

Раздел 4.

Методы изучения и проведения экспериментальных исследований инфокоммуникационных систем и сетей

Лектор :

доцент кафедры ССС ПГУТИ,

д.т.н. Гребешков А.Ю.

Самара
2021 год

4.1 Анализ и синтез инфокоммуникационных сетей и систем: задачи и методы

Метод – совокупность приемов и операций познания и практической деятельности; способ достижения определенных результатов в познании и практике.

Анализ и синтез являются наиболее общими методами.

Анализ – процедура мысленного, а часто и реального расчленения исследуемого объекта (явления, процесса), свойств предмета или отношения между предметами на части (признаки, свойства, отношения).

Синтез – соединение различных элементов, сторон предмета в единое целое (*систему*), которое осуществляется как в практической деятельности, так и в процессе познания.

Модель – объект - заместитель объекта оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала.

Замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется **моделированием**.

Анализ требуется для нахождения аналитических соотношений между определенными параметрами сетей.

Процесс вывода формул достаточно сложен, особенно для сетей с большим числом элементов.

Результаты имеют большую ценность, поскольку дают возможность анализа зависимости результата от изменения различных факторов.

Как правило, аналитические соотношения получаются для сетей с небольшим числом сетевых элементов.



Применяемые математические методы для анализа сетей

- Теория массового обслуживания
- Марковские процессы (цепи)
- Методы диффузной аппроксимации и декомпозиции
- Методы теории конечных автоматов, сети Петри
- Методы тензорного анализа
- Методы теории графов
- Методы теории множеств
- Фракталы и самоподобные процессы
- Методы сетевого исчисления (network calculus).

Математическое выражение, описывающее математическую зависимость между входными и выходными данными и показывающая вид такой функциональной зависимости вида

$$U = f(x),$$

где

x — совокупность входных данных;

f — *зависимость*, которая записана в виде математической функции;

U — совокупность выходных данных.

Цель решения задачи оптимизации записывается в виде так называемой **целевой функции**, для которой необходимо отыскать **экстремум** (минимум или максимум).

На входящие в функцию параметры могут накладываться ограничения, указывающие, в каких пределах могут изменяться значения искомых параметров.

В оптимизационных задачах отыскивается такое значение x , при котором **критерий**, характеризующий **качество функционирования системы** (скалярная величина) получает наибольшее или наименьшее значение (либо достигает граничного уровня):

$$U = f(x, y) \rightarrow \max.$$

где

y — вектор переменных, не поддающихся управлению, но влияющих на U (*шумы, помехи*);

f — функция, задающая отношения между всеми указанными величинами.



Оценка значений пропускной способности, качества, надежности, устойчивости сетей связи при определенных параметрах поступающей нагрузки и дисциплинах обслуживания заявок.



Нахождение оптимальной, в некотором смысле, структуры сети связи, при заданных параметрах пропускной способности каналов, зонах покрытия, интенсивности поступающего трафика. При синтезе сети обычно полагается заданным расположение узлов сети.

К частным задачам синтеза можно отнести задачи выбора оптимальной топологии сети, выбор оптимального количества и места расположения узлов связи и т. д.

Теория массового обслуживания – теория очередей, раздел теории вероятностей, изучающий математические модели разного рода реальных *массового обслуживания систем*.

Эти модели представляют собой случайные процессы специального вида, которые называются иногда процессами обслуживания. Чаще всего используется описательное определение этих процессов, поскольку формальное их построение оказывается весьма сложным и не всегда эффективным.

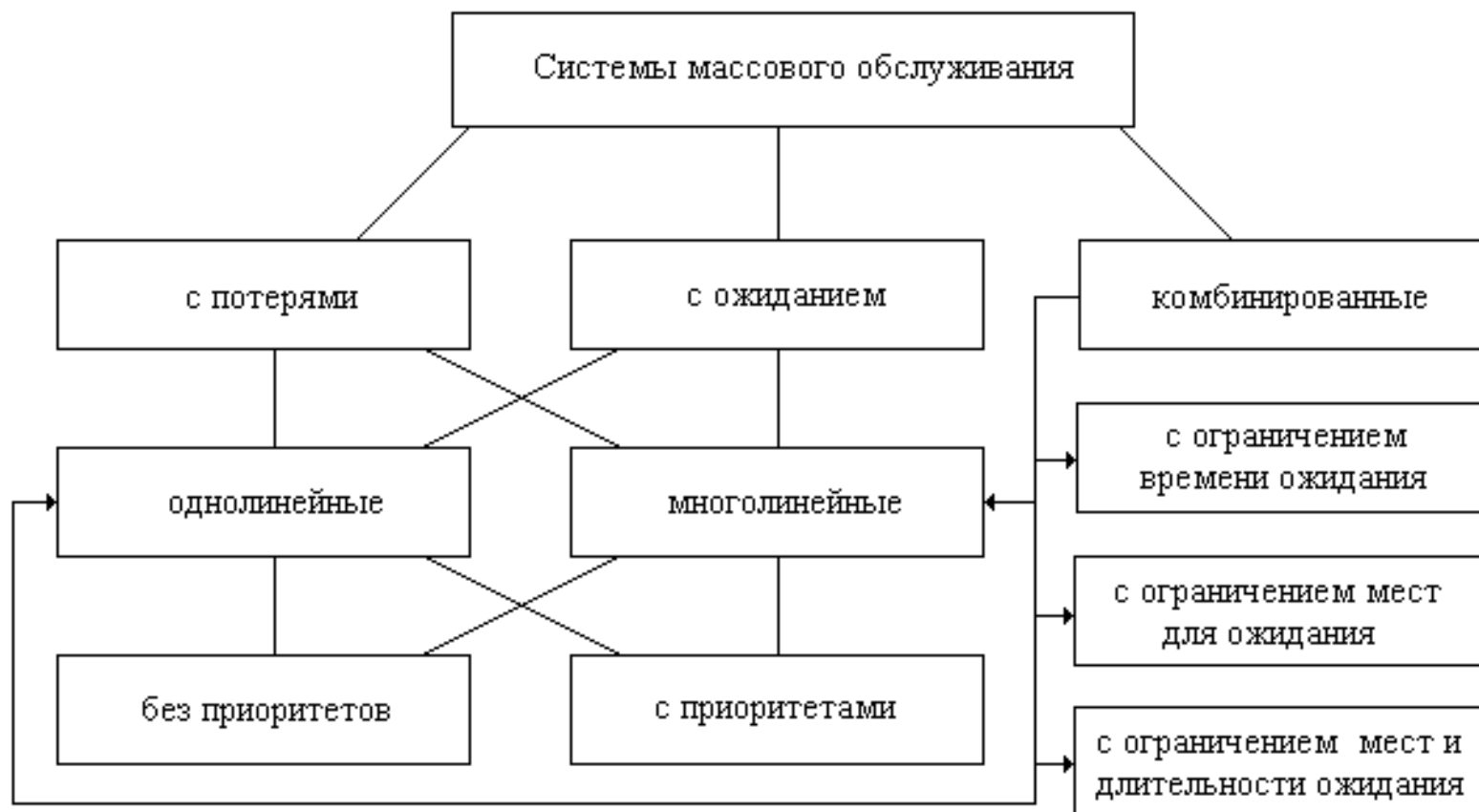
Система массового обслуживания - понятие, которое включает в себя случайный «входящий» поток требований (заявок, вызовов, пакетов), нуждающихся в «обслуживании», и механизм (алгоритм), осуществляющий это «обслуживание».



- Вероятностное распределение моментов поступлений заявок на обслуживание (единичных или групповых)
- Вероятностное распределением времени продолжительности обслуживания.
- Описание конфигурации обслуживающей системы (параллельное, последовательное или параллельно-последовательное обслуживание).
- Количество и производительность обслуживающих каналов.
- Дисциплиной обслуживания очереди.
- Мощность источника заявок.



- Вероятность немедленного обслуживания поступившей заявки.
- Вероятность отказа в обслуживании поступившей заявки.
- Относительная и абсолютная пропускная способность системы.
- Средний процент заявок, получивших отказ в обслуживании.
- Среднее время ожидания в очереди.
- Средняя длина очереди.
- Средний доход от функционирования системы в единицу времени
и другие!



(с)Соколов В.А.

Классификация СМО Кендалла-Башарина

A/B/C(:)D/E

- A** – закон распределения времени поступления заявок (M–экспоненциальный, E–эрланговский, Hr гиперэкспоненциальное распределение с r этапами, D–детерминированный, G–произвольный характер распределения)
- B** – закон распределения времени обслуживания приборами заявок, поступивших в СМО;
- C** – число обслуживающих приборов (1 – для одноканальной системы, I – для многоканальной, " ∞ " – бесконечно большое число);
- D** – число мест для ожидания (если число мест не ограничено, то данное значение опускается; для конечного числа мест указывается r или n ; "O" указывает на дисциплину обслуживания с потерями, символ " ∞ " говорит о неограниченной емкости буферного накопителя на входе СМО.);
- E** – дисциплина обслуживания заявок (FIFO, первым пришел – первым ушел, LIFO, последним пришел – первым ушел, RANDOM случайный порядок обслуживания).

M/M/1 – СМО с одним обслуживающим прибором, бесконечной очередью, экспоненциальными законами распределения интервалов времени между поступлениями заявок и времени обслуживания, дисциплиной обслуживания FIFO;

E/H/I/r/LIFO – СМО с I обслуживающими приборами, конечной очередью длиной r , эрланговским законом распределения интервалов между поступлениями заявок, гиперэкспоненциальным распределением времени обслуживания приборами, дисциплиной обслуживания LIFO;

M/M/m – СМО с экспоненциальным распределением моментов поступления заявок, экспоненциальным распределением времени обслуживания требований в m одинаковых параллельно работающих приборах, с безграничной очередью).



M/M/1

Полагаем что $\lambda < \mu$,

где λ – интенсивность поступающих заявок, промежутки времени между поступлением двух последовательных заявок описываются

функцией вида:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где

λ – интенсивность потока поступающих заявок;

t – время.

μ – интенсивность обслуживания потока заявок, т.е. в среднем непрерывно занятый канал будет выдавать μ обслуженных заявок.

Промежутки времени между обслуживанием двух последовательных заявок описываются функцией вида:

$$F(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

где

μ – интенсивность потока обслуженных заявок;

t – время.

Вероятность того, что в системе находится n заявок:

$$P_n = (1 - r)r^n, n = 1, 2, 3, \dots,$$

где $r = \frac{\lambda}{\mu}, r < 1$, приведенная интенсивность потока (коэффициент загрузки), которая принимается равной меньше 1 т.е. очередь не растет безгранично; это предельный стационарный режим работы СМО.

$$L_S = \sum_{n=0}^{\infty} n \times P_n = \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad \text{где } \rho - \text{приведенная}$$

интенсивность потока, $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, т.е.
вероятность того, что канал занят.



Средняя продолжительность пребывания заявки в системе равна:

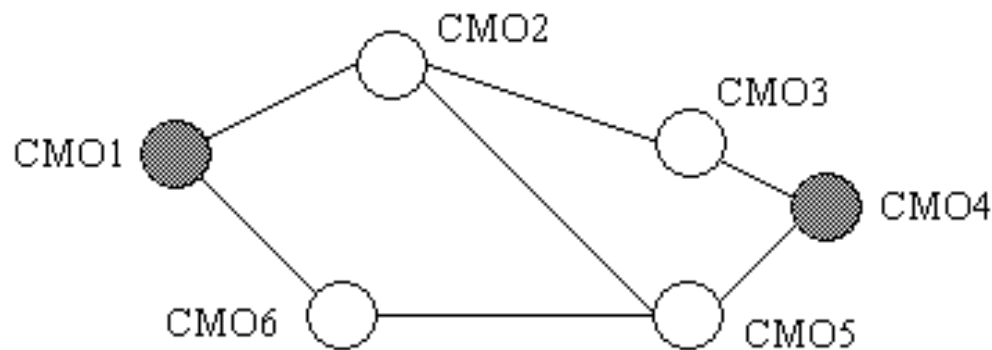
$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{1}{(\mu \times (1 - \rho))} .$$

Среднее число заявок в очереди на обслуживание:

$$L_q = L_s - \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\rho^2}{(1 - \rho)} .$$

Средняя продолжительность пребывания заявки в очереди на обслуживание составляет:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{\rho}{(\mu(1 - \rho))} .$$



СеМО -
совокупность
нескольких систем
массового
обслуживания,
обслуживающих
заявки

СМО1 и СМО4 описывают процессы функционирования УС – истоков и стоков(получателей) информации. СМО 2,3,5,6 являются моделями для транзитных УС. СеМО можно представить в виде графа, структура которого определяется принципом обслуживания заявок.



Случайные последовательности, обладают **марковским свойством** если есть условная независимость прошлого и будущего при известном настоящем.

Дискретная цепь Маркова задана если выполняется свойство:

$$P[X_n = j | X_1 = i_1, X_2 = i_2, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}] = P[X_n = j | X_{n-1} = i_{n-1}].$$

В цепи Маркова поток случайных величин определяется только вероятностью перехода от предыдущего значения случайной величины к последующему.

Зная начальное распределение вероятностей, можно найти распределение на любом шаге. Величины i_n можно интерпретировать как номера состояний некоторой динамической системы с дискретным множеством состояний (типа конечного автомата).



Если вероятности переходов не зависят от номера шага, то такая цепь Маркова называется однородной и ее определение задается набором вероятностей:

$$p_{ij} = P[X_n = j | X_{n-1} = i].$$

Для однородной Марковской цепи можно определить вероятности перехода из состояния i в состояние j за m шагов:

$$p_{ij}^{(m)} = P[X_{n+m} = j | X_n = i] = \sum_k p_{ik}^{(m-1)} p_{kj}, m = 2, 3, \dots$$



1. Громоздкость вычислений для сложных моделей, решения сложной системы алгебраических уравнений.
2. Сложность аналитического описания вычислительных процессов сетей связи
3. Недостаточная развитость аналитического аппарата в ряде случаев не позволяет выбирать для исследования наиболее важные характеристики сетей, особенно при описании процессов функционирования программных средств операционных систем и другого ПО.

4.2 Синтез инфокоммуникационных сетей: задачи и методы



Задача синтеза в общем включает в себя создание структуры проектируемой системы и расчет ее параметров.

Эти две части задачи синтеза называют ***структурным и параметрическим синтезом.***



Параметрический синтез непрерывных систем обычно реализуется с помощью методов и алгоритмов оптимизации. Методы оптимизации применяют, когда управляемые параметры непрерывны, т. е. могут принимать любые значения в пределах непрерывной допустимой области.

Для синтеза объектов с дискретными внутренними параметрами используются методы ***дискретного математического программирования***.

Если при оптимизации часть управляемых параметров дискретна, а часть параметров имеет непрерывный характер, задача должна решаться методами ***частично дискретного программирования***.



Структура объектов определяется природой элементов и способом их связи между собой в составе объекта.

Результатом **структурного синтеза** должны быть или перечень типов элементов вместе с таблицей соединений, или схема расположения элементов с указанием их типов, или схема алгоритма и т. п.

В общем случае синтез структуры, является задачей выбора некоторого варианта, представляющего собой элемент счетного множества.



Когда множество вариантов синтеза оказывается конечным в том числе по причине искусственных ограничений задача синтеза становится комбинаторной.

Комбинаторную задачу можно решить путем анализа и сравнения всех возможных вариантов, т. е. с помощью полного **перебора вариантов**.

На практике полный перебор обычно превращается в недопустимо трудоемкую процедуру. Поэтому приходится выполнять лишь частичный перебор.

Пример постановки оптимизационной задачи структурного синтеза

Заданы число и расположение источников и получателей информации, требования к потокам сообщений между парами источник–получатель, известны стоимости оборудования сети.

Необходимо минимизировать стоимость всех линий на множестве возможных топологий, пропускных способностей каналов передачи и способах выбора пути (маршрута) передачи при ограничениях на пропускную способность каналов, среднюю задержку в передаче информации и надежность сети.

К уровню сложности 1 относят наиболее простые задачи, где синтез отсутствует.

На уровне сложности 2 — выбор нужного варианта из конечного множества, причем все элементы этого множества заранее известны, их количество невелико и сравнение всех вариантов осуществляется за приемлемое время.

К уровню сложности 3 относят задачи выбора на множестве с большим, но конечным числом вариантов при условии, что число вариантов и сами варианты заранее известны.

К уровню сложности 4 относят задачи выбора варианта на множестве с заранее не известным числом элементов или вообще в бесконечном множестве. Например, задача синтеза принципиальной электрической схемы.

К уровню сложности 5 относят задачи, решение которых возможно только на уровне открытий, т. е. планировать их решение нельзя.

- Перебор вариантов из архива типовых структур
- Перебор вариантов, генерируемых из библиотечных элементов
- Последовательный синтез
- Выделение варианта из обобщенной структуры
- Использование эвристических приемов
- Сведение задачи синтеза к задаче дискретного математического программирования

Решение задачи синтеза в рамках любого подхода обычно имеет поисковый характер, где на каждом шаге поиска выполняются три процедуры:

1. выбор или генерация очередного варианта;
2. оценка варианта;
3. принятие решения о дальнейших действиях.

В общем случае оценка варианта структуры требует:

- формирования математической модели, так как изменение структуры приводит к изменению вида уравнений модели;
- выполнения параметрической оптимизации, так как сравнивать варианты структуры имеет смысл при оптимальных значениях параметров.



1. Определяется структура сети и пропускные способности каналов связи. Основным критерием оптимальности является стоимость синтезируемой сети. При этом обычно не учитываются надежность характеристики сети.
2. Решение задачи синтеза в два этапа: сначала находится структура, отвечающая заданным надежностным и стоимостным характеристикам, а затем определяются оптимальные по выбранному критерию пропускные способности каналов сети

Для описания структуры сети и количественных оценок ее элементов используют следующие матрицы:

1. Матрица связности (смежности).
2. Матрица длин ребер (каналов связи).
3. Матрица пропускных способностей (емкостей) ребер.
4. Матрица стоимости (стоимость ребра между узлами)
5. Матрицы тяготений (требований на передачу потоков информации).



Рангом пути называется число ребер, образующих данный путь. Пропускная способность пути определяется наиболее узким местом – минимальной пропускной способностью ребер, образующих путь.

Связностью сети называется минимальное число независимых путей между любой парой узлов.

Сечение сети – избыточная совокупность ребер, которые надо изъять из сети, чтобы нарушилась ее СВЯЗНОСТЬ.

Пропускная способность сечения определяется как сумма пропускных способностей ребер, входящих в данное сечение.



Сети с параллельным соединением элементов.

Сети с последовательным соединением элементов.

Сети радиальным соединением элементов (звездообразным) соединением элементов.

Другие структуры могут быть получены путем комбинации простейших структур.

Существующие сети в большинстве случаев являются многоуровневыми. Структура сети каждого уровня может обладать своей внутренней иерархией.



Декомпозиция позволяет свести решение сложной задачи к ряду более простых. В практике проектирования общая задача синтеза топологической структуры сети разбивается на ряд подзадач:

- определение числа и местоположения узлов связи;
- синтез местных сетей;
- синтез магистральной сети.

Решение перечисленных частных задач, в совокупности составляющих общую задачу синтеза, осуществляется, как правило, с использованием *приближенных эвристических методов*.

4.3 Моделирование инфокоммуникационных сетей и систем связи

Полнота модели – модель должна предоставлять пользователю возможность получения необходимого набора характеристик, оценок системы с требуемой точностью и достоверностью.

Гибкость модели – модель должна давать возможность воспроизводить различные ситуации при варьировании структуры, алгоритмов и параметров модели. Причем, структура должна быть блочной, т.е. допускать возможные замены, добавления и исключения некоторых частей без переделки всей модели.

Компьютерная реализация модели должна соответствовать имеющимся технически ресурсам.

1. Построение концептуальной (описательной) модели некоторой системы и её формализация
2. Алгоритмизация модели и её программная реализация
3. Получение и интерпретация результатов моделирования



1. Проведение границ между системой и внешней средой.
2. Исследование моделируемого объекта с точки зрения выделения основных составляющих процесса функционирования системы (по отношению к целям моделирования)
3. Переход от содержательного описания системы к формализованному описанию свойств процесса функционирования системы, т.е. к концептуальной модели. Исключаются некоторых второстепенные элементы описания. Предполагается, что они не оказывают существенного влияния на ход процессов, исследуемых в системе с помощью модели.
4. Основные элементы модели группируются в блоки. Блоки I-ой группы представляют собой имитатор воздействия внешней среды. Блоки II-ой групп являются собственно моделью функционирования. Блоки III группы носят вспомогательный характер для реализации I-й и II-й групп и для фиксации результатов моделирования.
5. Процесс функционирования системы разбивается на подпроцессы так, чтобы построение отдельных моделей подпроцессов было элементарным и не вызывало трудностей.

Под **моделированием** подразумевают построение математической модели, которая имеет вид функциональной зависимости

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

В качестве функции f можно рассматривать такой показатель эффективности системы, как, например, полезную скорость передачи данных, а в качестве параметров x_i - все параметры данной сети, от которых зависит f .



Детерминированное моделирование отображает детерминированные процессы, т.е. такие, в которых отсутствуют всякие случайные воздействия.

Стохастическое моделирование отображает случайные, вероятностные процессы и события.

Статическое моделирование служит для описания сложной системы в конкретный момент времени.

Динамическое моделирование отражает поведение системы во времени.

Дискретное моделирование используется для описания процессов, происходящих в дискретные моменты времени.

Непрерывное моделирование используется для описания непрерывных во времени процессов.

Дискретно-непрерывное моделирование используется для тех случаев, когда хотят отразить наличие как дискретных, так и непрерывных процессов в системе.

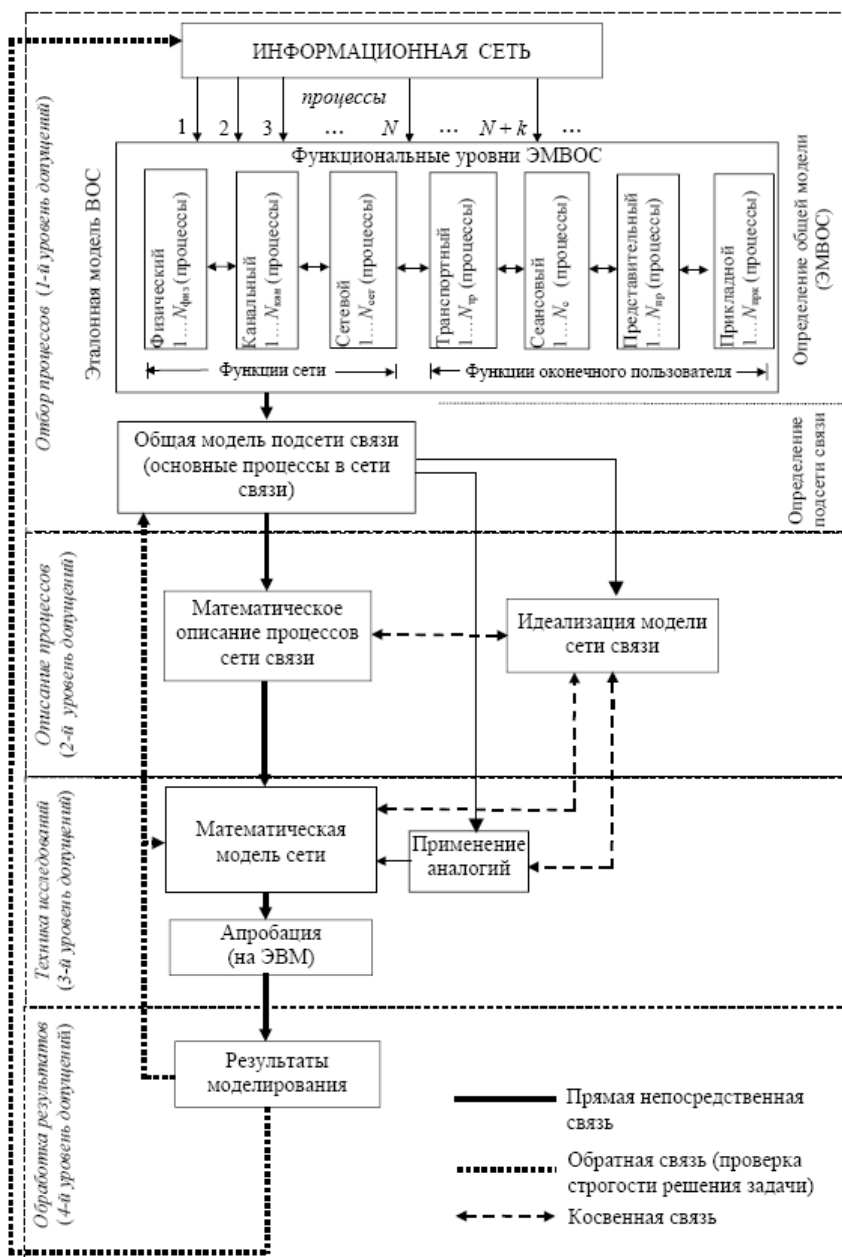


1. Разработка моделирующего алгоритма.
2. Разработка текста программы.
3. Выбор технического средства для реализации компьютерной модели.
4. Этап программирования модели (программирование и отладка).
5. Проверка достоверности модели на различных работающих тестовых примерах.
6. Составление технической документации (логические схемы, алгоритмы программ, тексты программ)



1. Планирование испытаний на ЭВМ на модели системы, составление плана проведения эксперимента с указанием комбинации переменных и параметров, для которых должен проводиться эксперимент.
2. Проведение рабочих/тестовых расчетов (контрольная калибровка модели)
3. Статистическая обработка результатов расчетов.
4. Интерпретация результатов моделирования, подведение итогов
5. Составление итогового отчета и выводы по результатам моделирования.

Процесс функционирования системы	Математическая модель	Обозначение
Непрерывно- детерминированный подход	Дифференциальные, интегральные, интегро- дифференциальные уравнения	D-схема
Дискретно- детерминированный подход	Конечные (дискретные) автоматы	F-схема
Дискретно- стохастический подход	Вероятностные автоматы	P-схема
Непрерывно- стохастический подход	Система массового обслуживания	Q-схема
Обобщенные (универсальный)	Декомпозиция и анализ отдельных уровней (агрегатов) системы	A-схема



Под **математическим моделированием** понимается процесс установления данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого **математической моделью** и исследование этой модели, позволяющее получить характеристики реального объекта.

Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения.



1. **Аналитический способ** - получение в общем виде зависимости выходных характеристик от исходных.
2. **Численный способ** - нельзя решить сложные уравнения в общем виде. Результаты получают для конкретных начальных данных.
3. **Качественный способ** - нет возможности получения конкретных решений, но можно выделить некоторые свойства объектов или решений уравнений, например, оценить устойчивость решения.

Алгоритм моделирования воспроизводит процесс функционирования системы во времени.

Имитируются элементарные явления, составляющие процесс функционирования системы, с сохранением логической структуры объекта и последовательности протекания процесса во времени. Это позволяет по исходным данным получить сведения о состоянии процесса в определенные моменты времени.

Преимуществом имитационного моделирования является возможность решения сложных задач.

Разрабатываются алгоритмы, вырабатывающие случайные реализации заданных событий или потоков. Имитируются входные потоки, задаются случайные значения времени обслуживания заявок для каждого канала, а также дисциплина обслуживания очереди.

Работа алгоритма заключается в многократном воспроизведении случайных реализаций процесса прихода заявок и процесса их обслуживания при фиксированных условиях задачи.

Меняя условия задачи, параметры входных потоков и элементов СМО, можно получить качественные параметры данного СМО при тех или иных изменениях.

Оценка качественных параметров СМО осуществляется путем статистической обработки величин, полученных в результате моделирования.

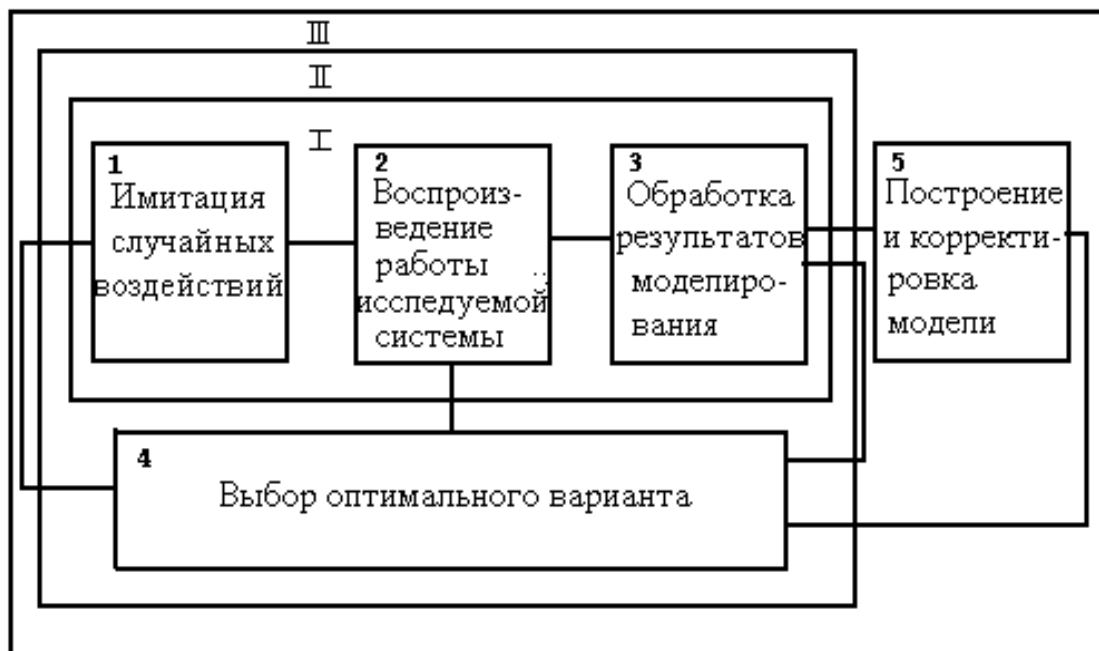


Стационарный или установившийся режим СМО наступает только после осуществления значительного количества имитационных реализаций.

Начальные реализации процесса могут существенно отличаться от установившихся.

Имитационные модели описывают объект исследования на некотором языке, который отображает элементарные явления, составляющие суть функционирования исследуемой системы с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени, особенностей и состава информации о состоянии процесса.

Алгоритмы, заложенные в основе имитационных моделей, достаточно точно воссоздают работу реальных устройств в сети, что позволяет на их основе строить комплексы моделирования сетей связи, например, с помощью пакетов NetworkSimulator2 (ns2), NetworkSimulator3(ns3).



Блоки 1,2,3 представляют операции по исследованию одного варианта модели, которые повторяются при различных реализациях случайных процессов, образуя внутренний цикл моделирования (**ЦИКЛ I**). **Блок 4** управляет изменения вариантов модели. При этом блоки 1,2,3 (внутренний цикл) охватываются цепями обратной связи (**ЦИКЛ I, оптимизацияI**). Связь 3-4-2 отражает адаптацию моделируемой системы. Динамический цикл корректировки модели представлен в **ЦИКЛ III**.

Под **статистическим моделированием** понимается воспроизведение при помощи ЭВМ процесса функционирования математической модели исследуемого объекта с учетом случайных факторов.

Математическая модель преобразуется в моделирующий алгоритм. При каждом запуске алгоритма (испытании) имитируется исследуемый процесс. В результате, после большого числа испытаний, получается среднее значение искомого параметра по большому количеству реализаций.

Результатом является математическое ожидание некоторой случайной величины Y , которая чаще всего является неслучайной функцией случайной величины X , имеющей распределение $p(x)$.

Выражение «случайная величина X имеет распределение $p(x)$ » означает:

- для непрерывной случайной величины, что ее плотность вероятности \tilde{p} равна $p(x)$;
- для дискретной случайной величины функцию $p(x)$ надо понимать как функцию вероятности.



Испытания реальной системы заменены на испытания математической модели. Каждое испытание сопровождается расчетом.

В результате проводится численный эксперимент на ЭВМ с математической моделью (модель выступает как объект исследования). При реализации испытания возможны и логические операции.

Расчетные и логические операции реализуются на ЭВМ с помощью соответствующих алгоритмов, которые в совокупности и составляют моделирующий алгоритм.

1. В настоящее время на сетях связи используется большое количество методов анализа характеристик каналов, сетей и трафика сетей связи.
2. Классические методы теории массового обслуживания не в полной мере пригодны для анализа больших сетей и систем, поэтому в последнее время часто используются методы имитационного и статистического моделирования.
3. Методы анализа и синтеза каналов и сетей связи применяются в системном единстве и позволяют эффективно решать оптимизационные задачи на современных телекоммуникациях.