в каждый момент времени не более одного требования. Длительность обслуживания представляет собой случайную величину с одним и тем же распределением вероятностей  $F(x)$ . Предполагается, что при  $x \rightarrow 0$ .

$[\rho]$

где  $[\rho]$  - постоянная.

Только что описанная задача представляет значительный прикладной интерес, и результаты, с которыми мы познакомимся, широко используются для практических целей. Реальных ситуаций, в которых возникают подобные вопросы, исключительно много. Эрланг решил эту задачу, имея ввиду постановки вопросов, возникших к тому времени в телефонном деле.

Выбор распределения (1) для описания длительности обслуживания произведен не случайно. Дело в том, что в этом предположении задача допускает простое решение, которое с удовлетворительной для практики точностью описывает ход интересующего нас процесса. Распределение (1) играет в теории массового обслуживания исключительную роль, которая в значительной мере вызвана следующим его свойством:

При показательном распределении длительности обслуживания распределение длительности оставшейся части работы по обслуживанию не зависит от того, сколько оно уже продолжалось.

Действительно, пусть  $[\rho]$  означает вероятность того, что обслуживание, которое уже продолжается время  $a$ , продлится еще не менее чем  $[\rho]$ . В предположении, что длительность обслуживания распределена показательным образом,  $[\rho]$ . Далее ясно, что  $[\rho]$  и  $[\rho]$ . А так как всегда и  $[\rho]$ ,  $[\rho]$  и, следовательно,  $[\rho]$

Требуемое доказано.

Несомненно, что в реальной обстановке показательное время обслуживания является, как правило, лишь грубым приближением к действительности. Так, нередко время обслуживания не может быть меньше, чем некоторая определенная величина. Предположение же (1) приводит к тому, что значительная доля требований нуждается лишь в кратковременной операции, близкой к 0. Позднее перед нами возникает задача освобождения от излишнего ограничения, накладываемого предположением (1).

Необходимость этого была ясна уже самому Эрлангу, и он в ряде работ делал усилия найти иные удачные распределения для длительности обслуживания. В частности, им было предложено так называемое распределение Эрланга, плотность распределения которого дается формулой

$$f(x) = \frac{\mu^k x^{k-1} e^{-\mu x}}{(k-1)!}$$

где  $\mu > 0$ , а  $k$  — целое положительное число.

Распределение Эрланга представляет собой распределение суммы  $k$ -независимых слагаемых, каждое из которых имеет распределение (1).

Обозначим для случая распределения (1) через  $\mu$  время обслуживания требования. Тогда средняя длительность обслуживания равна  $\frac{1}{\mu}$

Это равенство даст нам способ оценки параметра  $\mu$  по опытным данным. Как легко вычислить, дисперсия длительности обслуживания равна  $\frac{1}{\mu^2}$

## 2. Процесс обслуживания как марковский случайный процесс.

В указанных нами предположениях о потоке требований и о длительности обслуживания задачи теории массового обслуживания приобретают некоторые черты, облегчающие проведение исследований. Мы отмечали уже вычислительную простоту. Теперь отметим более принципиальное соображение, которое станем развивать применительно к изучаемой задаче.

В каждый момент рассматриваемая система может находиться в одном из следующих состояний: в момент  $t$  в системе находятся  $k$  требования ( $k=0, 1,$

$2, \dots$ ). Если  $k \leq m$ , то в системе находятся и обслуживаются  $k$  требований, а  $m-k$  — приборов свободны. Если  $k > m$ , то  $m$  требований обслуживаются, а  $k-m$  находятся в очереди и ожидают обслуживания. Обозначим через  $P_k$  состояние, когда в системе находятся  $k$  требований. Таким образом, система может находиться в состояниях  $P_0, P_1, \dots$  Обозначим через  $P_k(t)$  — вероятность того, что система в момент  $t$  окажется в состоянии  $P_k$ .

Сформулируем, в чем заключается особенность изучаемых нами задач в сделанных предположениях. Пусть в некоторый момент  $t_0$  наша система находилась в состоянии  $P_k$ . Докажем, что последующее течение процесса обслуживания не зависит в смысле теории вероятностей оттого, что происходило до момента  $t_0$ . Действительно, дальнейшее течение обслуживания полностью определяется тремя следующими факторами: моментами окончания обслуживаний, производящихся в момент  $t_0$ ; моментами появления новых требований; длительностью обслуживания требований, поступивших после  $t_0$ .

В силу особенностей показательного распределения длительность остающейся части обслуживания не зависит от того, как долго уже продолжалось обслуживание до момента  $t_0$ . Так как поток требований простейший, то прошлое не влияет на то, как много требований появится после момента  $t_0$ .

Наконец длительность обслуживания требований, появившихся после  $[r_i c]$ , никак не зависит от того, что и как обслуживалось до момента  $[r_i c]$ .

Известно, что случайные процессы, для которых будущее развитие зависит только от достигнутого в данный момент состояния и не зависит от того, как происходило развитие в прошлом, называются процессами Маркова или же процессами без последствия. Итак, система с ожиданием в случае простейшего потока и показательного времени обслуживания представляет собой случайный процесс Маркова. Это обстоятельство облегчает дальнейшие рассуждения.

### 3. Составление уравнений.

Задача теперь состоит в том, чтобы найти те уравнения, которым удовлетворяют вероятности  $[r_i c]$ . Одно из уравнения очевидно, а именно для каждого  $t$

$$[r_i c](2)$$

Найдём сначала вероятность того, что и момент  $t+h$  все приборы свободны. Это может произойти следующими способами: в момент  $t$  все приборы были свободны и за время  $h$  новых требований не поступало;

в момент  $t$  один прибор был занят обслуживанием требования, все остальные приборы свободны; за время  $h$  обслуживание требования было завершено и новых требований не поступило.

Остальные возможности, как-то: были заняты два или три прибора и за время  $h$  работа на них была закончена - имеют вероятность  $o(h)$ , как легко в этом убедится.

Вероятность первого из указанных событий равна  $[r_i c]$ , вероятность второго события  $[r_i c]$ .

Таким образом  $[r_i c]$ .

Отсюда очевидным образом приходим уравнению

Перейдём теперь к составлению уравнений для  $[r_i c]$  при  $[r_i c]1$ .

Рассмотрим отдельно два различных случая:  $1[r_i c]$  и  $[r_i c]$ . Пусть в начале  $1[r_i c]$ . Перечислим только существенные состояния, из которых можно прийти в состояние  $[r_i c]$  в момент  $t+h$ . Эти состояния таковы:

В момент  $t$  система находилась в состоянии  $[r_i c]$ , за время  $h$  новых требований не поступило и ни один прибор не окончил обслуживания.

Вероятность этого события равна:

$$[r_i c]$$

В момент  $t$  система находилась в состоянии  $[r_i c]$ , за время  $h$  поступило новое требование, но ни одно ранее находившееся требование не было закончено обслуживанием. Вероятность этого события равна

$$[r_i c]$$

В момент  $t$  система находилась в состоянии  $[r_i c]$ , за время  $h$  новых требований не поступило, но одно требование было обслужено. Вероятность этого равна

$[r_i c]$  Все остальные мыслимые возможности перехода в состояние  $[r_i c]$  за промежуток времени  $h$  имеют вероятность, равную  $o(h)$ .

Собрав воедино найденные вероятности, получаем следующее равенство:

[pic] Несложные преобразования приводят от этого равенства к такому уравнению для 1[pic];

[pic] (4)

Подобные же рассуждения для [pic] приводят к уравнению [pic] (5)

Для определения вероятностей [pic] получили бесконечную систему дифференциальных уравнений (2)-(5). Её решение представляет несомненные технические трудности.

### **Тема 8 Создание адекватных и детальных имитационных моделей**

Одним из важнейших параметров, характеризующих состояние региональной экономики, является инвестиционный процесс. Исследование инвестиционного процесса с позиций системного подхода позволяет рассмотреть инвестиционный процесс как некую целостность, проявляющуюся в рамках экономических систем. Инвестиционный процесс как система характеризуется: большим числом выполняемых функций, параметров и результатов функционирования; сложностью поведения системы, которая отражается в наличии переплетающихся и перекрывающихся взаимосвязей между переменными; неравномерными и непостоянными во времени внешними воздействиями; постоянной пространственной и временной связью, которая проявляется при взаимодействии элементов системы и фиксируется в виде определенной структуры; отражением взглядов, целей и ценностей субъектов хозяйствования; отсутствием зависимости структуры и характера взаимосвязей между элементами от уровня и типа развития экономической системы. Инвестиционный процесс, выступая как система, является основой развития региональной экономической системы.

Управление инвестиционным процессом предполагает реализацию мероприятий, направленных на получение определенного результата. С учетом вышеперечисленных особенностей инвестиционного процесса система управления инвестиционным процессом должна соответствовать следующим научным принципам.

1. Направленность действий субъекта управления на достижение конкретных целей. Четкое формулирование целей позволяет точно определить методы их достижения, сократить затраты за счет отказа от ненужных действий по управлению инвестиционным процессом.

2. Комплексность процесса управления, включающего планирование, анализ, регулирование и контроль, путем использования единой методической базы ко всем этапам управления и учета обратной связи в системе управления.

3. Единство перспективного и текущего планирования, обеспечивающего непрерывность, путем формирования инвестиционной

политики в разрезе стратегии и тактики. Их единство определяет не только устойчивость развития экономической системы, но и позволяет повысить точность прогнозирования и планирования инвестиционного процесса.

4. Контроль за принимаемыми управленческими решениями как важнейший фактор их реализации позволяет избежать необратимых последствий за счет непрерывного отслеживания параметров инвестиционного процесса, сопоставления их с запланированными значениями и своевременного исправления несоответствий.

5. Материальное и моральное стимулирование всех участников инвестиционного процесса, заключающееся в дополнительном субсидировании, льготировании и т.д. для инвесторов, в повышении заработной платы, в возможности использовать часть результата управления инвестиционным процессом на решение социальных задач для органов управления.

6. Индивидуальный подход к каждой экономической системе, позволяющий максимально использовать ее потенциал, реализуется посредством учета уровня экономической системы за счет горизонтальной дифференциации систем одного уровня.

7. Гибкость организационной структуры управления, позволяющей решать функциональные и управленческие задачи, дает возможность органам управления экономической системой быстро реагировать на изменяющиеся условия внешней среды, на новые требования рынка и адаптироваться к ним.

8. При формировании мероприятий, направленных на управление инвестиционным процессом, необходимо учитывать, что показатели, характеризующие факторы инвестиционной привлекательности, влияют на инвестиционный процесс в различной степени и разнонаправленно, и, как следствие, неодинаково поддаются воздействию со стороны управляющего субъекта.

Реализации эффективного управления инвестиционным процессом способствует выбор принципиально новых путей создания систем управления, опирающихся на новые информационно-аналитические технологии, которые позволяют оптимально организовывать деятельность в изменяющихся рыночных условиях. Использование устаревших методов и средств тормозит переход системы управления экономикой на новые организационные формы, настоятельно требует поиска нетрадиционных путей развития.

Создание новых инструментальных средств, использующих принципы объектного ориентирования информации в многомерной системе социально-экономических координат, позволит на их основе разработать системы нового класса, способные на более высоком интеллектуальном уровне решать задачи целенаправленного инвестирования в региональной экономике. Во-первых, это система учета, планирования и контроля при совершении действий с материальными, финансовыми и информационными ресурсами. В основе системы стоит результативная работа по решению задач, поставленных Норбертом Винером, Стаффордом Биром, Н.Н. Моисеевым, С.П.

Никаноровым, другими учеными и специалистами в области кибернетики и информационно-аналитических технологий. В современных условиях устаревшая информация – дезинформация, требуется полная и оперативная управленческая информация, которая позволяет своевременно и обоснованно принимать решения. Для этого нужны, цитируя слова академика А.В. Петрова, «...системные решения стратегического прорыва».

Во-вторых, для создания новой по содержанию и принципу действия системы проектирования и моделирования инвестиций, среды инвестиционной деятельности и связанных деловых процессов необходимо опираться на труды знаменитых ученых, в том числе В.В. Леонтьева, результаты которого, так называемые экономические матрицы «затраты – выпуск», были внедрены в более чем 80 странах мира. В.В. Леонтьев отмечал, что большую часть управленческой информации можно получить не только с помощью официальной отчетности, но и с помощью тонких способов изучения реальной жизни на основе использования методов моделирования. Состояние развития компьютерной техники в то время не позволило ученому расширить возможности своих методов. Тогда вряд ли было бы возможным перейти от матричных, только математических решений в сторону многомерных, многофакторных структурно-динамических балансовых моделей. Новые технологии, использующие принцип объектного ориентирования информации в многомерной системе «социальных координат», развивают учение В.В. Леонтьева до неограниченных возможностей.

В настоящее время в управлении инвестиционным процессом целесообразно использовать новые методы и инструменты аналитической работы, что на несколько порядков повысит эффективность и безопасность деятельности, точность экономических результатов, снижение инвестиционных рисков. Эффект от использования новых инструментальных средств проектирования и моделирования процессов сократит потери неплатежей, повысит рентабельность и производительность труда, усилит инвестиционную привлекательность, устойчивость и стабильность экономической системы, позволит решить многие социальные проблемы. Профессионально организованная информационно-аналитическая работа по обоснованию путей развития, расчета инвестиционных ресурсов позволит оперативно ориентироваться в происходящих событиях, устранять дисбалансы и диспропорции; своевременно выявлять достоверные источники информации; вырабатывать объективные данные; распределять информацию для решения частных и общих задач; видеть влияние внешних и внутренних факторов на действия участников инвестиционной и другой деятельности и многое другое, что способствует более быстрому и точному решению поставленных задач, достижению намеченных целей. Из вышесказанного следует, что информационно-аналитическая система объединяет: системное рассмотрение предметной области исследований; системную информационно-аналитическую работу сотрудников; имитационную, структурно-динамическую, балансовую, многомерную, многофакторную

модель предметной области; систему человеко-машинного алгоритма действий.

Имитационная модель инвестиционного процесса – это инструмент, позволяющий субъекту – человеку, аналитику, руководителю – и объекту управления точнее достигать целевых результатов, получать более сложную, но совершенную систему, способную на детальном и комплексном уровнях адекватно реагировать на изменения условий функционирования объектов управления.

В имитационной модели принцип изоморфизма применяется к двум основным элементам: субъектам (организационным подразделениям, физическим и юридическим лицам) и деловым процессам. По своей сути они совершенно равноправны. Для воссоздания, интерпретации субъектов деятельности внутри модели инвестиционного процесса введено специальное многомерное пространство, позволяющее вмещать в себя абсолютно всех, в том числе потенциальных участников процессов и субъектов окружающей среды, фиксировать их место, функцию и значение.

Принцип системного анализа обеспечивает взаимодействие частей имитационной модели. Ни один из элементов сложной схемы инвестиционного процесса не может быть познан без учета его связей с другими элементами. Поэтому изучение сложных систем с помощью имитационного моделирования требует не только внутреннего структурного анализа, но и анализа внешних связей каждого из включенных в модель участников.

В имитационной модели за исследовательский прием берется синтез, позволяющий выявлять системные качества, присущие всей системе в целом. Объединение элементов в целое позволяет проектировать, моделировать и характеризовать каждую функцию элементов в общей системе. Цикл управления состоит из учета (фиксации), планирования и контроля состояния объекта управления. После регистрации информации об объекте управления в системе планируется действие (решение), которое после применения изменяет положение (состояние) объекта управления в среде деятельности. После того как объект перейдет в новое состояние, осуществляется контроль. Задачей контроля является определение отклонения нового состояния объекта от запланированного состояния. В цикле управления между этапами учета и планирования существует цикл информационно-аналитической работы. Цикл информационно-аналитической работы имеет последовательность добывания, сбора, обработки, анализа, оценки и прогноза. В результате системного взаимодействия получается новая, более сложная, но совершенная система. С одной стороны, она позволяет получать детальные характеристики объектов управления; с другой – производить синтез детальных характеристик в новое по качеству управленческое решение, в том числе по использованию инвестиционных ресурсов.

Основным преимуществом методического подхода, основанного на построении имитационных моделей, заключается в том, что модель является системой комплексного и компонентного построения, в которой функции

фактического и экспертного учета информации, анализа, планирования, контроля представляют единый, неразрывный, взаимосвязанный процесс. Следующим преимуществом системы является то, что она работает с информацией о ресурсах любого вида и назначения, автоматически моделируя динамику их преобразования по мере ввода информации. Кроме того, преимуществом системы является ее способность создавать имитацию и представление о состоянии всех и каждого участников процессов в структуре их динамических связей, гибкость в настройке и адаптации. Не менее важным достоинством системы является возможность контролировать проведение спланированных процессов, сигнализировать о возникающих отклонениях, несоответствиях, несанкционированных действиях участников, помогая вырабатывать механизмы влияния и направлять процессы в нужное русло развития.

Состав, структура построения и принципы работы системы объединяют управленческую информацию макро- и микроуровней в единую систему взаимосвязанных показателей, которые характеризуют реальное состояние, динамику и конкретные условия развития процессов в логике их структурной и динамической интеграции друг в друга. Преимуществом системы также является то, что техника работы с информацией унифицирована на всех уровнях управления и не претерпевает изменений. Система позволяет оценивать не только текущее, но и будущее состояние ресурсов и субъектов в зависимости от условий развития. Система позволяет создавать прогнозы и планы развития в балансовом отображении. Информация, подготавливаемая системой по отдельным направлениям, может быть использована для последующих видов анализа и прогнозирования на других инструментальных средствах, которые также могут быть включены дополнительными элементами в единый программный комплекс.

Реализация методических основ построения системы обеспечивает моделирование различных предметных областей деятельности, адаптации к воздействиям других окружающих систем; анализ воздействия происходящих изменений на социальную сферу, структуру экономических изменений; формирование законодательства и политики; исследования альтернативных сценариев развития при соблюдении балансовых пропорций социальных и экономических факторов; оперативное получение обоснованных прогнозов, выработку превентивных мер кризисным явлениям; контроль результатов работы с точки зрения безопасности.

Методы структурно-динамического имитационного моделирования позволяют отслеживать процессы не на плоскости, а в многомерном пространстве, видеть преобразования ресурсов во времени, наблюдать их переход из одного состояния в другое, вскрывать факторы, влияющие на процессы. Система создает прозрачность понимания сложных реальных процессов. Возможности имитационной модели определяют содержание основных этапов системных исследований: установление и описание объектов управления и управляющих ресурсов; формулирование связей участников процессов, их места и роли в модельном представлении;

обоснование расчетных показателей и критериев в рамках существенных свойств объектов управления; моделирование процессов на основе их декомпозиции, параметризации и композиции; выработка предложений для принятия решений в отношении каждого объекта управления, включенного в модель. Применение имитационной модели инвестиционного процесса определяет содержание структурного и функционального анализа: анализ объектов управления с установлением детальных отношений к среде деятельности; анализ связей, взаимодействия и взаимовлияния субъектов и объектов управления; анализ динамики изменения состояний объектов управления в структуре предметной и несвойственной сфер; выделение и изучение функций объектов и субъектов управления в динамике их связей, причин и следствий; учет, планирование и контроль показателей каждой функции, каждого субъекта, включенных в модель.

Новые отечественные информационно-аналитические технологии могут применяться в различных сферах деятельности, где требуется создание структурной и функциональной модели сложных процессов, оптимизация управления проектами, оценка деятельности, получение перспективных планов развития и контроля их исполнения.

Имитационная модель инвестиционного процесса – это инструмент, позволяющий субъекту – человеку, аналитику, руководителю – и объекту управления точнее достигать целевых результатов, получать более сложную, но совершенную систему, способную на детальном и комплексном уровнях адекватно реагировать на изменения условий функционирования объектов управления.

В имитационной модели принцип изоморфизма применяется к двум основным элементам: субъектам (организационным подразделениям, физическим и юридическим лицам) и деловым процессам. По своей сути они совершенно равноправны. Для воссоздания, интерпретации субъектов деятельности внутри модели инвестиционного процесса введено специальное многомерное пространство, позволяющее вмещать в себя абсолютно всех, в том числе потенциальных участников процессов и субъектов окружающей среды, фиксировать их место, функцию и значение.

Принцип системного анализа обеспечивает взаимодействие частей имитационной модели. Ни один из элементов сложной схемы инвестиционного процесса не может быть познан без учета его связей с другими элементами. Поэтому изучение сложных систем с помощью имитационного моделирования требует не только внутреннего структурного анализа, но и анализа внешних связей каждого из включенных в модель участников.

В имитационной модели за исследовательский прием берется синтез, позволяющий выявлять системные качества, присущие всей системе в целом. Объединение элементов в целое позволяет проектировать, моделировать и характеризовать каждую функцию элементов в общей системе. Цикл управления состоит из учета (фиксации), планирования и контроля состояния объекта управления. После регистрации информации об объекте управления

в системе планируется действие (решение), которое после применения изменяет положение (состояние) объекта управления в среде деятельности. После того как объект перейдет в новое состояние, осуществляется контроль. Задачей контроля является определение отклонения нового состояния объекта от запланированного состояния. В цикле управления между этапами учета и планирования существует цикл информационно-аналитической работы. Цикл информационно-аналитической работы имеет последовательность добывания, сбора, обработки, анализа, оценки и прогноза. В результате системного взаимодействия получается новая, более сложная, но совершенная система. С одной стороны, она позволяет получать детальные характеристики объектов управления; с другой – производить синтез детальных характеристик в новое по качеству управленческое решение, в том числе по использованию инвестиционных ресурсов.

Основным преимуществом методического подхода, основанного на построении имитационных моделей, заключается в том, что модель является системой комплексного и компонентного построения, в которой функции фактического и экспертного учета информации, анализа, планирования, контроля представляют единый, неразрывный, взаимосвязанный процесс. Следующим преимуществом системы является то, что она работает с информацией о ресурсах любого вида и назначения, автоматически моделируя динамику их преобразования по мере ввода информации. Кроме того, преимуществом системы является ее способность создавать имитацию и представление о состоянии всех и каждого участников процессов в структуре их динамических связей, гибкость в настройке и адаптации. Не менее важным достоинством системы является возможность контролировать проведение спланированных процессов, сигнализировать о возникающих отклонениях, несоответствиях, несанкционированных действиях участников, помогая вырабатывать механизмы влияния и направлять процессы в нужное русло развития.

Состав, структура построения и принципы работы системы объединяют управленческую информацию макро- и микроуровней в единую систему взаимосвязанных показателей, которые характеризуют реальное состояние, динамику и конкретные условия развития процессов в логике их структурной и динамической интеграции друг в друга. Преимуществом системы также является то, что техника работы с информацией унифицирована на всех уровнях управления и не претерпевает изменений. Система позволяет оценивать не только текущее, но и будущее состояние ресурсов и субъектов в зависимости от условий развития. Система позволяет создавать прогнозы и планы развития в балансовом отображении. Информация, подготавливаемая системой по отдельным направлениям, может быть использована для последующих видов анализа и прогнозирования на других инструментальных средствах, которые также могут быть включены дополнительными элементами в единый программный комплекс.

Реализация методических основ построения системы обеспечивает моделирование различных предметных областей деятельности, адаптации к

воздействиям других окружающих систем; анализ воздействия происходящих изменений на социальную сферу, структуру экономических изменений; формирование законодательства и политики; исследования альтернативных сценариев развития при соблюдении балансовых пропорций социальных и экономических факторов; оперативное получение обоснованных прогнозов, выработку превентивных мер кризисным явлениям; контроль результатов работы с точки зрения безопасности.

Методы структурно-динамического имитационного моделирования позволяют отслеживать процессы не на плоскости, а в многомерном пространстве, видеть преобразования ресурсов во времени, наблюдать их переход из одного состояния в другое, вскрывать факторы, влияющие на процессы. Система создает прозрачность понимания сложных реальных процессов. Возможности имитационной модели определяют содержание основных этапов системных исследований: установление и описание объектов управления и управляющих ресурсов; формулирование связей участников процессов, их места и роли в модельном представлении; обоснование расчетных показателей и критериев в рамках существенных свойств объектов управления; моделирование процессов на основе их декомпозиции, параметризации и композиции; выработка предложений для принятия решений в отношении каждого объекта управления, включенного в модель. Применение имитационной модели инвестиционного процесса определяет содержание структурного и функционального анализа: анализ объектов управления с установлением детальных отношений к среде деятельности; анализ связей, взаимодействия и взаимовлияния субъектов и объектов управления; анализ динамики изменения состояний объектов управления в структуре предметной и несвойственной сфер; выделение и изучение функций объектов и субъектов управления в динамике их связей, причин и следствий; учет, планирование и контроль показателей каждой функции, каждого субъекта, включенных в модель.

Новые отечественные информационно-аналитические технологии могут применяться в различных сферах деятельности, где требуется создание структурной и функциональной модели сложных процессов, оптимизация управления проектами, оценка деятельности, получение перспективных планов развития и контроля их исполнения.

## **Тема 9 Моделирование вычислительных и операционных систем.**

### **Основы моделирования процессов**

Эффективность построения и использования корпоративных информационных систем стала чрезвычайной актуальной задачей, особенно в условиях недостаточного финансирования информационных технологий на предприятиях.

Критериями оценки эффективности могут служить снижение стоимости реализации информационной системы, соответствие текущим требованиям и требованиям ближайшего времени, возможность и стоимость дальнейшего развития и перехода к новым технологиям.

Основу информационной системы составляет вычислительная система, включающая такие компоненты, как кабельная сеть и активное сетевое оборудование, компьютерное и периферийное оборудование, оборудование хранения данных (библиотеки), системное программное обеспечение (операционные системы, системы управления базами данных), специальное ПО (системы мониторинга и управления сетями) и в некоторых случаях прикладное ПО.

Наиболее распространенным подходом к проектированию информационных систем в настоящее время является использование экспертных оценок. В соответствии с этим подходом специалисты в области вычислительных средств, активного сетевого оборудования и кабельных сетей на основании имеющегося у них опыта и экспертных оценок осуществляют проектирование вычислительной системы, обеспечивающей решение конкретной задачи или класса задач. Этот подход позволяет минимизировать затраты на этапе проектирования, быстро оценить стоимость реализации информационной системы. Однако решения, полученные с использованием экспертных оценок, носят субъективный характер, требования к оборудованию и программному обеспечению также грешат субъективностью, как и оценка гарантий работоспособности и развиваемости предлагаемого проекта системы.

В качестве альтернативного может быть использован подход, предполагающий разработку модели и моделирование (имитацию работы - simulation) поведения вычислительной системы.

Бездефектное проектирование вычислительных систем

Можно говорить о "бездефектном" проектировании информационных систем. Оно достигается комплексным применением высокоуровневого моделирования (моделирования функций или бизнес-процессов) предприятия и низкоуровневого моделирования вычислительной системы. Общая условная схема бездефектного проектирования информационной системы приведена на рис. 1.

Использование высокоуровневого моделирования позволяет гарантировать полноту и правильность выполнения информационной системой функций, определенных заказчиком. То есть построенная модель безупречна по функциональности (система должна выполнять то, что задумано). Однако гарантировать, что конкретная реализация вычислительной системы на предприятии будет выполнять эти функции, высокоуровневое моделирование не может.

К системам высокоуровневого моделирования относятся такие системы, как ARIS, Rational Rose. С их помощью реализуются принципы структурного анализа, когда предприятие представляется в виде сложной системы, состоящей из разных компонентов, имеющих различного рода взаимосвязи друг с другом.

Эти средства позволяют определить и отразить в моделях основные компоненты предприятия, протекающих процессов, используемой информации, а также представить взаимосвязи между этими компонентами.

Создаваемые модели представляют собой документированную совокупность знаний об ИС предприятия - о его организационной структуре взаимодействиях между предприятием и прочими субъектами рынка, составе и структуре документов, последовательностях шагов процессов, должностных инструкциях отделов и их сотрудников.

Моделирование функций вычислительной системы напрямую сегодня не представляется возможным. Данная задача в полном объеме не разрешима.

Однако возможно моделирование работы системы в динамике (динамическое моделирование), при этом его результаты позволяют по косвенным показателям судить о функционировании всей системы.

Так, мы не можем проверить правильность функционирования сервера базы данных и программного обеспечения, однако по выявляемым задержкам на сервере, не обслуженным запросам и т. д. мы можем сделать вывод о его работе.

Таким образом, рассматриваемые системы предназначены не для функционального моделирования вычислительных систем (это, к сожалению, невозможно), а для динамического их моделирования.

Моделирование вычислительной системы позволяет произвести более точный, по сравнению с экспертными оценками, расчет необходимой производительности отдельных компонентов и всей системы в целом, в том числе системного и прикладного программного обеспечения.. При этом появляется возможность использовать не максимальные значения характеристик используемого вычислительного оборудования, а характеристики, учитывающие, специфику использования этого оборудования в конкретном учреждении.

Основу моделирования составляют модели оборудования и процессов (технологий, программного обеспечения), используемых при работе интересующего объекта. При моделировании на компьютере воспроизводятся реальные процессы в обследуемом объекте, исследуются особые случаи, воспроизводятся реальные и гипотетические критические ситуации. Основным достоинством моделирования является возможность проведения разнообразных экспериментов с исследуемым объектом, не прибегая к физической реализации, что позволяет предсказать и предотвратить большое число неожиданных ситуаций в процессе эксплуатации, которые могли бы привести к неоправданным затратам, а может, и к порче оборудования.

В случае моделирования вычислительных систем таким объектом является информационная система, определяющая способы получения, хранения, обработки и использования различной корпоративной и внешней информации.

В процессе моделирования возможно следующее:

- определение минимально необходимого, но обеспечивающего потребности передачи, обработки и хранения информации оборудования (даже не имеющего реальных аналогов) в настоящее время;
- оценка необходимого запаса производительности оборудования,

обеспечивающего возможное увеличение производственных потребностей в ближайшее время (один-два года);

- выбор нескольких вариантов оборудования с учетом текущих потребностей, перспективы развития на основании критерия стоимости оборудования;

- проведение проверки работы вычислительной системы, составленной из рекомендованного оборудования.

Использование моделирования для оптимизации производительности сети. Анализаторы протоколов незаменимы для исследования реальных сетей, но они не позволяют получать количественные оценки характеристик для еще не существующих сетей, находящихся в стадии проектирования. В этих случаях проектировщики могут использовать средства моделирования, с помощью которых разрабатываются модели, воссоздающие информационные процессы, протекающие в сетях.

Моделирование представляет собой мощный метод научного познания, при использовании которого исследуемый объект заменяется более простым объектом, называемым моделью. Основными разновидностями процесса моделирования можно считать два его вида - математическое и физическое моделирование. При физическом (натурном) моделировании исследуемая система заменяется соответствующей ей другой материальной системой, которая воспроизводит свойства изучаемой системы с сохранением их физической природы. Примером этого вида моделирования может служить пилотная сеть, с помощью которой изучается принципиальная возможность построения сети на основе тех или иных компьютеров, коммуникационных устройств, операционных систем и приложений.

Возможности физического моделирования довольно ограничены. Оно позволяет решать отдельные задачи при задании небольшого количества сочетаний исследуемых параметров системы. Действительно, при натурном моделировании вычислительной сети практически невозможно проверить ее работу для вариантов с использованием различных типов коммуникационных устройств - маршрутизаторов, коммутаторов и т.п. Проверка на практике около десятка разных типов маршрутизаторов связана не только с большими усилиями и временными затратами, но и с немалыми материальными затратами.

Но даже и в тех случаях, когда при оптимизации сети изменяются не типы устройств и операционных систем, а только их параметры, проведение экспериментов в реальном масштабе времени для огромного количества всевозможных сочетаний этих параметров практически невозможно за обозримое время. Даже простое изменение максимального размера пакета в каком-либо протоколе требует переконфигурирования операционной системы в сотнях компьютеров сети, что требует от администратора сети проведения очень большой работы.

Поэтому, при оптимизации сетей во многих случаях предпочтительным оказывается использование математического моделирования. Математическая модель представляет собой совокупность соотношений (формул, уравнений,

неравенств, логических условий), определяющих процесс изменения состояния системы в зависимости от ее параметров, входных сигналов, начальных условий и времени.

Особым классом математических моделей являются имитационные модели. Такие модели представляют собой компьютерную программу, которая шаг за шагом воспроизводит события, происходящие в реальной системе. Применительно к вычислительным сетям их имитационные модели воспроизводят процессы генерации сообщений приложениями, разбиение сообщений на пакеты и кадры определенных протоколов, задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов и кадров внутри операционной системы, процесс получения доступа компьютером к разделяемой сетевой среде, процесс обработки поступающих пакетов маршрутизатором и т.д. При имитационном моделировании сети не требуется приобретать дорогостоящее оборудование - его работы имитируется программами, достаточно точно воспроизводящими все основные особенности и параметры такого оборудования.

Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы. В результате за несколько минут можно воспроизвести работу сети в течение нескольких дней, что дает возможность оценить работу сети в широком диапазоне варьируемых параметров.

Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе наблюдения за протекающими событиями статистические данные она и более важных характеристиках сети: временах реакции, коэффициентах использования каналов и узлов, вероятности потерь пакетов и т.п.

Существуют специальные языки имитационного моделирования, которые облегчают процесс создания программной модели по сравнению с использованием универсальных языков программирования. Примерами языков имитационного моделирования могут служить такие языки, как SIMULA, GPSS, SIMDIS.

Существуют также системы имитационного моделирования, которые ориентируются на узкий класс изучаемых систем и позволяют строить модели без программирования. Подобные системы для вычислительных сетей рассматриваются ниже.