

Н.Н. ЛЫЧКИНА

Имитационное моделирование экономических процессов

Учебное пособие

Москва

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	4
1.1. Краткий экскурс в системный анализ. Понятие компьютерного моделирования.	4
<i>Свойства сложных систем. Сложная система, как объект моделирования. Прикладной системный анализ – методология исследования сложных систем.</i>	4
<i>Общая классификация основных видов моделирования. Компьютерное моделирование. Метод имитационного моделирования.</i>	7
<i>Процедурно-технологическая схема построения и исследования моделей сложных систем. Основные понятия моделирования.</i>	9
<i>Отличительные особенности моделей различных классов.</i>	15
1.2. Сущность метода имитационного моделирования.	17
<i>Метод имитационного моделирования и его особенности. Имитационная модель: представление структуры и динамики моделируемой системы.</i>	17
<i>Понятие о модельном времени. Механизм продвижения модельного времени. Дискретные и непрерывные имитационные модели.</i>	19
<i>Проблемы стратегического и тактического планирования имитационного эксперимента. Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели.</i>	21
<i>Общая технологическая схема имитационного моделирования.</i>	24
<i>Возможности и область применения имитационного моделирования.</i>	24
Глава 2. БАЗОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ СТРУКТУРИЗАЦИИ И ФОРМАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ.	28
2.1. Процессно-ориентированные дискретные имитационные модели	28
<i>Содержание базовой концепции структуризации языка моделирования GPSS.</i>	29
<i>Системы массового обслуживания.</i>	31
<i>Функциональная структура GPSS.</i>	33
2.2. Агрегативные модели.	37
<i>Кусочно-линейный агрегат.</i>	37
<i>Схема сопряжения. Агрегативная система.</i>	39
<i>Оценка агрегативных систем как моделей сложных систем.</i>	41
2.3. Сети Петри и их расширения.	43
<i>Описание структур моделируемых проблемных ситуаций в виде сетей Петри.</i>	43
<i>Формальное и графическое представление сетей Петри.</i>	44
<i>Динамика сетей Петри.</i>	46
<i>Различные обобщения и расширения сетей Петри.</i>	48
<i>Технология разработки моделей.</i>	49
2.4. Модели системной динамики.	51
<i>Парадигма и методы системной динамики.</i>	51
<i>Общая структура моделей системной динамики.</i>	53
<i>Системные потоковые диаграммы моделей.</i>	59
<i>Основные этапы разработки моделей системной динамики.</i>	61
2.5. Агентное моделирование	67
<i>Парадигма и принципы построения агентных моделей</i>	67
<i>Техника разработки агентной модели.</i>	71
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	77
3.1. Основные этапы имитационного моделирования.	77
<i>Формулировка проблемы и определение целей имитационного исследования.</i>	79
<i>Разработка концептуальной модели объекта моделирования.</i>	83
<i>Формализация и программирование имитационной модели.</i>	86
<i>Сбор и анализ исходных данных.</i>	88
<i>Испытание и исследование свойств имитационной модели.</i>	90

<i>Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели. Анализ результатов моделирования и принятие решений.</i>	90
3.2. Инструментальные средства автоматизации моделирования	92
<i>Назначение языков и систем моделирования.</i>	92
<i>Классификация языков и систем моделирования. Технологические возможности современных систем моделирования.</i>	95
3.3 Испытание и исследование свойств имитационной модели	104
<i>Комплексный подход к тестированию имитационной модели.</i>	104
<i>Проверка адекватности модели.</i>	107
<i>Верификация имитационной модели.</i>	109
<i>Оценка точности результатов моделирования.</i>	111
<i>Оценка устойчивости результатов моделирования.</i>	112
<i>Анализ чувствительности имитационной модели.</i>	113
<i>Тактическое планирование имитационного эксперимента.</i>	114
3.4 Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели.	118
<i>Содержание направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели</i>	118
<i>Основные цели и типы вычислительных экспериментов в имитационном моделировании.</i>	120
<i>Основы теории планирования экспериментов.</i>	126
<i>Факторный анализ, полный и дробный факторный эксперимент.</i>	131
<i>Методология анализа поверхности отклика.</i>	142
Глава 4. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.	154
4.1 Наиболее существенные приложения дискретного имитационного моделирования в операционном и производственном менеджменте, логистике.	154
<i>Моделирование и анализ поведения бизнес-процессов.</i>	154
<i>Имитационное моделирование дискретных производственных систем.</i>	156
<i>Логистика складских комплексов.</i>	167
<i>Цифровое производство.</i>	170
<i>Имитационное моделирование в сетях поставок.</i>	173
4.2 Наиболее существенные приложения системной динамики.	184
<i>Динамика предприятия.</i>	184
<i>Динамика города.</i>	205
<i>Мировая динамика.</i>	230
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	247

Глава 1. МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Краткий экскурс в системный анализ. Понятие компьютерного моделирования.

Свойства сложных систем. Сложная система, как объект моделирования.

Прикладной системный анализ – методология исследования сложных систем.

В настоящее время понятие «система» в науке является до конца не определенным. Ученые приступили к исследованию сложных систем (СС).

В многочисленной литературе по системному анализу и системотехнике [2,21,32] отмечаются следующие основные *свойства сложных систем*:

1 свойство: **Целостность и членимость.**

Сложная система рассматривается как целостная совокупность элементов, характеризующаяся наличием большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов.

У исследователя существует субъективная возможность разбиения системы на подсистемы, цели функционирования которых подчинены общей цели функционирования всей системы. *Целенаправленность систем* интерпретируется, как способность системы осуществлять в условиях неопределенности и воздействия случайных факторов поведение (выбор поведения), преследующее достижение определенной цели.

2 свойство: **Связи.**

Наличие существенных устойчивых связей (отношений) между элементами или (и) их свойствами, превосходящими по мощности (силе) связи (отношения) этих элементов с элементами, не входящими в данную систему (внешней средой).

Под «связями» понимается некоторый виртуальный канал, по которому осуществляется обмен между элементами и внешней средой веществом, энергией, информацией.

3 свойство: **Организация.**

Свойство характеризуется наличием определенной организации – формированием существенных связей элементов, упорядоченным распределением связей и элементов во времени и пространстве. При формировании связей складывается определенная *структура* системы, а свойства элементов трансформируются в *функции* (действия, поведение).

При исследовании сложных систем обычно отмечают:

- Сложность функции, выполняемой системой и направленной на достижение заданной цели функционирования;

- Наличие управления, разветвленной информационной сети и интенсивных потоков информации;
- Наличие взаимодействия с внешней средой и функционирование в условиях неопределенности и воздействия случайных факторов различной природы.

4 свойство: **Интегративные качества.**

Существование интегративных качеств (свойств), т.е. таких качеств, которые присущи системе в целом, но не свойственны ни одному из ее элементов в отдельности. Наличие интегративных качеств показывает, что свойства системы хотя и зависят от свойств элементов, но не определяются ими полностью.

Примеры СС в экономической сфере многочисленны: организационно - производственная система, предприятие; социально - экономическая система, например регион; и др.

СС, как объект моделирования, имеет следующие характерные особенности:

- СС, как правило, уникальны. Существующие аналоги таких объектов заметно отличаются друг от друга. Следствием этого на практике является необходимость строить новые модели.
- Слабая структурированность теоретических и фактических знаний о системе. Так как изучаемые системы уникальны, то процесс накопления и систематизации знаний о них затруднен. Слабо изучены сами процессы. При идентификации сложных систем присутствует большая доля субъективных экспертных знаний о системе. СС слабопредсказуемы или контринтуитивны, как писал Дж. Форрестер.
- Рассмотренные выше интегративные качества СС предопределяют важный методологический вывод: СС не сводится к простой совокупности элементов, расчленяя СС на отдельные части, изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать свойства системы в целом. Поэтому *описание отдельных подсистем* необходимо выполнять с учетом их места во всей системе в целом, и наоборот, *система в целом исследуется исходя из свойств отдельных подсистем*. Одну из основных черт сложных систем составляет взаимодействие выделенных подсистем. Необходимо учитывать результат воздействия одной подсистемы на другую и их взаимодействие с внешней средой.
- Исследователи отмечают наличие большого числа взаимосвязанных подсистем, многомерность СС, обусловленную большим числом связей между подсистемами, что затрудняет идентификацию моделируемых объектов. Отметим также, что расчленение СС на подсистемы зависит от целей создания системы и взглядов исследователя на нее.
- Разнородность подсистем и элементов, составляющих систему. Это определяется и многообразием природы (физической разнородностью подсистем, имеющих различную

природу), и *разнородностью математических схем*, описывающих функционирование различных элементов, а также одних и тех же элементов на различных уровнях изучения.

- Присутствует необходимость исследовать систему *в динамике*, с учетом поведенческих аспектов.
- *Случайность и неопределенность факторов*, действующих в изучаемой системе. Учет этих факторов приводит к резкому усложнению задач и увеличивает трудоемкость исследований (необходимость получения представительного набора данных). Существует необходимость учета большого количества действующих в системе факторов.
- *Нелинейность и наличие причинно-следственных связей*.
- *Многокритериальность* оценок процессов, протекающих в системе. Невозможность однозначной оценки (выбора единого обобщенного критерия) диктуется следующими обстоятельствами:

- наличием множества подсистем, каждая из которых, вообще говоря, имеет свои цели, оценивается по своим локальным критериям;
- *множественностью показателей* (при системном подходе иногда противоречивых, – в этом случае, выбирается компромиссный вариант), характеризующих работу всей системы;
- наличием неформализуемых критериев, используемых при принятии решений, основанных на практическом опыте лиц, принимающих решение.

- При системном подходе *процесс исследования СС носит итерационный характер*. Исходная модель усложняется путем детализации. Однако создание полной модели СС (супермодели) бесполезно, т.к. она будет столь же сложна в изучении, как и система. Следствием этого является необходимость использования *ансамбля (комплекса) моделей* при анализе системы. Различные модели могут отражать как разные стороны функционирования системы, так и разные уровни отображения исследователем одних и тех же процессов.

Рассмотренные особенности исследования сложных систем обуславливают потребность в специальных способах построения и анализа моделей сложных систем. Традиционные аналитические модели здесь беспомощны – нужны специальные компьютерные технологии.

Методологией исследования СС является системный анализ. Один из важнейших инструментов прикладного системного анализа – компьютерное моделирование. Имитационное моделирование является наиболее эффективным и универсальным вариантом компьютерного моделирования в области исследования и управления сложными системами.

Общая классификация основных видов моделирования. Компьютерное моделирование. Метод имитационного моделирования.

Определение 1. **Модель** представляет собой абстрактное описание системы (объекта, процесса, проблемы, понятия) в некоторой форме, отличной от формы их реального существования.

Определение 2. **Моделирование** представляет собой один из основных методов познания, является формой отражения действительности и заключается в выяснении или воспроизведении тех или иных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстрактного описания в виде изображения, плана, карты, совокупности уравнений, алгоритмов и программ.

Итак, в процессе моделирования всегда существует *оригинал* (объект) и *модель*, которая воспроизводит (моделирует, описывает, имитирует) некоторые черты объекта.

Моделирование основано на наличии у многообразия естественных и искусственных систем, отличающихся как целевым назначением, так и физическим воплощением, сходства или подобия некоторых свойств: геометрических, структурных, функциональных, поведенческих. Это сходство может быть полным (*изоморфизм*) и частичным (*гомоморфизм*).

Моделирование появилось в человеческой деятельности со времен наскальной живописи и сооружения идолов, т.е. как только человечество стало стремиться к пониманию окружающей действительности; – и сейчас, по-существу, прогресс науки и техники находит свое наиболее точное выражение в развитии способности человека создавать модели объектов и понятий.

Исследуя современные СС, человечество придумало различные *классы моделей*. Развитие информационных технологий можно в известном смысле интерпретировать как возможность реализации моделей различного вида в рамках информационных систем различного назначения: Информационные системы управления, Системы распознавания образов, Системы искусственного интеллекта, Системы поддержки принятия решений. В основе этих систем лежат модели различных типов: семантические, логические, математические и т.п.

Приведем общую **классификацию основных видов моделирования** [1]:

- ***концептуальное моделирование*** – представление системы с помощью специальных знаков, символов, операций над ними или с помощью естественных или искусственных языков,
- ***физическое моделирование*** - моделируемый объект или процесс воспроизводится исходя из соотношения подобия, вытекающего из схожести физических явлений;
- ***структурно - функциональное*** - моделями являются схемы (блок-схемы), графики, диаграммы, таблицы, рисунки со специальными правилами их объединения и преобразования;

- **математическое (логико-математическое) моделирование** - построение модели осуществляется средствами математики и логики;
- **имитационное (программное) моделирование** - при котором логико-математическая модель исследуемой системы представляет собой алгоритм функционирования системы, программно-реализуемый на компьютере.

Указанные виды моделирования могут применяться самостоятельно или одновременно, в некоторой комбинации (например, в имитационном моделировании используются практически все из перечисленных видов моделирования или отдельные приемы).

Доминирующей тенденцией сегодня является взаимопроникновение всех видов моделирования, симбиоз различных информационных технологий в области моделирования, особенно для сложных приложений и комплексных проектов по моделированию. Так, например, имитационное моделирование включает в себя концептуальное моделирование (на ранних этапах формирования имитационной модели) и логико-математическое (включая методы искусственного интеллекта) - для целей описания отдельных подсистем и процессов модели, а также в процедурах обработки и анализа результатов вычислительного эксперимента и принятия решений. Технология проведения и планирования вычислительного эксперимента с соответствующими математическими методами привнесена в имитационное моделирование из физического (натурного) моделирования. Наконец, структурно-функциональное моделирование используется как при создании стратифицированного описания многомодельных комплексов, так и для формирования различных диаграммных представлений при создании имитационных моделей.

Понятие компьютерного моделирования сегодня трактуется шире традиционного понятия «моделирование на ЭВМ», поэтому нуждается в уточнении.

Компьютерное моделирование – метод решения задач анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели.

К компьютерному моделированию относят:

- *структурно-функциональное,*
- *имитационное.*

Под термином «компьютерная модель», чаще всего понимают:

- Условный образ объекта или некоторой системы объектов (или процессов), описанный с помощью взаимосвязанных компьютерных таблиц, блок-схем, диаграмм, графиков, рисунков, анимационных фрагментов, гипертекстов и т.д. и отображающих структуру и взаимосвязи между элементами объекта. Компьютерные модели такого вида мы будем называть *структурно-функциональными*;
- Отдельную программу (совокупность программ, программный комплекс) позволяющий с помощью последовательности вычислений по определенным операционным правилам

воспроизводить (имитировать) процессы функционирования объекта, системы объектов при условии воздействия на объект различных, как правило, случайных факторов. Такие модели мы будем называть *имитационными*.

Суть компьютерного моделирования заключена в получении количественных и качественных результатов на имеющейся модели. Качественные результаты анализа обнаруживают неизвестные ранее свойства сложной системы: ее структуру, динамику развития, устойчивость, целостность и др. Количественные выводы в основном носят характер анализа существующей СС или прогноза будущих значений некоторых переменных. Кстати, возможность получения не только качественных, но и количественных результатов составляет существенное отличие имитационного моделирования от структурно-функционального. Становление компьютерного моделирования связано с имитационным моделированием. Имитационное моделирование было исторически первым по сравнению со структурно-функциональным, без компьютера никогда не существовало. Имитационное моделирование имеет целый ряд специфических черт.

Методологией компьютерного моделирования является системный анализ (направление кибернетики, общая теория систем). Поэтому в освоении этого метода доминирующая роль отводится системным аналитикам. Сравним с моделированием на ЭВМ (например, математическим). Методологической основой здесь чаще всего являются: исследование операций, теория математических моделей, теория принятия решений, теория игр и другие.

Центральной процедурой системного анализа является построение обобщенной модели, отражающей все факторы и взаимосвязи реальной системы. Предметом компьютерного моделирования может быть любая сложная система, любой объект или процесс. Категории целей при этом могут быть самыми различными. Компьютерная модель должна отражать все свойства, основные факторы и взаимосвязи реальной сложной системы, критерии ее оценки и ограничения.

Компьютерное моделирование сегодня предлагает совокупность методологических подходов и развитых технологических средств, используемых для подготовки и принятия решений экономического, организационного и социального или технического характера.

Процедурно-технологическая схема построения и исследования моделей сложных систем. Основные понятия моделирования.

Выше мы рассмотрели различные классы моделей. Выбор метода моделирования для решения поставленной задачи, проблемы, исследования системы – является актуальной задачей, с которой системный аналитик должен уметь справляться.

С этой целью давайте уточним специфику имитационных моделей и их место среди моделей других классов. Кроме того, попробуем уточнить некоторые понятия и определения, с которыми

имеет дело системный аналитик в процессе моделирования, которые не всегда и везде трактуются однозначно и достаточно корректно. С этой целью рассмотрим *процедурно-технологическую схему построения и исследования моделей сложных систем* (рис.1.1.). Эта схема включает следующие этапы определения, характерные для любого метода моделирования:

1. системы (предметная, проблемная область);
2. объекта моделирования;
3. целевого назначения моделей;
4. требований к моделям;
5. формы представления;
6. вида описания модели;
7. характера реализации модели;
8. метода исследования модели.

Первые три этапа характеризуют *объект и цель исследования* и практически определяют следующие этапы моделирования. При этом важное значение приобретает корректное описание объекта и формулировка цели моделирования из предметной области деятельности исследователя.

1) *Предметная (проблемная) область* определяется физическими, химическими, техническими, технологическими, информационными, биологическими, экологическими, экономическими, социальными и другими возможными классами систем. (Сфера применения имитационных моделей весьма обширна, имитационное моделирование используется для исследования самых разнообразных систем: экономических, производственных, социальных, транспортных, систем массового обслуживания, вычислительных, информационных, включая международную деятельность, проблемы развития городов, глобальные (мировые) проблемы и многие другие.)

2) В качестве *объекта моделирования* в процессе исследования выступает не вся система, а ее «срез» - элемент, структура, отношение, организация, функция, отдельные процессы, поведение, развитие и т.д.

3) Каждая модель должна строиться *целенаправленно*. Целенаправленная модель представляет собой замену действительности с той степенью абстракции, которая полезнее для поставленной цели. Иначе говоря, модель прежде всего должна отражать те существенные свойства, те стороны моделируемого объекта, которые определены практической задачей. Очень важно правильно обозначить и сформулировать проблему, четко задать *цель* исследования, проводимого с помощью моделирования. Допустим, решено, что для решения поставленной задачи необходимо использовать моделирование.

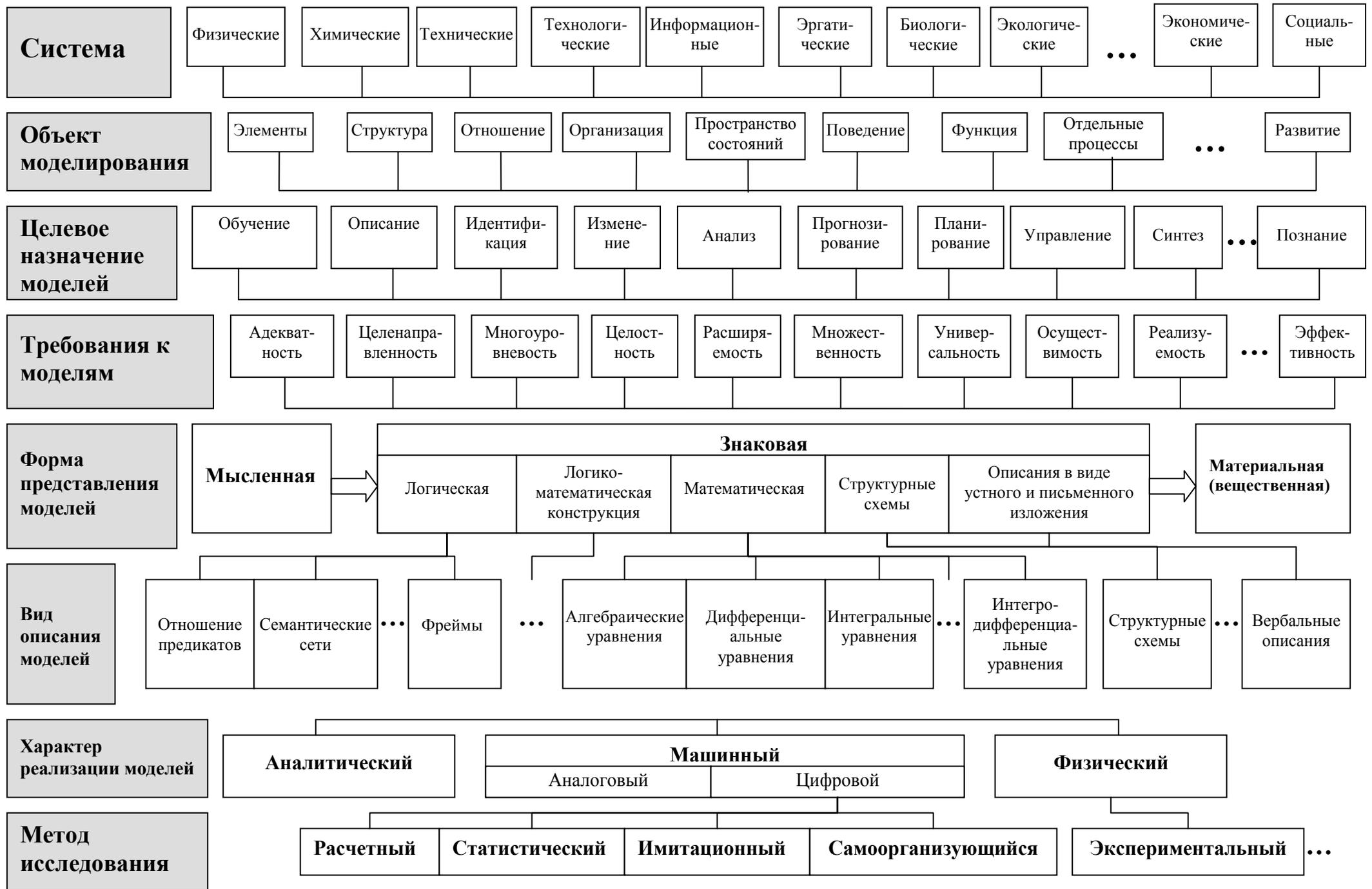


Рисунок 1.1. – Общая процедурно-технологическая схема построения и исследования сложных систем.

Моделирование успешно используется при решении большого круга *задач*: обучение, описание, сжатие, измерение, оценивание, прогнозирование, планирование, управление, синтез, идентификация, познание и др. Моделирование становится мощным средством в задачах анализа и синтеза сложных технических и экономических систем, или поиска эффективных решений (сложные разработки, проекты, новые программы).

Мышление исследователя, разработчика в зависимости от цели моделирования либо формирует модели реально существующих объектов в познавательной деятельности, либо создает идеальные модели еще не существующих систем в задачах проектирования. В тех и других случаях модели должны быть пригодны для решения поставленных задач.

4) *Требования к моделям.* Какими чертами должна обладать хорошая модель?

Моделирование связано с решением реальных задач и мы должны быть уверены, что результаты точно отражают истинное положение вещей – т.е. модель адекватна реальной действительности. Надо думать и о заказчике. Плоха та модель, которую не сможет использовать лицо, принимающее решение. Сложные системы необязательно требуют сложных моделей. Надо стремиться создавать простые модели, они более качественные и доступны для понимания пользователям.

Чтобы получить хорошую модель, она должна удовлетворять некоторым общепринятым требованиям. Такая модель должна быть:

- адекватной;
- надежной в смысле гарантии от абсурдных ответов;
- простой и понятной пользователю;
- целенаправленной;
- удобной в управлении и обращении, т.е. общение с ней должно быть легким;
- функционально полной с точки зрения возможностей решения главных задач;
- адаптивной, позволяющей легко переходить к другим модификациям или обновлять данные;
- допускающей постепенные изменения в том смысле, что, будучи вначале простой, она может во взаимодействии с пользователем становиться все более сложной.

Это очевидные моменты с позиции здравого смысла.

В зависимости от целевой направленности модели задаются специальные требования к самим моделям, наиболее характерными являются: целостность, отражение информационных свойств, многоуровневость, множественность (многомодельность), расширяемость, универсальность (абстрактность), осуществимость (реальная возможность построения самой модели и ее исследования), реализуемость (возможность материализации модели в виде реальной системы, например, на ЭВМ), эффективность (затраты временных, трудовых, материальных и других видов ресурсов на построение моделей и проведение экспериментов находятся в

допустимых пределах или оправданы). Значимость или приоритетность требований к модели непосредственно вытекают из назначения модели. Так, например, в познавательных задачах, задачах управления, планирования, описания важным требованием является адекватность модели объективной реальности; в задачах проектирования, синтеза уникальных систем наиболее важным является реализуемость модели, т.е. возможность материализации модели в реальную систему, например в САПР или систему поддержки принятия решений.

5) Цель моделирования и задание требований к модели, безусловно, определяют *форму представления модели*.

Любая модель (прежде чем стать объективно существующим предметом) должна быть конструктивно разработана, существовать в мысленной форме, далее переведена в знаковую форму и, наконец, материализована, т.е. можно выделить три формы представления моделей:

- мысленные (образы);
- *знаковые* (структурные схемы, описания в виде устного и письменного изложения, логические, математические, логико-математические конструкции);
- материальные (лабораторные и действующие макеты, опытные образцы).

Особое место в моделировании занимают *знаковые*, в частности логические, математические, логико-математические модели, а также модели, воссозданные на основе вербального описания, составленного экспертами. Знаковые модели используются для моделирования многообразных систем. Это направление значимо с бурным развитием вычислительных систем. Ограничимся ими в дальнейшем рассмотрении.

6) Следующий этап процедурной схемы – это выбор *вида описания и построения модели*.

Для знаковых форм такими описаниями могут быть:

- для логических – отношение и исчисление предикатов, семантические сети, фреймы и др. (более подробно их изучают методы искусственного интеллекта);
- для математических – алгебраические, дифференциальные, интегральные, интегро-дифференциальные уравнения и др. математические схемы. Таким моделям посвящены отдельные направления математической науки;
- структурные и диаграммные схемы, вербальные описания и др..

7) *Характер реализации* знаковых моделей бывает:

- аналитический (например, система дифференциальных уравнений может быть решена математиком на листе бумаги);
- машинный (аналоговый или цифровой);
- физический (или автоматный).

8) В зависимости от сложности модели, цели моделирования, степени неопределенности характеристик модели могут иметь место различные по характеру способы проведения

исследований (экспериментов) - *методы исследования*. Так, и при аналитическом исследовании применяются методы теорий возмущений, анализа чувствительности, устойчивости и т.п. При физическом или натурном моделировании применяется экспериментальный метод исследования.

Анализ применяемых и перспективных методов машинного экспериментирования позволяет выделить *расчетный, статистический, имитационный и самоорганизующийся методы исследований*.

Расчетное моделирование применяется при исследовании математических моделей и сводится к их машинной реализации при различных числовых исходных данных. Результаты этих реализаций (расчетов) выдаются в графической или табличной формах. В процессе обучения традиционно имеют дело с расчетным моделированием: например, классической схемой является машинная реализация математической модели, представленной в виде системы дифференциальных уравнений, основанная на применении численных методов, с помощью которых математическая модель приводится к алгоритмическому виду, далее программно реализуется на ЭВМ, для получения результатов на ЭВМ проводится расчет (используется расчетный метод исследования).

Метод статистического моделирования на ЭВМ (метод Монте-Карло). Под статистическим моделированием понимается машинное воспроизведение функционирования вероятностных моделей, либо исследование детерминированных процессов, заданных в виде математических моделей с логическими элементами с помощью статистических испытаний на ЭВМ (метод Монте - Карло). Особенностью статистического моделирования является случайное задание исходных данных с известными законами распределения и, как следствие, вероятностное оценивание характеристик исследуемых процессоров. Статистическое моделирование является эффективным методом исследования слабоорганизованных систем с несложной логикой функционирования.

Для исследования сложных логических и логико-математических моделей с неточным заданием исходных данных (заданным законом распределения, оценочными характеристиками) применяется *имитационное моделирование*. *Имитационное моделирование используется в задачах исследования сложных логико- и логико-математических моделей в результате проведения экспериментов на модели*. Поэтому в имитационном моделировании важную роль играет не только проведение, но и планирование экспериментов.

Следующим за имитационным по качественному уровню можно назвать *самоорганизующееся* моделирование, когда функция построения моделей и ее преобразования в процессе экспериментирования и поиска оптимальных моделей возлагается на ЭВМ.

Отличительные особенности моделей различных классов.

Приведенная классификация делает очевидным некорректность следующих часто допускаемых обобщений.

Имитационное моделирование часто отождествляют с машинным, или с моделированием на ЭВМ, с чем, конечно, согласиться нельзя. Об этом мы уже говорили. Основное отличие находится на методологическом уровне. Методологической основой имитационного моделирования является системный анализ. Отдельные элементы, процессы в имитационной модели могут описываться сложными интегро-дифференциальными и другими уравнениями, реализуются с помощью традиционных вычислительных процедур; т.е. аппарат имитационного моделирования включает все средства, арсенал аналитического моделирования на этапе идентификации имитационной модели. Большое место аналитическим методам отводится и в стратегическом планировании вычислительного эксперимента и при обработке его результатов. Роль аналитических методов в имитационном моделировании постоянно возрастает.

Имитационное моделирование включает в себя идеи и приемы статистического моделирования на ЭВМ, имитационное моделирование исторически выросло из метода статистических испытаний. Имитационные модели идеально подходит для исследования стохастических систем, случайных процессов (используются на входе переменные, задаваемые известными законами распределения, можно реализовать вероятностные развития ситуаций, описать случайные процессы, проводить вероятностное оценивание характеристик модели на выходе), т.е. идеи метода Монте-Карло воплощаются в имитационном моделировании. Однако в случае с имитационным моделированием речь идет об исследовании сложных систем и решении сложных проблем, в котором отражается структура и динамика моделируемой системы. На ЭВМ реализуются не статистические испытания (опыты), а целенаправленные вычислительные эксперименты.

Не всегда корректно проводится водораздел между математическими и имитационными моделями. Рассмотрим наиболее важные отличия аналитической модели от имитационной:

- При аналитическом моделировании структура моделируемой системы и процессы ее функционирования представляются в виде некоторых (математических) выражений, отображающих зависимость определяемых характеристик системы от ее параметров и параметров внешней среды. Имитация процессов функционирования систем здесь является вырожденной, она сводится к расчетам по указанным выше выражениям. Иными словами, в аналитических моделях структура моделируемых систем и процессы их функционирования представляются в неявном виде.
- При имитационном моделировании структура моделируемой системы непосредственно отображается в модели, а процессы ее функционирования проигрываются (имитируются) на

построенной модели. Построение имитационной модели заключается в описании структуры и процессов функционирования системы. Подробнее об этом пойдет речь в следующем параграфе.

- Кроме того, как отмечалось выше, метод исследования здесь имитационный, основанный на экспериментальном подходе, а не расчетный, как при математическом моделировании.

Таким образом, имитационное моделирование отличается высокой степенью общности, создает предпосылки к созданию унифицированной модели, легко адаптируемой к широкому классу задач, выступает средством для интеграции моделей различных классов. Т.е. метод имитационного моделирования поднимает моделирование на качественно более высокий уровень.

1.2. Сущность метода имитационного моделирования.

Метод имитационного моделирования и его особенности. Имитационная модель: представление структуры и динамики моделируемой системы.

Метод имитационного моделирования является экспериментальным методом исследования реальной системы по ее компьютерной модели, который сочетает особенности экспериментального подхода и специфические условия использования вычислительной техники.

Имитационное моделирование является машинным методом моделирования, собственно без ЭВМ никогда не существовало, и только развитие информационных технологий привело к становлению этого вида компьютерного моделирования. В приведенном определении акцентируется внимание на экспериментальной природе имитации, применении имитационного метода исследования (осуществляется экспериментирование с моделью). Действительно, в имитационном моделировании важную роль играет не только проведение, но и планирование эксперимента на модели. Однако это определение не проясняет, что собой представляет сама имитационная модель. Попробуем разобраться, какими свойствами обладает имитационная модель, в чем же состоит сущность имитационного моделирования.

В процессе имитационного моделирования (рис. 1. 2.) исследователь имеет дело с четырьмя основными элементами:

- Реальная система;
- Логико-математическая модель моделируемого объекта;
- Имитационная (машинная) модель;
- ЭВМ, на которой осуществляется имитация – направленный вычислительный эксперимент.

Исследователь изучает реальную систему, разрабатывает логико-математическую модель реальной системы. Имитационный характер исследования предполагает наличие *логико- или логико-математических моделей*, описываемых изучаемый процесс (систему). Чтобы быть машинно-реализуемой, на основе логико-математической модели сложной системы строится *моделирующий алгоритм*, который описывает структуру и логику взаимодействия элементов в системе.

Программная реализация моделирующего алгоритма – есть *имитационная модель*. Она составляется с применением средств автоматизации моделирования. Подробнее технология имитационного моделирования и инструментальные средства моделирования - языки и системы моделирования, с помощью которых реализуются имитационные модели, будут рассмотрены в 3 главе и практическом курсе. Далее ставится и осуществляется направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели, в результате которого собирается и обрабатывается информация, необходимая для принятия решений с целью воздействия на реальную систему.

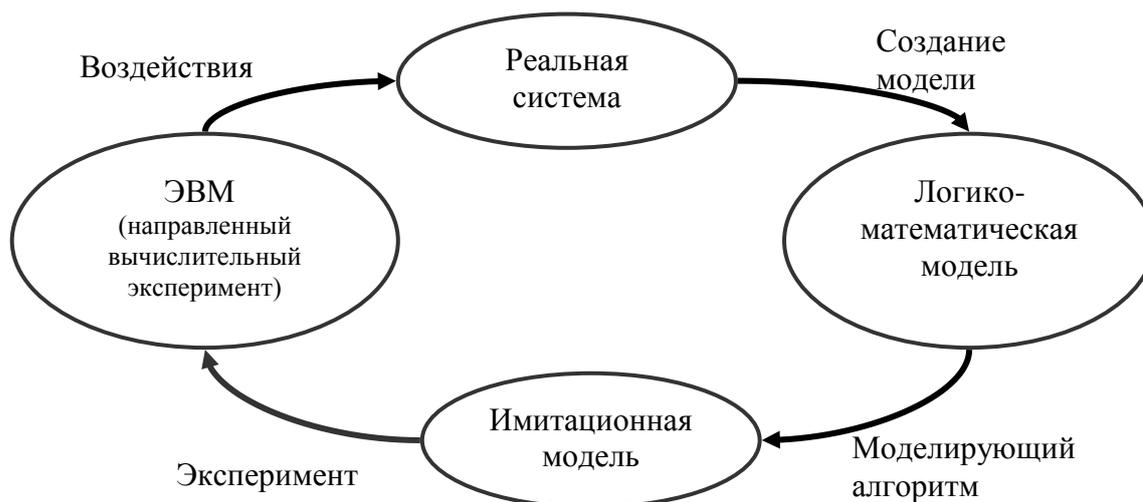


Рисунок 1.2. – Процесс имитационного исследования.

Выше мы определяли систему как совокупность взаимодействующих элементов, функционирующих во времени.

Составной характер сложной системы диктует представление ее модели в виде тройки:

$\langle A, S, T \rangle$, где

A – множество элементов (в их число включается и внешняя среда);

S – множество допустимых связей между элементами (структура модели);

T – множество рассматриваемых моментов времени.

Особенностью имитационного моделирования является то, что имитационная модель позволяет воспроизводить моделируемые объекты:

- с сохранением их логической структуры,
- с сохранением поведенческих свойств, т.е. динамики взаимодействий элементов.

При имитационном моделировании структура моделируемой системы непосредственно отображается в модели, а процессы ее функционирования проигрываются (имитируются) на построенной модели. Построение имитационной модели заключается в описании структуры и процессов функционирования моделируемого объекта или системы. В описании имитационной модели выделяют две составляющие:

- *Статическое описание системы*, которое по-существу является описанием ее структуры. При разработке имитационной модели необходимо выполнять структурный анализ моделируемых процессов, определяя состав элементов модели.
- *Динамическое описание системы*, или описание динамики взаимодействий ее элементов. При его составлении фактически требуется построение функциональной модели, отображающей моделируемые динамические процессы.

Идея метода, с точки зрения его программной реализации, состояла в следующем. Что если элементам системы поставить в соответствие некоторые программные компоненты, а состояния этих элементов описывать с помощью переменных состояния. Элементы, по определению, взаимодействуют (или обмениваются информацией), - значит может быть реализован алгоритм функционирования отдельных элементов и их взаимодействия по определенным операционным правилам – моделирующий алгоритм. Кроме того, элементы существуют во времени – значит надо задать алгоритм изменения переменных состояний. Динамика в имитационных моделях реализуется с помощью *механизма продвижения модельного времени*.

Отличительной особенностью метода имитационного моделирования является возможность описания и воспроизведения взаимодействия между различными элементами системы. Таким образом, чтобы составить имитационную модель, надо:

- представить реальную систему (процесс), как совокупность взаимодействующих элементов;
- алгоритмически описать функционирование отдельных элементов;
- описать процесс взаимодействия различных элементов между собой и с внешней средой.

Ключевым моментом в имитационном моделировании является выделение и описание *состояний* системы. Система характеризуется *набором переменных состояний*, каждая комбинация которых описывает конкретное состояние. Следовательно, путем изменения значений этих переменных можно имитировать переход системы из одного состояния в другое. Таким образом, имитационное моделирование – это представление *динамического поведения* системы посредством продвижения ее от одного состояния к другому в соответствии с хорошо определенными операционными правилами. Эти изменения состояний могут происходить либо непрерывно, либо в дискретные моменты времени. *Имитационное моделирование – есть динамическое отражение изменений состояния системы с течением времени*.

Итак, мы разобрались, что при имитационном моделировании логическая структура реальной системы отображается в модели, а также имитируется динамика взаимодействий подсистем в моделируемой системе. Это важный, но не единственный признак имитационной модели, исторически предопределивший, не совсем удачное, на мой взгляд, название методу (*simulation modeling*), который исследователи чаще называют «системным моделированием».

Понятие о модельном времени. Механизм продвижения модельного времени. Дискретные и непрерывные имитационные модели.

Для описания динамики моделируемых процессов в имитационном моделировании реализован *механизм продвижения модельного времени*. Эти механизмы встроены в управляющие программы любой системы моделирования.

Если бы на ЭВМ имитировалось поведение одной компоненты системы, то выполнение действий в имитационной модели можно было бы осуществить последовательно, по пересчету временной координаты. Чтобы обеспечить имитацию параллельных событий реальной системы вводят некоторую глобальную переменную (обеспечивающую синхронизацию всех событий в системе) t_0 , которую называют *модельным (или системным) временем*.

Существуют два основных способа изменения t_0 :

- *пошаговый* (применяются фиксированные интервалы изменения модельного времени);
- *по-событийный* (применяются переменные интервалы изменения модельного времени, при этом величина шага измеряется интервалом до следующего события).

В случае *пошагового метода* продвижение времени происходит с минимально возможной постоянной длиной шага (*принцип Δt*). Эти алгоритмы не очень эффективны с точки зрения использования машинного времени на их реализацию.

По-событийный метод (*принцип “особых состояний”*). В нем координаты времени меняются только когда изменяется состояние системы. В по-событийных методах длина шага временного сдвига максимально возможная. Модельное время с текущего момента изменяется до ближайшего момента наступления следующего события. Применение по-событийного метода предпочтительно в случае, если частота наступления событий невелика, тогда большая длина шага позволит ускорить ход модельного времени. По-событийный метод применяется, когда события, происходящие в системе, распределены неравномерно на временной оси и появляются через значительные временные интервалы. На практике по-событийный метод получил наибольшее распространение.

Способ фиксированного шага применяется:

- если закон изменения от времени описывается интегро-дифференциальными уравнениями. Характерный пример: решение интегро-дифференциальных уравнений численным методом. В подобных методах шаг моделирования равен шагу интегрирования. При их использовании динамика модели является дискретным приближением реальных непрерывных процессов;
- когда события распределены равномерно и можно подобрать шаг изменения временной координаты;
- когда сложно предсказать появление определенных событий;
- когда событий очень много и они появляются группами.

Таким образом, вследствие последовательного характера обработки информации в ЭВМ, параллельные процессы, происходящие в модели, преобразуются с помощью рассмотренного механизма в последовательные. Такой способ представления носит название квазипараллельного процесса.

Простейшая классификация на основные виды имитационных моделей связана с применением этих двух способов продвижения модельного времени. Различают имитационные модели:

- *Непрерывные;*
- *Дискретные;*
- *Непрерывно-дискретные.*

В *непрерывных имитационных моделях* переменные изменяются непрерывно, состояние моделируемой системы меняется как непрерывная функция времени, и, как правило, это изменение описывается системами дифференциальных уравнений. Соответственно продвижение модельного времени зависит от численных методов решения дифференциальных уравнений.

В *дискретных имитационных моделях* переменные изменяются дискретно в определенные моменты имитационного времени (наступления событий). Динамика дискретных моделей представляет собой процесс перехода от момента наступления очередного события к моменту наступления следующего события.

Поскольку в реальных системах непрерывные и дискретные процессы часто невозможно разделить, были разработаны *непрерывно-дискретные модели*, в которых совмещаются механизмы продвижения времени, характерные для этих двух процессов.

Проблемы стратегического и тактического планирования имитационного эксперимента. Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели.

Итак, мы определились с *методологией имитационного моделирования*, это - системный анализ. Именно последнее дает право, рассматриваемый вид моделирования называть «системным моделированием».

В начале этого параграфа мы в общем виде дали понятие *метода имитационного моделирования*. Мы определили имитационное моделирование как *экспериментальный метод* исследования реальной системы по ее имитационной модели. Заметим, что понятие метода всегда шире понятия «имитационная модель».

Рассмотрим теперь особенности этого экспериментального метода (имитационный метод исследования). Кстати, слова «simulation», «эксперимент», «имитация» одного плана. Экспериментальная природа имитации также предопределила происхождение названия метода. Итак, цель любого исследования состоит в том, чтобы узнать как можно больше об изучаемой системе, собрать и проанализировать информацию, необходимую для принятия решения. Суть исследования реальной системы по ее имитационной модели состоит в получении (сборе) данных о функционировании системы в результате проведения эксперимента на имитационной модели.

Имитационные модели – это модели прогонного типа, у которых есть вход и выход. То есть, если подать на вход имитационной модели определенные значения параметров, можно получить результат, который действителен только при этих значениях. На практике исследователь сталкивается со следующей специфической чертой имитационного моделирования. Имитационная модель дает результаты, которые действительны только для определенных значений параметров, переменных и структурных взаимосвязей, заложенных в имитационную программу. Изменение параметра или взаимосвязи означает, что имитационная программа должна быть запущена вновь. Поэтому, для получения необходимой информации или результатов необходимо осуществлять *прогон* имитационных моделей, а не решать их. Имитационная модель не способна формировать свое собственное решение в том виде, как это имеет место в аналитических моделях (см. расчетный метод исследования), а может служить в качестве средства для анализа поведения системы в условиях, которые определяются экспериментатором.

Для пояснения рассмотрим детерминированный и стохастический случаи.

Стохастический случай. Имитационная модель - удобный аппарат для исследования стохастических систем. Стохастические системы - это такие системы, динамика которых зависит от случайных факторов, входные, выходные переменные стохастической модели, как правило, описываются как случайные величины, функции, процессы, последовательности. Рассмотрим основные особенности моделирования процессов с учетом действия случайных факторов (здесь реализуются известные идеи метода статистических испытаний, метода Монте-Карло). Результаты моделирования, полученные при воспроизведении единственной реализации процессов, в силу действия случайных факторов будут реализациями случайных процессов, и не смогут объективно характеризовать изучаемый объект. Поэтому искомые величины при исследовании процессов методом имитационного моделирования обычно определяют как средние значения по данным большого числа реализаций процесса (задача оценивания). Поэтому эксперимент на модели содержит несколько реализаций, *прогонов* и предполагает оценивание по совокупности данных (выборки). Ясно, что (по закону больших чисел), чем больше число реализаций, тем получаемые оценки все больше приобретают статистическую устойчивость.

Итак, в случае со стохастической системой необходимо осуществлять сбор и оценивание статистических данных на выходе имитационной модели, – для этого проводить серию прогонов и статистическую обработку результатов моделирования.

Детерминированный случай. В этом случае достаточно провести один прогон при конкретном наборе параметров.

Теперь представим, что целями моделирования являются: исследование системы при различных условиях, оценка альтернатив, нахождение зависимости выхода модели от ряда параметров и, наконец, поиск оптимального варианта. В этих случаях исследователь может

проникнуть в особенности функционирования моделируемой системы, изменяя значения параметров на входе модели, при этом выполняя многочисленные машинные прогоны имитационной модели.

Таким образом, проведение экспериментов с моделью на ЭВМ заключается в проведении многократных машинных прогонов с целью сбора, накопления и последующей обработки данных о функционировании системы. Имитационное моделирование позволяет исследовать модель реальной системы, чтобы изучать ее поведение путем многократных прогонов на ЭВМ при различных условиях функционирования реальной системы.

Здесь возникают следующие проблемы: как собрать эти данные, провести серию прогонов, как организовать целенаправленное экспериментальное исследование. Выходных данных, полученных в результате такого экспериментирования, может оказаться очень много. Как их обработать? Обработка и изучение их может превратиться в самостоятельную проблему, намного сложнее задачи статистического оценивания.

В имитационном моделировании важным вопросом является не только проведение, но и планирование имитационного эксперимента в соответствии с поставленной целью исследования.

Таким образом, перед исследователем, использующим методы имитационного моделирования, всегда встает проблема *организации* эксперимента, т.е. выбора метода сбора информации, который дает требуемый (для достижения поставленной цели исследования) ее объем при наименьших затратах (лишнее число прогонов – это лишние затраты машинного времени). Основная задача - уменьшить временные затраты на эксплуатацию модели, сократить машинное время на имитацию, отражающее затраты ресурса времени ЭВМ на проведение большого количества имитационных прогонов. Эта проблема получила название *стратегического планирования* имитационного исследования. Для ее решения используются методы планирования эксперимента, регрессионного анализа, и др., которые подробно будут рассматриваться в 3 главе (параграф 3.4.).

Стратегическое планирование – это разработка эффективного плана эксперимента, в результате которого либо выясняется взаимосвязь между управляемыми переменными, либо находится комбинация значений управляемых переменных, минимизирующая или максимизирующая отклик (выход) имитационной модели.

Наряду с понятием стратегического существует понятие *тактического планирования*, которое связано с определением способов проведения имитационных прогонов, намеченных планом эксперимента: как провести каждый прогон в рамках составленного плана эксперимента. Здесь решаются задачи: определение длительности прогона, оценка точности результатов моделирования и др.

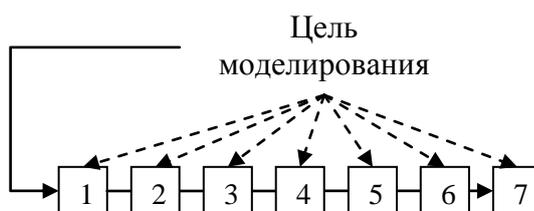
Такие эксперименты с имитационной моделью будем называть *направленными вычислительными экспериментами*.

*Имитационный эксперимент, содержание которого определяется предварительно проведенным аналитическим исследованием (т.е. являющимся составной частью вычислительного эксперимента) и результаты которого достоверны и математически обоснованы, называется **направленным вычислительным экспериментом**.*

В 3 главе мы детально рассмотрим практические вопросы организации и проведения направленных вычислительных экспериментов на имитационной модели.

Общая технологическая схема имитационного моделирования.

Обобщая наше рассуждение, можно в самом общем виде представить технологическую схему имитационного моделирования (рис. 1.3.). Более подробно технология имитационного моделирования будет рассматриваться в 3 главе учебного пособия.



1 - Реальная система; 2 - Построение логико-математической модели; 3 - Разработка моделирующего алгоритма; 4 - Построение имитационной (машинной) модели; 5 - Планирование и проведение имитационных экспериментов; 6 - Обработка и анализ результатов; 7 - Выводы о поведении реальной системы (принятие решений).

Рисунок 1.3 – Технологическая схема имитационного моделирования.

Возможности и область применения имитационного моделирования.

Рассмотрим возможности метода имитационного моделирования, обусловившие его широкое применение в самых различных сферах. Имитационное моделирование традиционно находит применение в широком спектре экономических исследований: моделировании производственных систем и логистике [10,22,41], маркетинге, моделировании бизнес процессов; в социально-экономических исследованиях [4,7,12,23,44], социологии [39] и политологии; моделировании транспортных, информационных и телекоммуникационных систем, наконец, глобальном моделировании мировых процессов [29,45].

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи исключительной сложности, обеспечивает имитацию любых сложных и многообразных процессов, с большим количеством элементов, отдельные функциональные зависимости в таких моделях могут описываться весьма громоздкими математическими соотношениями. Поэтому имитационное моделирование

эффективно используется в задачах исследования систем со сложной структурой с целью решения конкретных проблем.

Имитационная модель содержит элементы непрерывного и дискретного действия, поэтому применяется для исследования динамических систем, когда требуется *анализ узких мест*, исследование *динамики функционирования*, когда желательно наблюдать на имитационной модели ход процесса в течение определенного времени

Имитационное моделирование – эффективный аппарат исследования *стохастических систем*, когда исследуемая система может быть подвержена влиянию многочисленных случайных факторов сложной природы (у математических моделей для этого класса систем ограниченные возможности). Имеется возможность проводить исследование *в условиях неопределенности*, при неполных и неточных данных.

Имитационное моделирование является наиболее ценным, системообразующим звеном в *системах поддержки принятия решений*, т.к. позволяет исследовать большое число альтернатив (вариантов решений), проигрывать различные сценарии при любых входных данных. Главное преимущество имитационного моделирования состоит в том, что исследователь для проверки новых стратегий и принятия решений, при изучении возможных ситуаций, всегда может получить ответ на вопрос «*Что будет, если? ...*». Имитационная модель позволяет прогнозировать, когда речь идет о проектируемой системе или исследуются процессы развития, т.е. в тех случаях, когда реальной системы не существует.

В имитационной модели может быть обеспечен различный (в том числе и очень высокий) *уровень детализации* моделируемых процессов. При этом модель создается поэтапно, постепенно, без существенных изменений, *эволюционно*.

Вопросы для самопроверки:

1. Что является методологической основой имитационного моделирования?
2. Какие виды компьютерного моделирования вам известны, отметьте общие признаки моделей этого класса с имитационными моделями.
3. Какие знаковые формы представления и виды описания лежат в основе моделируемых систем и процессов имитационных моделей?
4. В чем принципиальное отличие метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и имитационного моделирования.
5. Назовите общие и отличительные признаки структурно-функционального и имитационного моделирования.
6. В чем состоит принципиальное отличие математического и имитационного видов моделирования.

7. Чтобы стать машинно-реализуемой моделью, математическая модель приводится к алгоритмическому виду, например, с помощью численных или вычислительных методов. Программная реализация имитационной модели осуществляется на основе моделирующего алгоритма сложной системы. В чем, на ваш взгляд, различие в этих технологических подходах.
8. Приведите и интерпретируйте на примерах наиболее существенные свойства сложных систем.
9. Каким требованиям должна отвечать хорошая компьютерная модель?
10. Приведите примеры частных постановок задач анализа и синтеза сложных систем в экономике и управлении.
11. Какие типы моделей вы встречали в системах управления предприятием?
12. Какие типы моделей применяются в системах обработки данных, интеллектуальных информационных системах, системах анализа данных.
13. В каких случаях оправдано создание имитационной модели?
14. Для решения какого класса задач оправдано применение имитационного моделирования и почему?
15. Какие специфические свойства имитационной модели?
16. Может ли имитационная модель создаваться на основе математического описания и насколько это оправдано?
17. Какие бывают формы представления имитационных моделей.
18. Чем должен руководствоваться системный аналитик, определяя основную структуру модели и выделяя наиболее значащие факторы в ее описании.
19. В каких случаях оправдана и каким образом осуществляется в имитационных моделях детализация моделируемых процессов.
20. Какие типы переменных фигурируют в описании имитационной модели?
21. Какие переменные мы относим к эндогенным и экзогенным, переменным состоянием и выходным переменным, критериям эффективности. Пересекаются ли эти множества переменных и в каких случаях?
22. Какими соображениями должен руководствоваться системный аналитик, формируя целевую функцию и критерии оценки эффективности функционирования сложной системы?
23. Какие свойства объекта моделирования воспроизводятся (имитируются) на его имитационной модели?
24. К какому классу моделей относятся имитационные: статичные или динамичные; стохастические или детерминированные. Почему, обоснуйте.

25. Как описать на алгоритмическом (программном) уровне: состояние объекта или системы; динамику системы; взаимодействие объектов.
26. Чем обусловлена экспериментальная природа имитации? Что является результатом прогона имитационной модели?
27. Какие задания и механизмы продвижения модельного времени существуют в имитационных моделях? Какие механизмы задания модельного времени применяются в дискретных моделях?
28. Какой механизм задания и продвижения модельного времени используется в моделях системной динамики? Чему равен и как задается шаг моделирования?
29. Дайте определение направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели и поясните его содержание.
30. С какими целями планируется эксперимент на имитационной модели?
31. Какие механизмы продвижения модельного времени бывают в симуляторах (системах моделирования)?
32. Как разыгрываются и программно-реализуются случайные события, величины и процессы в имитационных моделях?
33. Какой признак лежит в основе классификации имитационных моделей на дискретные и непрерывные.

Глава 2. БАЗОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ СТРУКТУРИЗАЦИИ И ФОРМАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ.

В этой главе рассмотрим ряд моделей и методов, широко используемых в практике анализа сложных систем и построения их имитационных моделей:

- процессно-(транзактно)-ориентированный подход на примере языка моделирования дискретного типа *GPSS*;
- сети кусочно-линейных агрегатов, моделирующие дискретные и непрерывно-дискретные системы;
- сети Петри и их расширения, применяемые при структуризации причинных связей и моделировании систем с параллельными процессами, служащие для стратификации и алгоритмизации динамики дискретных и дискретно-непрерывных систем;
- потоковые диаграммы и конечно-разностные уравнения системной динамики, являющиеся моделями непрерывных систем;
- агентное моделирование.

2.1. Процессно-ориентированные дискретные имитационные модели

В дискретных имитационных системах изменение состава и состояния происходит в дискретные моменты времени, называемые *событиями*. Под *событием* понимается мгновенное изменение состояния модели, произошедшее в результате осуществления множества взаимодействий между компонентами модели в один и тот же момент имитационного времени.

Как можно описать функционирование дискретной имитационной модели? Взаимосвязь между понятиями поясним с помощью рисунка 2.1..



Рисунок 2.1. – Взаимосвязь между событиями, действиями и процессами.

Функционирование дискретной системы можно описать:

- определяя изменения состояния системы, происходящие в моменты свершения событий;
- описывая действия, в которых принимают участие элементы системы;
- описывая процесс, через который проходят элементы.

Процесс – это ориентированная во времени последовательность событий, которая может состоять из нескольких действий.

Эти представления лежат в основе трех альтернативных алгоритмических подходов к построению дискретных имитационных моделей, называемых обычно:

- событийный;
- подход сканирования активностей (на практике получил небольшое распространение);
- процессно-ориентированный подход (включает транзактный способ имитации).

Это основные *алгоритмические схемы* для построения дискретных имитационных моделей. Их основа закладывается в некоторые языки и системы моделирования. Примерами могут служить языки моделирования:

- *GASP, SIMSCRIPT*, ориентированные на события;
- язык работ *SLAM* (слабо распространены) ;
- широко распространенные языки моделирования *GPSS, SIMULA* и др., предназначенные для описания параллельных процессов.

Наиболее ярким представителем языков моделирования дискретного типа, ориентированных на описание процессов, явился язык моделирования *GPSS*.

Содержание базовой концепции структуризации языка моделирования GPSS.

В 1961 г. Джеффи Гордон разработал язык моделирования *GPSS* (General Purpose Simulating System - моделирующая система общего назначения) (www.gpss.ru), методическое значение которого велико. Язык *GPSS* был языком, который определил современные технологические тенденции в имитационном моделировании и явился предвестником современных языков и систем моделирования дискретного типа, т.к. *Extend, Arena, Process Model, Taylor, WITNESS* и сотен других современных коммерческих симуляторов. Эти тенденции предопределила, прежде всего, удачно сформированная базовая схема структуризации, заложенная в *GPSS*, поддерживающая *блочно - ориентированный подход*, в рамках которого моделирующий блок имеет свое *функциональное назначение* и представлен соответствующими функциональными объектами (имеющими аналоги с элементами систем массового обслуживания), а также возможности языка для описания *параллельных процессов*. Именно такой взгляд на моделируемый объект позволил реализовать идеографический режим формирования дискретной модели, когда модель конструируется из стандартных функциональных блоков, а связи на этих графических конструкциях интерпретируются как маршруты прохождения подвижных объектов в системе. Поэтому, осваивая содержание базовой концепции структуризации языка моделирования *GPSS*, легко понять идею и принципы работы современных коммерческих симуляторов дискретного типа и других сред компьютерного моделирования.

В настоящее время на рынке информационных технологий представлены направления, поддерживающие технологическое развитие базового языка GPSS: GPSS/H и современное ее решение язык SLX корпорации *Wolverin*, GPSS World, корпорации *Minuteman Software*, и решения Стокгольмской школы высшей экономики - *Micro GPSS*, *Web GPSS* [5,35,55].

В языке GPSS реализована *блочно-ориентированная концепция структуризации моделируемого процесса, разработанная с ориентацией на описание систем массового обслуживания (СМО).*

Структура моделируемого процесса изображается в виде потока, проходящего через обслуживающие устройства (ОУ), очереди, ключи и другие элементы СМО.

Модель имеет блочную структуру. Моделируемый процесс представляется как поток заявок в системе обслуживания. Блоки интерпретируются как ОУ. Заявки (транзакты) конкурируют между собой за место в ОУ, образуют очереди перед ОУ, если они заняты. Дуги на блок-схеме – потенциальные потоки заявок между ОУ. Существуют истоки и стоки этих заявок. В этом случае блок-схема модели описывает маршруты движения заявок в системе.

Следовательно, в рамках GPSS есть специальные средства, которые являются аналогами элементов систем массового обслуживания, т.к. обслуживающие устройства, заявки, очереди. Однако GPSS является гибкой языковой средой, поэтому позволяет моделировать не только СМО, но и другие системы (например, склад, распределение ресурсов и многие другие).

GPSS относится к классу *процессно-(транзактно)-ориентированных систем моделирования.*

GPSS – является системой дискретного типа. Система GPSS ориентирована на класс объектов, процесс функционирования которых можно представить в виде множества состояний и правил перехода из одного состояния в другое, определяемых в дискретной пространственно-временной области. GPSS позволяет описывать процессы с дискретными событиями.

Для регистрации изменений во времени существует таймер модельного времени. Механизм задания модельного времени: по-событийный, с переменным шагом. Изменения в реальной системе приводят к появлению событий. Событие – изменение состояния любого элемента системы. В системе происходят такие события, как:

- поступление заявки;
- постановка заявки в очередь;
- начало обслуживания;
- конец обслуживания и др.

В GPSS рассматриваются 2 класса событий:

- *основные* (те события, которые можно запланировать, то есть рассчитать момент их наступления заранее до их появления, например, момент появления заявки на входе);

– *вспомогательные* (те события, которые происходят вследствие появления основных событий).
Вспомогательные события осуществляются в результате взаимодействия таких абстрактных элементов как блоки и транзакты, например, смена состояния прибора обслуживания со «свободен» на «занято»).

GPSS является способом алгоритмизации дискретных динамических систем. Примеры моделируемых объектов: транспортные объекты, склады, производственные системы, магазины, торговые объекты, сети ЭВМ, системы передачи сообщений. Алгоритмическая схема может быть использована для оформления сложных формальных схем. Формальные модели таких объектов: СМО и стохастические сети, автоматы, сети Петри, автоматы и др.

Системы массового обслуживания.

Система массового обслуживания – абстрактный объект, в котором выполняется последовательность операций, включает совокупность приборов обслуживания, которые связаны определенным логическим порядком. В соответствии с этой логикой происходит движение материальных носителей – заявок на обслуживание от канала (ОУ) к каналу (ОУ).

Структура систем массового обслуживания представлена на рисунке 2.2.

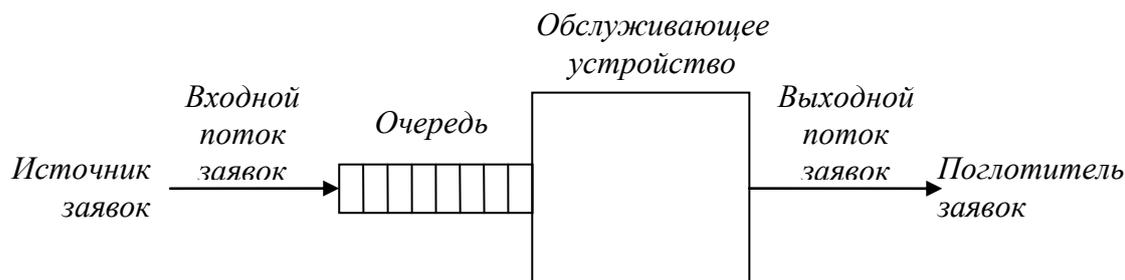


Рисунок 2.2 – Структура систем массового обслуживания.

Заявка характеризуется моментом появления на входе системы, статусом по отношению к другим заявкам, некоторыми параметрами, определяющими потребности во временных ресурсах на обслуживание

Постоянно поступающие заявки на обслуживание образуют *поток заявок* – совокупность заявок, распределенную во времени.

Поток заявок может быть *однородным* (с точки зрения обслуживания все заявки равноправны) и *неоднородным*.

Основной параметр потока заявок – промежуток времени между моментами поступления 2-х соседних заявок.

Поток заявок может быть *стационарным* и *нестационарным* (например, изменяться от времени суток).

Поток заявок рассматривается как *случайный процесс, характеризующийся функцией распределения периода поступления заявок* (например, простейший поток, поток Эрланга).

Элемент системы, в котором происходят операции, называется *обслуживающим устройством*. В момент выполнения операций он занят, иначе - свободен. Если канал (ОУ) свободен, то заявка принимается к обслуживанию.

Обслуживание каждой заявки каналом означает задержку в нем заявки на время, равное периоду обслуживания. После обслуживания заявка покидает прибор обслуживания. Таким образом, *ОУ характеризуется временем обслуживания заявки*.

При случайном характере поступления заявок образуются *очереди*. Заявки принимаются к обслуживанию в порядке очереди (FIFO, очереди с приоритетами и др.).

Реальный процесс функционирования СМО следует представлять в виде последовательности фаз обслуживания, выполняемых различными устройствами. Примеры многофазного обслуживания: обслуживание покупателей в магазине (прилавок, касса); производственно-технологический процесс (обработка деталей на станках). Эти *многофазные системы* могут иметь сложную структуру (стохастические сети), как показано на рисунке 2.3..

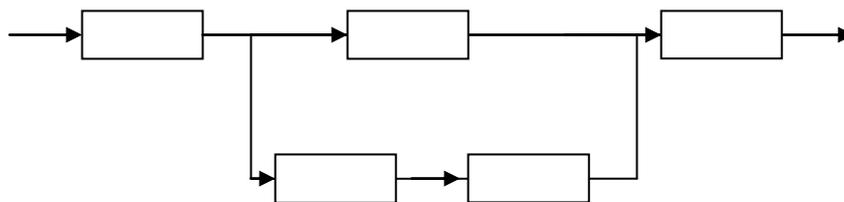


Рисунок 2.3 – Стохастическая сеть.

Обслуженная заявка освобождает прибор обслуживания и покидает систему (*поглотитель заявок*), либо движется дальше в соответствии с технологической схемой работы системы.

Различают следующие типы СМО:

- *одноканальные и многоканальные – (по количеству ОУ);*
- *с ожиданием и без ожидания (с отказами);*
- *с ограничением на длину очереди (или с ограниченным ожиданием) и без ограничения;*
- *с упорядоченной очередью и с неупорядоченной очередью;*
- *с приоритетами и без приоритетов;*
- *и др.*

Любая модель строится для того, чтобы оценить какие-то показатели качества.

Основные показатели качества обслуживания:

- *общее количество обслуженных заявок за какой-либо промежуток времени;*
- *пропускная способность – среднее число заявок, обслуженных в единицу времени;*
- *доля заявок обслуженных;*

- доля заявок, получивших отказ;
- время пребывания заявки в системе (от момента поступления заявки в систему до момента завершения ее обслуживания);
- среднее время обслуживания (функция распределения времени обслуживания);
- средняя длина очереди;
- среднее время ожидания;
- загрузка каналов - коэффициент использования (как доля времени, в течение которого ОУ было занято) – характеризует степень простоя ОУ;
- и др.

Классические математические методы исследования СМО предложены теорией массового обслуживания. Чем аппарат аналитического моделирования СМО отличается от имитационного моделирования? Аналитические методы весьма стеснительны для решения практических задач: например, часто используется предположения о простейшем потоке заявок (однако для различных фаз обслуживания он может быть не простейшим), об однотипных устройствах и т.п. В имитационном моделировании подобные и другие ограничения снимаются: могут применяться произвольные законы распределения, различные схемы обслуживания (например, порядок обслуживания заявок из очереди и т.п.), СМО исследуется не обязательно в стационарном режиме (возможно изучение переходного режима, когда показатели отличаются от предельных асимптотических значений).

Сущность метода имитационного моделирования для СМО состоит в следующем. Используются специальные алгоритмы, позволяющие вырабатывать случайные реализации потоков событий и моделировать процессы функционирования обслуживающих систем. Далее осуществляется многократное воспроизведение, реализация случайных процессов обслуживания и на выходе модели - статистическая обработка полученных статистических данных, оценка показателей качества обслуживания.

Функциональная структура GPSS.

Функциональная структура GPSS рассматривается на двух уровнях.

Первый уровень определяется комбинацией основных *функциональных объектов*, таких как: *устройства; памяти; ключи (логические переключатели); очереди; транзакты.*

Второй уровень – *блок-схема модели*, составленная из типовых блоков, между которыми перемещаются транзакты.

Рассмотрим основные аппаратно-ориентированные, статистические и вычислительные объекты первого уровня.

Аппаратно ориентированные объекты. Транзакты, устройства, памяти, логические переключатели относятся к аппаратно-ориентированным объектам GPSS.

Транзакты являются абстрактными подвижными элементами, которые являются аналогами различных объектов реального мира (сообщения, транспортные средства, люди, детали т.д.) Это динамические функциональные элементы GPSS, которые отражают реальные заявки на обслуживание.

Транзакты двигаются по модели, появляются в ней с той же интенсивностью, что и реальные заявки. Транзакты могут создаваться и уничтожаться. Перемещаясь между блоками модели в соответствии с логикой моделирования, транзакты вызывают (и испытывают) различные действия: возможны их задержки в некоторых точках модели (связанные с обслуживанием, ожиданием в очереди); изменение маршрутов и направления движения; создание копии транзактов и т.д.

С каждым транзактом связан упорядоченный набор параметров - *атрибутов*. При генерации транзактов резервируются 12 параметров. Обычно первые 12 параметров являются постоянными. В их набор входит: номер транзакта; номер блока, в котором транзакт находится в данный момент; номер следующего блока; время перехода в следующий блок; приоритет, характеризующий очередность обработки транзактов в определенных ситуациях; и др. Далее при программировании можно присвоить транзакту набор специфичных параметров, выражающих свойства или характеристики моделируемых объектов (вес, скорость, цвет, время обработки и т.п.).

Устройства моделируют объекты, в которых может происходить обработка транзактов, что связано с затратами времени. Устройства являются аналогами каналов СМО (каждое устройство в данный момент времени может быть занято лишь одним транзактом). Устройство может быть прервано. В GPSS существует возможность проверки состояния устройства.

Памяти предназначены для моделирования объектов, обладающих ёмкостью. Аналогия с многоканальными СМО состоит в том, что память может обслуживать одновременно несколько транзактов. При этом транзакт занимает определённую часть памяти.

Логические переключатели принимают значение включено/выключено, позволяют изменять пути следования транзактов в модели.

Статистические объекты GPSS (используются только тогда, когда необходимо собирать статистику). К статистическим объектам GPSS относятся очереди и таблицы.

Очереди. В процессе движения транзакты могут задерживаться в определенных точках модели. Если необходимо собирать информацию о длине очереди транзактов и времени задержки транзактов используют соответствующие статистические объекты.

Таблицы. Таблицы обрабатывают статистическую информацию, строят гистограмму распределений по любой переменной.

Вычислительные объекты GPSS: матрицы, функции, переменные различных типов и т.п.

Рассмотрим второй уровень. Модель на языке моделирования GPSS имеет наглядное графическое представление в виде *блок-схемы*.

Блоки – операционные объекты GPSS. Каждый блок имеет стандартное обозначение. Последовательность блоков – это есть последовательность операторов на языке GPSS. Любую модель на языке GPSS можно представить в виде совокупности блоков, между которыми перемещаются транзакты, они имеют вход-выход, в блоках реализуются все действия, связанные с обслуживанием транзакта (создание и уничтожение транзактов, изменение параметров транзакта, управление потоками транзактов, и т.д.). Блоки выполняются только в результате входа в них перемещающихся транзактов. GPSS является системой интерпретирующего типа с собственным языком.

Таким образом, на языке GPSS составляется и реализуется *функциональная блок-схема*.

Существуют 2 особых блока: *GENERATE*, имеющий только выход, через него транзакты входят в модель, и блок *TERMINATE*, имеющий только вход – удаляет транзакты из модели. Любой процесс на языке моделирования GPSS имеет вид:

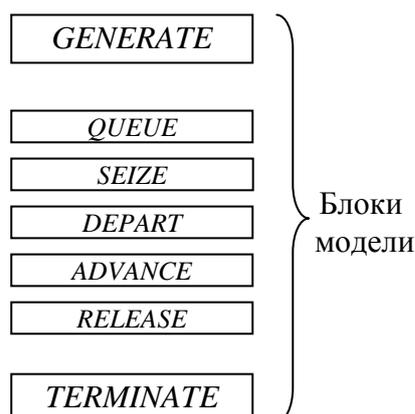


Рисунок 2.4 – Процесс на языке моделирования GPSS.

Описание параллельных процессов на языке GPSS представляет несколько таких цепочек блоков, взаимодействующих через общие ресурсы. Вот почему язык моделирования GPSS позволяет описывать параллельные процессы, независимые друг от друга, а взаимодействующие через общие ресурсы или переменные.

Итак, модель системы на языке GPSS представляет сеть блоков (операторов языка). Каждый блок описывает определенный этап действий в системе. Линии соединения блоков показывают направления движения подвижных элементов (транзактов) через систему или описывают некоторую последовательность событий, происходящих в моделируемой системе. На анимированной блок-схеме можно наблюдать, как транзакты перемещаются по блок-схеме и задерживаются в некоторых точках модели.

В настоящее время появились различные обобщения рассмотренной концепции структуризации, когда структура моделируемого процесса изображается в виде потока, проходящего через обслуживающие устройства и другие элементы СМО: сети очередей, графы потоков, структурно-стохастические графы и др. Дуги на графах интерпретируются как потенциальные потоки заявок между обслуживающими устройствами. Пути на графах соответствуют маршрутам движения заявок в системе обслуживания.

Подробнее изучение языка моделирования GPSS можно выполнить с помощью [5,35,49].

2.2 Агрегативные модели.

Кусочно-линейный агрегат.

В 60-х годах Н. П. Бусленко и И. Н. Коваленко [2, 21,40] ввели класс моделей сложных систем, названных ими *агрегативными*. Основным элементом построения таких моделей был *кусочно-линейный агрегат (КЛА)*. Эти модели обладают рядом привлекательных свойств, позволяющих использовать их в рамках общей схемы исследования сложных систем. В работах отечественной научной школы интенсивно исследовались их структурные и поведенческие свойства, создана имитационная система АИС (агрегативная имитационная система), базирующаяся на понятии агрегативной модели.

Будем рассматривать приводимые ниже определения и конструкции в форме, максимально приближенной к их программной реализации.

Дадим сначала *определение кусочно-линейный агрегата (КЛА)*.

КЛА относится к классу объектов, которые принято изображать в виде преобразователя (рис. 2.5), функционирующего во времени $t \in T = [0, \infty)$ и способного воспринимать *входные сигналы* x со значениями из некоторого множества X , выдавать *выходные сигналы* y со значениями из множества Y и находиться в каждый момент времени в некотором *состоянии* z из множества Z .

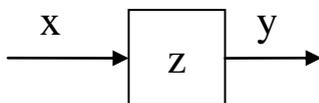


Рисунок 2.5 Общий вид преобразователя.

Класс КЛА отличает специфика множеств X, Y, Z , допустимые формы входных и выходных сообщений (т. е. функций $x(t)$ и $y(t)$, $t \in T$), траекторий $z(t)$, $t \in T$, а также способ преобразования входного сообщения в выходное. Приступим к указанной выше конкретизации КЛА.

Прежде всего отметим, что *динамика* КЛА носит «событийный» характер.

В КЛА могут происходить события двух видов: *внутренние* и *внешние*. Внутренние заключаются в достижении траекторией КЛА некоторого подмножества $Z^* \subset Z$ состояний; внешние – в поступлении входного сигнала.

Между событиями состояние КЛА изменяется детерминированным образом. Каждому состоянию z ставится в соответствие величина $\tau = \tau(z)$, трактуемая как потенциальное время до наступления очередного внутреннего события. Состояние КЛА в момент t^* - наступление события является случайным.

В момент t^* наступления внутреннего события, - выдается выходной сигнал y^* , содержание которого зависит лишь от z^* . (В частности, выходной сигнал может быть и пустым, т. е. не

выдаваться). После случайного скачка $\tau(z)$ вновь определяется время до наступления внутреннего события.

Рассмотрим теперь момент t^{**} наступления внешнего события, связанного с поступлением входного сигнала. Тогда состояние КЛА в момент t^{**} является случайным, зависящим лишь от x и z^{**} . В момент t^{**} , выдается выходной сигнал y^{**} , содержание которого определяется x и z^{**} .

(Условимся считать, что если моменты наступления внешнего и внутреннего событий совпадают, то изменение состояния осуществляется в соответствии с правилом наступления внешнего события, т. е. входные сигналы имеют *приоритет* над внутренними событиями).

Таким образом, динамику КЛА можно представить в следующем виде. Пусть в некоторый момент задано состояние КЛА. Тогда определяется время $\tau(z)$, через которое совершается *случайный скачок*, и меняется состояние. Начиная с момента наступления события (внешнего или внутреннего), ситуация повторяется, и динамику КЛА можно описать в виде *задания фазовой траектории изменения состояний $z(t)$* , определенной на $t \in T = [0, \infty)$. Процесс функционирования КЛА полностью определяется изменениями, происходящими в особые моменты времени — моменты наступления событий (внешних или внутренних). Между особыми моментами состояние КЛА меняется *детерминированно*.

Опишем теперь КЛА более подробно.

КЛА внешне имеет вид многополюсника с m входными клеммами и n выходными клеммами (рис.2.6). Отметим, что в общем случае для различных КЛА $m \neq n$.

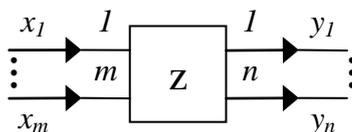


Рисунок 2.6 – Кусочно-линейный агрегат.

Предположим, что в состав множеств X_i и Y_j включены и фиктивные элементы 0 , наличие которых на входе или выходе КЛА означает отсутствие сигнала на соответствующей входной или соответственно выходной клемме.

Следовательно, входной сигнал на КЛА имеет вид

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m),$$

а выходной

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Рассмотрим, на чем основана программная реализация агрегативных моделей. Не фиктивными входными x_i , или выходными y_j сигналами, а также состояниями z КЛА являются *данные*. *Данными* считаются: элементарные данные; списки данных; массивы данных; структуры данных. *Элементарными данными* считаются: целые числа; действительные числа; символьные

переменные. Здесь термины «список», «массив» употребляются в их обычном смысле. Понятие структуры данных соответствует дереву, на корнях которого размещены данные. Каждое данное имеет свое имя. Рассматриваемые данные хорошо отображают содержательные представления, существующие у исследователя относительно реальных объектов, и существенно облегчают процесс построения модели. Эти данные удобны как с математической, так и с программной точек зрения.

Пусть состояние z КЛА определено как некоторая структура данных. Тем самым фиксирован вид дерева, представляющего эту структуру.

Дерево базируется в конечном счете на элементарных данных. Обозначим через \mathbf{I}_z элементарные данные, входящие в состояние z и имеющие тип целых чисел и символов, а через \mathbf{R}_z — элементарные данные, имеющие действительный тип. Предположим, что значения и состав элементарных данных могут меняться лишь в особые моменты времени, а между ними остаются постоянными. Разобьем множество \mathbf{R}_z на два подмножества $\mathbf{R}_z = \mathbf{R}_z^+ \cup \mathbf{R}_z^-$, где \mathbf{R}_z^+ состоит из положительных величин, а \mathbf{R}_z^- — из неположительных. Будем считать, что данные из подмножества \mathbf{R}_z^- остаются неизменными между особыми моментами времени и что моменты наступления внутренних событий определяются лишь данными из \mathbf{R}_z^+ . Это отвечает обычно используемой «энергетической интерпретации» причин наступления внутренних событий в моменты, когда исчерпывается некоторый ресурс, оканчивается операция и т. д. Таким образом, внутреннее событие происходит, когда хотя бы один из положительных элементов множества \mathbf{R}_z^+ обращается в нуль.

Аналогично задается реакция КЛА на входной сигнал $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$.

Схема сопряжения. Агрегативная система.

Формализуем понятие *структуры сложной системы* [40].

Структура сложной системы — есть формализованное множество КЛА.

Введем понятие агрегативной системы: *агрегативная система представляется либо как КЛА, либо как объединение конечного числа агрегативных систем. Это объединение описывается через схему сопряжения, где КЛА связаны через каналы связи, по которым передаются сигналы.*

Пусть $\mathcal{A} = (A_1, A_2, \dots, A_N)$ — множество КЛА, N — фиксированное число.

Обозначим через \mathbf{I}_i — множество входных клемм КЛА A_i , а через \mathbf{O}_i — множество его выходных клемм.

Пусть $\mathbf{I} = \bigcup_{i=1}^N \mathbf{I}_i$; $\mathbf{O} = \bigcup_{i=1}^N \mathbf{O}_i$, — множества входных и выходных клемм всех рассматриваемых

КЛА.

Рассмотрим множество \mathcal{R} всех возможных отображений $R, \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{O}$, которое можно интерпретировать как множество потенциальных соединений между собой КЛА, входящих в A .

Именно, каждой входной клемме из \mathbf{I} ставится в соответствие выходная клемма, с которой на входную клемму поступает сигнал. При этом допускается, что некоторым из входных клемм не ставятся в соответствие никакие выходные, т. е. на эти входные клеммы не поступают никакие сигналы. Точно так же некоторые выходные клеммы могут быть «висячими»: сигналы с этих клемм могут никуда не поступать. Таким образом, на каждую входную клемму подаются сигналы не более чем с одной выходной клеммы. В то же время с одной выходной клеммы сигналы могут идти на несколько различных входных клемм.

Это допустимое отображение $R \in \mathcal{R}$ называется *схемой сопряжения* (рис. 2.7). Схема сопряжения указывает адресацию сигналов в системе, состоящей из КЛА.

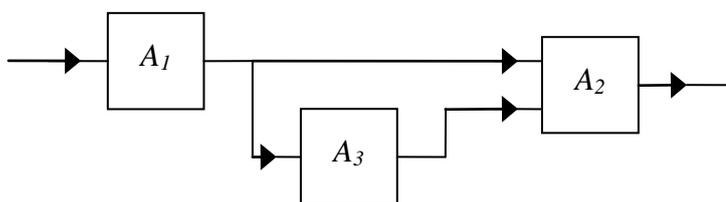


Рисунок 2.7 – Схема сопряжения R .

Если (j, r) – выход является значением отображения $R(i, l)$ – входа и при этом отображение R является схемой сопряжения, то будем говорить, что между (j, r) – выходом и (i, l) – входом проложен *канал связи*.

Таким образом, состав агрегатов A и схема сопряжения R определяют агрегативную систему.

Однако задать состав агрегатов A и схему сопряжения R еще недостаточно для однозначного определения динамики получившейся системы. Вводят 2 следующих предположения:

Предположение 1. Каналы связи в системе, состоящей из КЛА, являются *идеальными*, т. е. передающими сигналы мгновенно и без искажений.

Данное предположение весьма удобно как с математической, так и с программной точек зрения. Отметим, что хотя предположение 1 сужает круг рассматриваемых моделей, мы можем учесть возможные задержки и искажения, присутствующие в реальной системе, введя дополнительные КЛА, отображающие эти особенности реальных каналов связи.

Но и предположения 1 еще недостаточно для определения динамики модели. Поясним причину этого.

Пусть, по предположению, каждый из агрегатов в ответ на поступление любого входного сигнала мгновенно выдает выходной сигнал. Тогда налицо неопределенность. Как должен реагировать агрегат A ? Он может сначала отреагировать на сигнал и затем (через нулевой промежуток времени) выдать второй выходной сигнал в ответ на поступление сигнала. В этом случае реакция агрегата A состоит в выдаче пары выходных сигналов. Возникает «состязательная»

ситуация. Разрешить эту неопределенность и данное противоречие можно с помощью следующего предположения, которое отвечает принципу причинности.

Предположение 2. Сигналы в системе из взаимодействующих КЛА обрабатываются следующим образом. Упорядочивают выходные сигналы по номерам агрегатов и номерам выходных клемм. В пределах одного агрегата нумерация сигналов соответствует нумерации клемм.

На основании схемы сопряжения R определим адреса сигналов и последовательно найдем реакции на них. Если при этом будут выданы выходные сигналы, то назовем их сигналами второй стадии и т. д. Все указанные реакции осуществляются в один и тот же момент системного времени, но по стадиям. Таким образом, упорядочивают номера агрегатов, номера выходных клемм и последовательно находят реакции на сигналы.

Схема сопряжения в совокупности с предположениями 1 и 2 полностью определяет *динамику агрегативной системы*.

Мы описали агрегативную систему с постоянной схемой сопряжения. Легко видеть, что в приведенных построениях ничего не изменится, если предположить, что схема сопряжения R меняется всякий раз при наступлении очередного системного события и ее вид зависит лишь от состояния системы непосредственно перед наступлением события. При этом получим *систему с переменной структурой*.

Определенные выше агрегативные системы обладают важным *свойством замкнутости*, заключающимся в том, что *агрегативная система в целом может быть описана в виде КЛА*. Данный факт интуитивно понятен и здесь не доказывается.

Следовательно, и **объединение конечного числа агрегативных систем также является агрегативной системой**.

Это является одной из основ проведения структурных преобразований с агрегативными системами и их моделирующими алгоритмами.

Оценка агрегативных систем как моделей сложных систем.

Введенное понятие агрегативной системы дает возможность описания самых разнообразных объектов реального мира в агрегативном виде. Агрегативные системы служат определенным обобщением таких хорошо известных схем, как автоматы и модели массового обслуживания. Нетрудно понять, что в агрегативном виде также могут быть представлены сети Петри и практически любые численные методы решений дифференциальных уравнений (обыкновенных и в частных производных). Таким образом, агрегативные системы охватывают широкий класс различных моделей, используемых при изучении сложных систем. В агрегативном

виде можно также представить модели, имеющие вид «черного ящика». Структуры данных, описывающие состояния и сигналы агрегативных систем, помогают формализовать концептуальное представление, которое существует у пользователя относительно элементов сложной системы.

Эти описания достаточно естественны и удобны, что можно объяснить следующими причинами. Агрегативные модели соответствуют основным концепциям описания сложных систем:

- В основу понятия агрегативной модели положено структурное представление системы в виде взаимодействующих элементов - КЛА. Это соответствует одной из основных концепций сложных систем, рассмотренных нами в 1 главе.
- Динамика агрегативной системы полностью определяется последовательностью событий, происходящих в ней, что отвечает концепции алгоритмической модели динамической сложной системы.

В соответствии с алгоритмической моделью и понятием агрегативной системы возможны реализации разнообразных машинных моделей сложных систем. Одним из преимуществ является удобство реализации агрегативных систем на ЭВМ. Примером может являться агрегативная имитационная система.

Таким образом, можно констатировать, что агрегативная формализация удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к моделям сложных систем.

2.3 Сети Петри и их расширения.

Описание структур моделируемых проблемных ситуаций в виде сетей Петри.

Сети Петри и их обобщения представляют собой математические модели, построенные в рамках определенной концепции структуризации. Концепция структуризации базируется на возможности представления моделируемых систем в виде совокупности параллельных процессов, взаимодействующих на основе синхронизации событий или распределения общих для нескольких процессов ресурсов. Каждый процесс в рамках этой концепции представляется в виде логически обусловленных не упорядоченных по времени причинно-следственных цепочек условий и событий.

Рассмотрим общие подходы к описанию структур моделируемых проблемных ситуаций в виде сетей Петри. Сети Петри – удобный аппарат моделирования параллельных процессов, т.е. процессов, протекающих независимо один от другого.

При разработке структур моделей дискретных систем в качестве базовой информации можно использовать данные о логической взаимосвязи наблюдаемых в системе событий и условий, предопределяющих наступление этих событий.

В некоторых реальных системах нельзя точно предсказать момент времени наступления событий. Наступление событий предвдваряет сложная система причин и следствий. Точное знание моментов времени реализации событий в системе часто можно игнорировать, поскольку такие сведения о событиях, происходящих в реальных (или проектируемых) системах, либо просто отсутствуют, либо их нельзя считать достоверными. Это объясняется многообразием предвдваряющих события условий, невозможностью полного их учета и верного описания, а также действием сложной и запутанной системы причин и следствий, определение которых на временной шкале часто не представляется возможным.

Вводятся базовые понятия «Условие» и «Событие», которые могут быть связаны отношением типа «Выполняется после» (рис. 2.8).

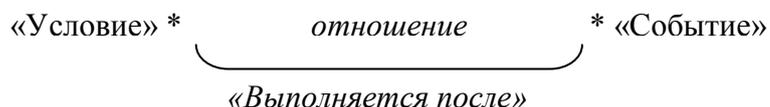


Рисунок 2.8– Описание структур моделируемых дискретных систем в виде сетей Петри.

События выражают действия, реализация которых управляет состояниями системы. Состояния задаются в виде сложных условий, формулируемых как предикаты с переменными в виде простых условий. Только при достижении определенных состояний (в этом случае соответствующие предикаты принимают истинное значение) обеспечивается возможность действий (наступления событий). Условия, с фактами выполнения которых связана истинность

предиката и, следовательно, возможность реализации события, называют «до-условиями» (предпосылками наступления события).

В результате действия, совершившегося при реализации события, объявляются истинными все простые условия, непосредственно связанные с данным событием отношением «Выполняется после». Эти условия рассматриваются как «пост-условия» (прямые следствия событий).

Только после выполнения всех «до-условий» для некоторого события это событие может быть выполнено. После того как событие имело место, истинными становятся все «пост-условия» данного события, которые затем, в свою очередь, могут быть «до-условиями» каких-либо других событий и т. д. Таким образом, оформляется логическая взаимосвязь событий и условий, предопределяющих эти события – *в виде логически обусловленных причинно-следственных цепочек условий и событий*. Построение полной структуры таких отношений для моделируемой проблемной ситуации составляет цель и задачу *формирования структуры модели*.

В таблице 1 рассматривается фрагмент моделируемой производственной системы, отражающий некоторый процесс обслуживания деталей на станке. При структуризации объекта моделирования были выделены следующие события и условия:

Таблица 1 – Структуризация производственной системы (фрагмент).

До-условия	События	Пост-условия
<p>p_1 - i - деталь готова к обработке, находится на месте комплектации</p> <p>p_2 - станок свободен</p> <p>-----</p> <p>p_4</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p>	<p>t_1 – начинается программа обработки детали на станке</p> <p>-----</p> <p>t_2 - выполнена программа обработки i-детали</p>	<p>p_3 – освободилось место в накопителе деталей</p> <p>p_4 - выполняется программа обработки детали</p> <p>-----</p> <p>p_5 - i - деталь обработана</p> <p>p_2 - станок свободен</p> <p>.</p> <p>.</p>

Формальное и графическое представление сетей Петри.

Рассмотренная концепция структуризации моделируемой проблемной ситуации поддерживается формальными средствами, разработанными в теории сетей Петри.

В сетях Петри условия моделируются позициями, а события — переходами.

Формально сеть Петри представляет собой набор:

$S = (P, T, E)$, где

P — непустое конечное множество позиций сети;

T — непустое конечное множество переходов;

$E = (P \times T) \cup (T \times P)$ — отношение инцидентности позиций и переходов (множество дуг сети) - логически обусловленные причинно-следственные связи между событиями и условиями.

Также могут быть заданы:

- $W: F \rightarrow N$ - функция кратности дуг (каждой дуге ставится в соответствие $n > 0$ - кратность дуг);
- $M: P \rightarrow N$ - функция начальной разметки.

В различных расширениях сетей Петри используются графические представления - графы, орграфы, диграфы – в общем виде некоторые сетевые представления.

Графически ординарные сети Петри представляются двудольными *орграфами*:

$$C = (P, T, E).$$

Множество вершин в таких орграфах состоит из непересекающихся подмножеств позиций $P = \{p_i\}, i = \overline{1, |P|}$ и переходов $T = \{t_j\}, j = \overline{1, |T|}$, а множество дуг E разделяется на два подмножества $\{(p_i, t_j)\}$ и $\{(t_j, p_i)\}$. Дуги (p_i, t_j) ориентированы от позиций к переходам, а дуги (t_j, p_i) — от переходов к позициям.

В изображении графов, представляющих ординарные сети Петри, позиции принято обозначать кружками, а переходы — барьерами (планками) следующим образом:



Рисунок 2.9 – Обозначения основных элементов сетей Петри.

Для примера рассмотрим фрагмент сети Петри, моделирующей структуру процессов функционирования производственной системы, соответствующий примеру, приведенному в таблице 1.

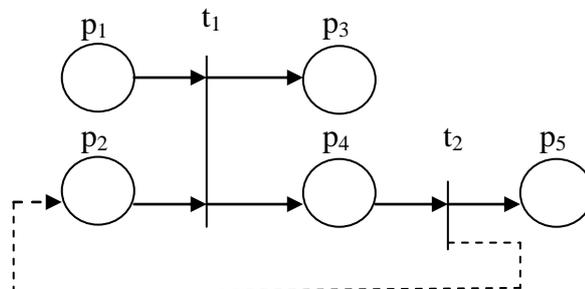


Рисунок 2.10 – Фрагмент сети Петри.

Реальный процесс может иметь более сложное ветвящееся графическое изображение (рис. 2.11).

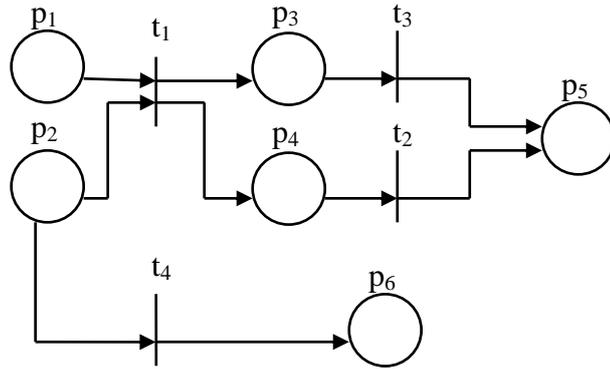


Рисунок 2.11 – Фрагмент сети Петри.

Динамика сетей Петри.

Динамика поведения моделируемой системы отражается в функционировании сети в виде совокупности действий, называемых *срабатыванием переходов*.

Динамика сетей Петри обусловлена соглашениями относительно *правил срабатывания переходов*. Действующие в сетях Петри соглашения о правилах выполнения переходов выражают логические взаимосвязи между условиями и событиями в моделируемой системе. Переход может сработать (*срабатывание перехода*), если выполнены все условия реализации соответствующего события. Последовательная реализация событий в системе отображается в сети в виде последовательного срабатывания ее переходов.

Механизм маркировки позиций. Изменение состояния сети связано с механизмом изменения маркировок позиций. Начальное состояние сети Петри задается с помощью маркировки ее позиций. *Маркировка сети (разметка позиции-места)* заключается в присвоении позициям числовых значений (меток, маркеров, фишек). Метки представляют собой набор атрибутов (числа, переменные). Например, начальную разметку можно записать в виде вектора $M_0(p)=(00000110100)$, где 1- соответствует условиям, которые должны быть выполнены.

Когда емкости позиций невелики, в качестве меток на графических изображениях сетей Петри используют не числа, а *фишки, маркеры*. Выполнение условия изображается разметкой (маркировкой) соответствующего места, а именно помещением числа n - фишек (маркеров) в эту позицию. Изменение состояния сети связано с изменением маркировок позиций, в этом случае выполняется возбужденный переход, т.е. переход с ненулевыми метками. Переход может сработать, если выполнены все условия реализации соответствующего события. Для этого задаются специальные правила или *процедуры перехода*. На рисунке 2.12 (а, б, в) демонстрируется, как в сетях Петри реализуется механизм маркировки.

Таким образом, срабатывание перехода – это неделимое действие, изменяющее разметку: из каждого входного места (позиции) изымается по одной фишке, а в каждое выходное место (позицию) добавляется по одной фишке. Тем самым реализация события, изображенного

переходом, изменяет состояние связанных с ним условий (уменьшается емкость до-условий, увеличивается емкость пост-условий).

Применяются следующие правила изменения маркировок:

- выполняется только возбужденный переход, т.е. такой переход, во всех входных позициях которого имеются ненулевые метки;
- срабатывание перехода может наступить через любой конечный промежуток времени после его возбуждения;
- если в некотором состоянии сети возбужденным оказывается сразу несколько переходов, то всегда выполняется только какой-то один (любой) из них;
- в результате срабатывания перехода метки в каждой позиции перехода уменьшаются на единицу, а метки во всех его выходных позициях увеличиваются на единицу;
- выполнение перехода – неделимый акт, изменение разметки входных и выходных позиций перехода при его выполнении осуществляется мгновенно.

Всякому возможному варианту выполнения сети будет отвечать определенная последовательность срабатываний переходов и последовательность получающих после каждого очередного срабатывания маркировок вида: $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots M_k$.

Сети Петри формализуют понятие *абстрактной асинхронной системы динамической структуры из событий и условий*. В сетях Петри не моделируется ход времени, события упорядочиваются по отношению «Выполняется после».

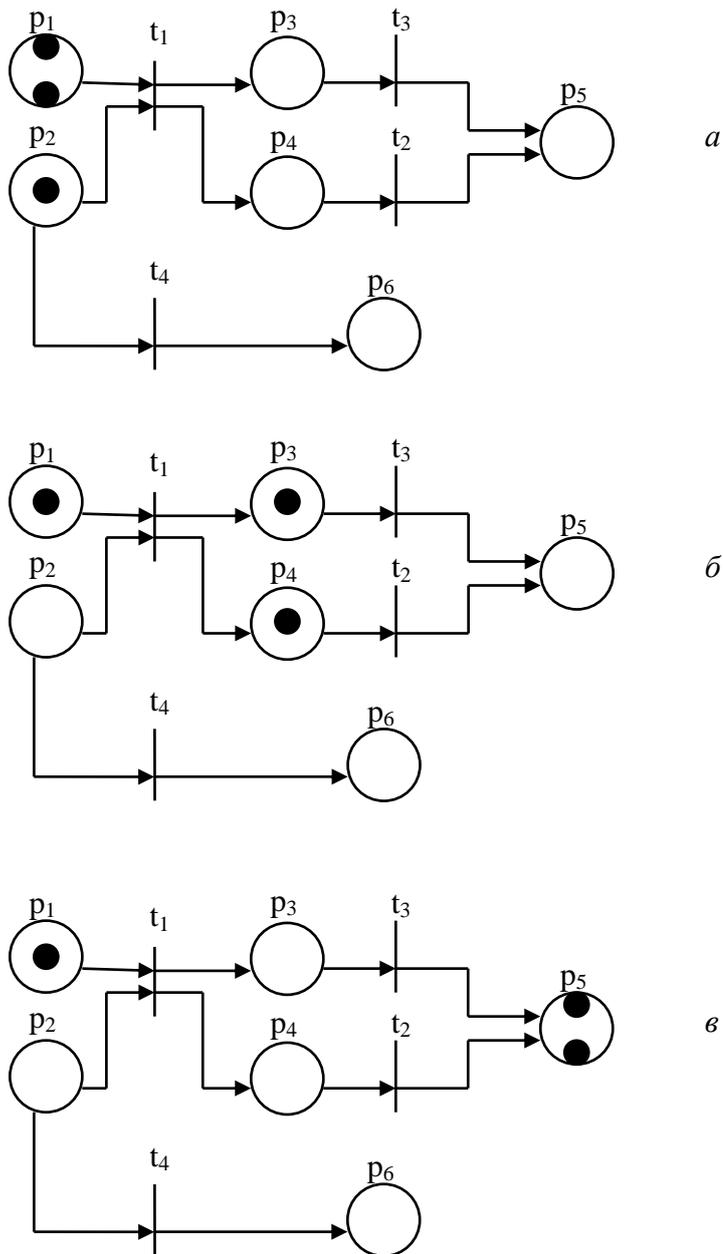


Рисунок 2.12 – Реализация механизма маркировки в сетях Петри.

Различные обобщения и расширения сетей Петри.

Сети Петри моделируют широкий класс систем, но для некоторых распространенных специальных классов систем удобно применять сети Петри не общего вида, а некоторые их подклассы или расширения (иерархические сети, раскрашенные сети Петри, сети событий, временные сети событий, КОМБИ-сети, ЕД-диаграммы), более адекватные рассматриваемым системам.

Регулярные сети. Основным свойством регулярных сетей является наличие определенной алгебры, которая обеспечивает проведение аналитического представления процесса топологического построения и расчленения процесса анализа сетей на совокупность этапов, на каждом из которых достаточно иметь дело с более простыми фрагментами сети.

В свою очередь обобщением регулярных сетей являются **иерархические сети**, предназначенные для адекватного моделирования иерархических динамических систем. Иерархическая сеть функционирует, переходя от разметки к разметке, с некоторыми отличиями от работы регулярных сетей. Данные отличия связаны с присутствием составных переходов, срабатывание которых является не мгновенным событием, как в традиционных сетях Петри, а составным действием. Поэтому составной переход не срабатывает, а работает, т.е. находится некоторое время в активном состоянии.

При моделировании систем сетями Петри, часто возникают ситуации, при которых фишки позиций (мест) должны быть не «безлики», а должны соответствовать объектам, передаваемым от компонента к компоненту (от перехода к переходу). Причем, как правило, эти объекты имеют дополнительные атрибуты, которые позволяют различать их и использовать эти различия для управления функционированием системы. Для адекватного описания подобных ситуаций был разработан подкласс **раскрашенных сетей Петри**. В рассмотренных нами ранее сетях все метки предполагались одинаковыми. Механизм функционирования сетей был связан только лишь с количествами меток во входных позициях переходов и определялся общими для всех меток условиями возбуждения переходов и правилами изменения разметки позиций при выполнении сети. Появление раскрашенных сетей Петри связано с концепцией использования различных меток. В таких сетях каждая метка получает свой цвет. Условия возбуждения и правила срабатывания переходов для меток каждого цвета задаются независимо. В данных сетях фишкам приписываются некоторые признаки, например различные цвета (переменные), а кратности дуг интерпретируются как функции от этих переменных. Условия срабатывания переходов и правила изменения разметки задаются специальной таблицей, учитывающей цвета фишек.

Дальнейшим расширением раскрашенных сетей явились **предикатные сети**. Данные сети позволили связывать с переходами сетей логические формулы (предикаты или защиту), представляющие классы возможных разметок во входных и выходных позициях в соответствии с метками дуг. Эти выражения задают условия отбора необходимых цветов для срабатывания переходов.

Технология разработки моделей.

При разработке имитационной модели из класса расширений сетей Петри, как впрочем и любой другой имитационной модели, выделяются четыре основные этапа: структуризации,

формализации и алгоритмизации, программирования модели, а далее проведения имитационных экспериментов с моделью.

При *структуризации* определяются и неоднократно уточняются:

- действующие в системе процессы и используемые ресурсы;
- множество позиций (отображают в модели состояния процессов и ресурсов) и множество переходов (событий);
- подмножество синхронизирующих (для описания параллельных процессов) переходов.

При *формализации и алгоритмизации* элементов модели для каждой позиции определяются атрибуты меток. Переход считается формально описанным, если известны:

- множества смежных с этим переходом позиций;
- условий возбуждения перехода;
- схема выполнения;
- процедура перехода.

Условия возбуждения перехода – есть некоторый предикат, принимающий истинное значение, если реализуется некоторая разметка позиций множества E (проверяются атрибуты меток). *Схема выполнения* определяет изменение разметки позиций сети при срабатывании перехода. *Процедура перехода* представляет собой правила вычисления атрибутов или добавления меток.

Программирование модели связано с описанием позиций и переходов сети, оформляемых с помощью некоторых языков программирования или моделирования, например GPSS.

2.4 Модели системной динамики.

Парадигма и методы системной динамики.

Теперь нам предстоит познакомиться с одним из способов создания непрерывных имитационных моделей.

Под *непрерывной системой* обычно понимается система, состояние которой изменяется непрерывным образом в зависимости от некоторых независимых переменных (обычно времени).

Языки имитационного моделирования непрерывных систем предназначены для моделирования динамических объектов с непрерывным фазовым пространством и непрерывным временем с применением численных методов. Как правило, такие объекты описываются с помощью систем дифференциальных (интегро-дифференциальных) уравнений. Однако, в имитационном моделировании формализация явлений в виде математических схем – больше дань традициям, сегодня находят применение подходы, основанные на графической технике структуризации моделируемых динамических процессов.

Классическим примером языков моделирования такого типа явился язык *DYNAMO*, предложенный Дж. Форрестером. Дж. Форрестер – крупнейший специалист, разработчик концепции системной динамики, основные его работы: «Индустриальная динамика» (1961г.)[46]; «Динамика города» (1970 г.)[44]; «Мировая динамика» (1974 г.)[45]/ В этих работах изложен метод системной динамики или концепция потокового подхода в имитации, а также исследуются динамика предприятия, урбанизированной территории, проблемы развития человеческой цивилизации на основе предложенной концепции. Фундаментальные работы Дж. Форрестера рассматриваются в заключительной главе учебного пособия.

Дж. Форрестер применил принципы обратной информационной связи, для демонстрации того, что динамика функционирования сложных систем существенно зависит от структуры причинно-следственных связей, которые имеются в системе. Он считал, что сложные системы, в первую очередь производственные и социальные системы, принадлежат к классу систем с многоконтурными (дублирующими) нелинейными обратными связями. Предложенный им метод предназначался для изучения сложных динамических систем с нелинейными обратными связями.

В основе этого класса моделей лежит концепция системной динамики, ориентированная на моделирование систем и процессов *на высоком уровне агрегирования*, где отображения отдельных элементов процессов, т.е. их дискретности, становится ненужным (например, экономика отдельных стран и регионов, транспортные системы страны, и т.п., проблемы мирового развития). *В основе концепции системной динамики лежит представление о функционировании системы, как совокупности потоков информации, энергии, промышленной продукции, денежных средств и т.п.*

Согласно базовым идеям системной динамики, определяющее значение в описании динамики системы имеет структура системы, представленная в виде взаимодействующих потоков, и взаимодействие контуров обратной связи в ее структуре.

Методы и техника построения моделей системной динамики оказали большое влияние на формирование технологии имитационного моделирования. В методах системной динамики компьютерная модель создается с применением графической техники построения диаграмм потоков и причинных связей исследуемой системы, а затем имитируется на компьютере. В настоящее время существуют системы моделирования, т.к. *iThink, Vensim, Powersim, AnyLogic*, представляющие *эффективные инструментальные средства программной поддержки техники, процедур и методов системной динамики*, в которых возможности моделирования непрерывных и нелинейных динамических систем дополнены удобными графическими интерфейсами. С помощью этих систем диаграммы создаются на идеографическом уровне, параметризация модели осуществляется в режиме подменю, с использованием средств ввода формульной, табличной и графической информации, в процессе диалогового взаимодействия разработчиков модели и системы моделирования, системы моделирования имеют развитые средства для проведения и анализа результатов вычислительных экспериментов и сценарных расчетов.

Системная динамика как метод имитационного моделирования является эффективным инструментом прогнозирования и анализа возможных вариантов развития сложных процессов и систем, характеризующихся наличием большого числа обратных связей и их существенной нелинейностью.

Методы системной динамики применяются в моделировании экономической процессов: исследуемые с помощью этих методов системы являются слабоструктурированными, отсутствие теоретических знаний, качественный характер знаний о системе с большой долей экспертных знаний не позволяет применять точные нормативные модели. Системно-динамическая модель создается на основе ментальной модели и является в известной степени способом структуризации экспертного знания по проблеме. При исследовании такого класса систем присутствует низкий уровень точности исходных данных, внешняя и внутренняя неопределенность, связанная с присутствием большого количества факторов, находящихся под слабым контролем лиц, принимающих решения. Особенностью моделирования является то, что акцент делается на управленческом аспекте, полученные решения ориентированы на понимание поведения системы, а не получение точных количественных оценок, носят качественный характер, по результатам моделирования в основном судят о направлении и траектории развития динамических процессов, проводят анализ устойчивости и оценку общего равновесия динамической системы.

Модели системной динамики получили широкое распространение в задачах исследования сложных систем из сферы производства и экономики, торговли и городского хозяйства, из области

социальных проблем, проблем экологии и охраны окружающей среды [27]. Эти модели были первыми машинными моделями, положившими начало новому направлению в системных исследованиях — так называемому *глобальному моделированию*, охватывающему проблемы мирового развития — моделирование мировой экономической системы [45]. Наиболее существенные приложения системной динамики рассмотрены в главе 4.

Системная динамика, как метод и инструмент исследования сложных экономических и социальных процессов и систем, изучается в бизнес-школах по всему миру, применяется в управленческом консалтинге. Существует международное научное общество Системной динамики [65, 66], которое популяризирует и развивает методы системной динамики.

Общая структура моделей системной динамики.

Говоря в целом о методах разработки моделей системной динамики, их можно охарактеризовать как способы структуризации дифференциальных моделей, базирующиеся на концепции потоковой стратификации систем.

Математической (формальной) основой методов системной динамики являются дифференциальные модели, в которых используются представления динамических процессов в пространстве состояний. Модели такого вида — это системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. При составлении дифференциальных моделей производится выбор переменных состояния, и устанавливаются связи между этими переменными в виде функций правых частей уравнений состояния. Как правило, сформулировать такие зависимости только с использованием переменных состояния бывает очень трудно. Более продуктивным оказывается другой подход, основанный на детальном описании цепочек причинно-следственных связей между факторами, отображаемыми в модели с помощью переменных состояния.

*Модели системной динамики разрабатываются на основе предоставляемых экспертами сведений об объектах исследования. Эксперт выявляет факторы, которые, в зависимости от целей изучения этих объектов, необходимо учитывать при описании динамики состояний моделируемого объекта, и анализирует цепочки причинно-следственных связей этих факторов. При построении моделей указанные сведения подвергаются тщательному анализу, в ходе которого находятся решения двух основных взаимосвязанных вопросов: *выбора и интерпретации переменных состояния модели; выявления причинно-следственных отношений между переменными состояния и описания этих отношений в форме структурированных функциональных зависимостей.**

Рассмотрим содержание базовой концепции структуризации моделей системной динамики.

В общей структурной схеме моделей системной динамики выделяются две части: сеть потоков и сеть информации. Это как бы основные образы моделируемых процессов в системной динамике.

Поясним сначала первую составляющую этой структурной схемы.

Потоковая стратификация. Основные понятия.

Модель рассматривается в качестве сети потоков материальных ингредиентов модели. Каждая компонента этой сети соответствует какой-то одной совокупности однородных ингредиентов (например, предметы труда, население, денежные средства и т. п.), динамика которых учитывается в модели.

Например, рассматривая предприятие с позиций системного подхода, в основе него можно выделить совокупность таких потоков, как финансовые, материальные, людские (кадры), потоки оборудования и др. (рис. 2.13).

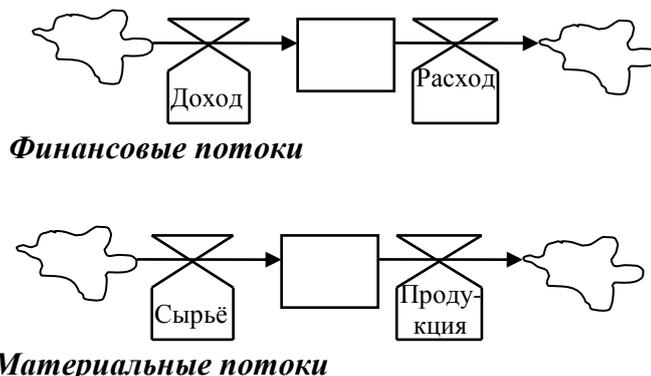


Рисунок 2.13 – Потоки на предприятии.

Сеть имеет узлы и дуги (рис. 2.14). Рассмотрим, как описывается динамика объекта моделирования в виде потоковых сетей. Узлы компонент сети потоков (за исключением нулевого узла) изображают наиболее существенные с точки зрения разработчиков модели состояния выделенных ингредиентов, а дуги сети задают возможные переходы их элементов из одного состояния в другое. Распределение элементов по состояниям меняется с течением времени. Эти изменения для системной динамики являются нормативными образами моделируемых процессов.

В качестве характеристик распределения элементов входящих в модель ингредиентов по состояниям X_1, \dots, X_m рассматриваются переменные x_1, \dots, x_m состояния модели. Переменные v_1, \dots, v_n принимаются за характеристики интенсивностей (скоростей), с которыми совершаются переходы элементов из состояния в состояние по дугам V_1, \dots, V_n сети.

Узлы сети изображаются в виде прямоугольников (рис. 2.15 а). На рисунке 2.15.б использованы специальные символы потоковых сетей. В моделях системной динамики нуль сети принято обозначать специальным знаком «Озеро».

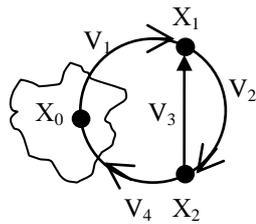
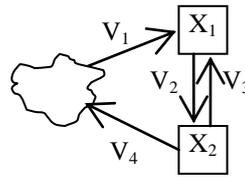
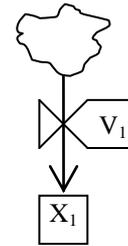


Рисунок 2.14 –
Сеть потоков



а



б

Рисунок 2.15 – Основные символы потоковых сетей: а – узлы сетей; б – потоковая дуга с символом темпа.

Такая интерпретация напоминает структурные формы задания автоматных моделей дискретных процессов. Однако модели системной динамики — это дифференциальные модели, переменные состояния которых непрерывны. Поэтому приведенной здесь структурной концепции моделей системной динамики обычно дается более естественное объяснение, основанное на гидравлической интерпретации потоковых сетей.

В этой интерпретации каждый узел $X_i \in X$ сети рассматривается как резервуар, уровень наполнения которого в момент t равен $x_i(t)$, $t=1,2, \dots, m$. Дуги $V_j \in V$ сети соответствуют потокам жидкости между резервуарами. Они указывают направление потоков, темпы которых характеризуются объемными расходами жидкости $v_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, n$ на интервале времени $[th, (t + 1)h]$. Темпы потоков символически изображаются в виде вентилях на дугах потоковых сетей (рис. 2.15.б).

Наглядность гидравлической интерпретации обусловила ее важную роль при структуризации моделей, специальную «потоковую» терминологию и общую трактовку математических схем моделей системной динамики.

В соответствии с терминологией системной динамики переменные состояния x_1, \dots, x_m называются *уровнями* модели, а переменные v, \dots, v_n — *темпами*. *Уровни и темпы* — *основные переменные* моделей. Все остальные переменные называются *вспомогательными* (или *дополнительными*). Вспомогательные переменные используются при структуризации функциональных зависимостей между основными переменными динамической модели.

Таким образом, получается следующая картина при описании динамической системы: моделируемые процессы отображаются в виде некоторой фиксированной структуры, состоящей из *накопителей* — *уровней*, соединенных взаимосвязанными *потоками*, которые, перетекая по всей системе, изменяют значение уровней. *Уровни* характеризуют возникающее накопление внутри системы и являются величинами, которые определяются как переменные состояния системы (например: для банка — это сальдо, для склада — текущий уровень запасов на складе).

Уровни описывают величины, непрерывные по диапазону значений, но дискретные во времени. *Потоки* изменяют значение уровней. В экономике, производстве потоками можно управлять. Потоки регулируются управленческими решениями, которые можно определить как скорости изменения потоков, т.е. *темпы*. *Темп* показывает, как изменяются уровни за интервал времени, равный шагу моделирования. *Темп* характеризует динамику моделируемой системы (попробуйте остановить систему: уровни будут значимы, а темпы неразличимы).

Потоковые сети являются неявной формой описания основных переменных дифференциальной модели – переменных состояния (уровней) и скоростей изменения состояний (темпов), - в форме разностных уравнений. Основные переменные модели: уровни, темпы, вспомогательные (или дополнительные) описываются с помощью следующих *разностных уравнений*:

Уровень - переменная, закон изменения которой во времени выражается конечно-разностными уравнениями:

$$X(t+h) = x(t) + h*V(t), \text{ где} \quad (2.1)$$

t – модельное (системное) время;

h - изменение (приращение) времени – шаг моделирования (интегрирования);

$x(t), x(t+h)$ - значение уровня в моменты времени;

$V(t)$ - скорость изменения уровня, т.е. величина его изменения за единицу времени.

Уровнями имитируют такие характеристики моделируемой системы, которые определяют ее состояние в конкретный момент времени.

Темп - это переменная, равная скорости изменения уровня. В (4.5.3) $V(t)$ является темпом. Закон изменения темпа задается функциональной зависимостью:

$$V(t) = F(p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t)), \text{ где} \quad (2.2)$$

t - модельное (системное) время;

$V(t)$ - темп на момент времени t ;

F - произвольная функция от k - аргументов;

$p_i(t)$ - любые переменные (уровни, темпы, дополнительные переменные), значения которых в момент t известны.

Темп характеризует динамику моделируемой системы.

Вспомогательные переменные введены для структуризации и описания сложных функциональных зависимостей, их можно использовать для более удобной записи уравнений темпов.

$$W(t) = F'(p_1(t) \dots p_k(t)), \text{ где} \quad (2.3)$$

t – модельное (системное) время;

$W(t)$ - значение вспомогательной переменной на момент t ;

$p_i(t)$ - любые переменные, значения которых на момент t известны;

F' - некоторая произвольная функция k - аргументов.

Алгоритм имитации, таким образом, реализуется на основе приведенных разностных уравнений следующим образом:

- устанавливаются *параметры системного времени* (начальное значение, шаг интегрирования, длина интервала моделирования), задаются *начальные условия* (значения уровней в начальный момент системного времени);
- по уравнениям (2.2), (2.3) на данный момент системного времени t рассчитываются значения всех темпов и вспомогательных переменных;
- $t + h$, системное время увеличивается на шаг моделирования (интегрирования);
- по уравнениям (2.1) рассчитываются значения всех уровней на данный момент системного времени;
- и т.д. выполняются множественные итерации по этой схеме, пока не закончится заданный интервал моделирования.

Информационная сеть. Вернемся к общей структурной схеме моделей системной динамики и рассмотрим вторую составляющую структурных схем моделей системной динамики - *информационную сеть*.

Структуризация и описание функциональных зависимостей между основными переменными системно-динамической модели завершается построением информационной сети модели. Описания информационных сетей в моделях системной динамики представляют собой *многоярусные графы*, вершины которых составлены вспомогательными переменными. Вспомогательные переменные главным образом используются для построения логически ясных, хорошо интерпретируемых структур взаимосвязей переменных, с помощью которых в моделях отображаются представляемые экспертами разнородные сведения об объекте моделирования.

В моделях системной динамики большая роль отводится эксперту. Модели создаются путем структуризации экспертной информации. Поэтому используется подход, основанный на анализе цепочек причинно-следственных связей факторов, подлежащих, по мнению экспертов, обязательному учету при описании динамики моделируемого объекта. Рассмотрим общую схему структуризации информации о причинно-следственных взаимосвязях динамических процессов в объектах моделирования:

- модели системной динамики разрабатываются на основе представляемых экспертами сведений об объектах исследования в форме вербального описания;

- эксперты проводят анализ и выявление всех факторов, необходимых для описания динамики моделируемого объекта (выбираются и интерпретируются переменные состояния модели). При построении моделей проводится тщательный анализ этих сведений;
- выявляются причинно-следственные отношения между переменными, для этого детально описываются цепочки причинно-следственных связей между факторами, отображаемыми в модели с помощью переменных состояний (это требует введения вспомогательных переменных);
- описываются эти переменные в структурированном виде с помощью графовых представлений;
- полученные конструкции применяются для формирования информационной сети модели.

Таким образом, в моделях системной динамики реализуется удобная и простая схема сбора и формализации информации, получаемой от эксперта в процессе построения моделей. Модели системной динамики используют специальную графическую технику при структуризации экспертной информации о проблеме. При разработке моделей системной динамики уделяется большое внимание построению и анализу диаграмм причинно-следственных связей.

Диаграмма причинно-следственных связей (ДПСС). Диаграмма причинно-следственных связей - это эффективный способ структуризации экспертной информации, который демонстрирует простые приемы качественного описания взаимосвязей факторов, учет которых признается необходимым для отображения в модели принципиальных моментов развития моделируемых процессов.

Техника составления диаграммы причинно-следственных связей следующая. На основе вербального описания моделируемых процессов выделяют фазовые переменные; используя логику описания, их попарно классифицируют по критерию «причина-следствие», причина со следствием соединяется стрелками, - таким образом, выявляются все причинно-следственные отношения. На дугах графов причинно-следственных диаграмм обычно расставляются знаки «+» и «-», с помощью которых фиксируется предполагаемый или же эмпирически обоснованный характер влияния переменных, соответствующих конечным вершинам дуг. Наличие знака «+» на дуге (a, b), направленной из вершины a графа в вершину b , означает, что при прочих равных условиях рост переменной a приводит к росту переменной b . Знак «-» описывает противоположный эффект влияния a на b : с ростом a величина b убывает.

В результате такой процедуры могут быть обозначены контуры с обратной связью. Выделяют петли положительной и отрицательной обратной связи, с помощью диаграмм интерпретируются механизмы их влияния на поведение рассматриваемой системы.

Такая схема структуризации информации о причинно-следственных взаимосвязях динамических процессов в объектах моделирования – схема формирования моделей на базе

«плюс – минус» – факторов называется *знаковым оргграфом*, известным также под названием *причинно-следственной диаграммы*.

Очевидно, диаграммы причинно-следственных связей являются предварительным способом анализа сложной системы. Она позволяет получить общую структуру модели системной динамики. Проставив веса на дугах такого графа – мы получаем взвешенные оргграфы, а произвольную функцию – функциональные оргграфы.

Системные потоковые диаграммы моделей.

Рассматривая характерные особенности моделей системной динамики, мы неоднократно обращались к различным графовым представлениям: сетям потоков, информационным сетям, причинно-следственным диаграммам. Для дальнейшего изложения важно заметить, что:

- сети потоков и информационная сеть описывают структуру моделей системной динамики только по частям;
- причинно-следственные диаграммы, напротив, отображают взаимосвязи переменных моделей только в целом для системы, не разделяя переменные по типам.

Сеть потоков является неявной формой (в виде разностных уравнений), а сеть информации явной формой описания одних и тех же переменных. Все они предлагают графовый способ описания зависимостей переменных состояния моделируемых систем.

Разработчики моделей системной динамики используют *особую технику графического описания структур моделируемых систем*. Основу этой техники составляет применение так называемых *системных потоковых диаграмм*. В потоковую диаграмму объединяются графовые конструкции сетей потоков и информации, в результате чего обеспечивается целостность представления структуры моделируемой системы.

Популярность методов системной динамики обусловлена во многом тем, что для описания структуры модели используются графические формы представления информации, получаемой от экспертов в ходе сбора и анализа сведений о моделируемых процессах, — предлагается особая, графическая техника структуризации информации, полезная в любой технологии системного моделирования.

Специальная техника графического представления потоковых диаграмм предлагает развитую графическую символику: оснащение сетей потоков и сетей информации специальной выразительной символикой. Основные символы, их назначение и условия использования представлены в таблице 2..

Отметим важность языковой функции потоковых диаграмм как технологического средства структуризации информации. При использовании описанной символики рассматриваемые графы превращают потоковые диаграммы в средство наглядного отображения информации о динамике

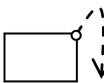
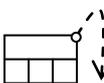
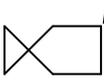
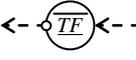
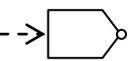
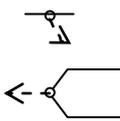
моделируемых процессов или, другими словами, — в язык общения экспертов по проблеме и системных аналитиков. Системные потоковые диаграммы доступны и наглядны, это делает их удобным средством для проведения совместных экспертных ревизий. Совмещение в конструкции потоковых диаграмм явной (сеть информации) и неявной (сеть потоков) форм графового описания зависимостей переменных состояния моделируемых систем, а также развитая графическая символика диаграмм приводят к тому, что потоковые диаграммы дают значительную часть той же информации, что и системы дифференциальных уравнений модели, но в иной, более наглядной форме.

Построение потоковых диаграмм оказывается непосредственно связанным с решением задач предмодельного анализа исследуемой проблемы, служит своего рода итогом исходной содержательной проработки информационной базы процесса моделирования. Методы системной динамики предлагают эффективный способ структуризации знаний эксперта на основе графической техники составления причинно-следственных и потоковых диаграмм.

Системные потоковые диаграммы – эффективное средство системного анализа, позволяет осуществлять декомпозицию сложной системы с последующей композицией. Такой язык определяет форму выражения обсуждаемых вопросов, выступает в качестве *средства разделения на части* задач анализа причинно-следственной структуры моделируемой системы и последующей «сборки» их результатов *в целостную картину* организации процессов развития системы.

По-видимому, без большого преувеличения можно сказать, что концепция потоковой стратификации систем, на которой базируются методы системной динамики, без языка потоковых диаграмм вряд ли оказалась такой привлекательной и популярной для специалистов, применявших и применяющих системную динамику в различных областях исследования сложных систем.

Таблица 2. – Основные символы потоковых диаграмм моделей системной динамики.

Название	Условное обозначение		Назначение и условия использования
	буквенное	графическое	
Озеро	0		Нулевой узел потоковых сетей. Обозначает истоки и стоки потоковой сети
Потоковая связь	I		Дуга потоковой сети диаграммы. Может соединять уровни с уровнями, истоками и стоками. Проходит через темп
Информационная связь	F		Дуга информационной сети диаграммы. Может соединять входы (параметры), вспомогательные переменные и уровни с темпами, вспомогательными переменными и выходами
Уровень	L		Узел потоковой сети диаграммы. Обозначает переменную состояния модели
Запаздывание	L		Уровень специального вида. Характеризуется временем и порядком. Темп выходного потока определяется значением уровня, временем и порядком запаздывания
Темп	R		Обозначает скорость потока, проходящего по соответствующей дуге потоковой сети. Единица измерения темпа равна единице измерения уровня, деленной на время. Темпы не зависят непосредственно друг от друга
Вспомогательная переменная	A		Если идентификатор переменной заключен в дефисы сверху и снизу, то это означает, что переменная находится с помощью табличной функции
Выход (дополнительная переменная)	S		Переменные модели, характер изменения которых во времени интересует исследователя
Вход	C		Экзогенная переменная модели либо константа

Основные этапы разработки моделей системной динамики.

При нормативном подходе к разработке динамических моделей предполагается систематизация форм причинно-следственных описаний моделируемых процессов и соблюдение определенного порядка построения этих описаний.

В рамках рассмотренной концепции системная динамика предлагает *две нормативные схемы формирования общей структуры моделей:*

Схема 1. Сначала разрабатывается *причинно-следственная диаграмма модели.* В число учитываемых при разработке модели факторов и связей включаются все те из них, которые используются экспертами при содержательном описании моделируемого объекта. Затем

выполняется анализ зафиксированных в разработанной диаграмме цепочек причинно-следственных связей и определяются факторы, которые описываются в модели *уровнями и темпами.*, т.е. выделяются переменные уровней и темпов. В результате формируется, прорисовывается на эскизах *сеть потоков модели.*

А далее выделяется и *уточняется* в качестве структуры, дополняющей сеть потоков в причинно-следственной диаграмме, *информационная сеть модели.*

Схема 2. Сначала выделяется множество основных материальных ингредиентов, динамику которых необходимо отобразить в модели. Для каждой выделенной совокупности однородных элементов определяется множество их возможных состояний и устанавливается структура переходов элементов ингредиентов из состояния в состояние. В результате *формируется сеть потоков модели.*

А затем устанавливается структура причинно-следственных связей между уровнями и темпами сети потоков, т. е. *разрабатывается структура информационной сети модели.* При таком подходе с помощью информационной сети «как бы» сшиваются потоковые представления.

Обе нормативные схемы являются лишь общими правилами структуризации в рамках единой концепции системной динамики и применяются в зависимости от класса решаемых задач.

Основные этапы моделирования на основе рассмотренных выше схем поясняются на рисунке 2.16. Рассмотрим, каким образом могут быть использованы рассмотренные техники структуризации моделей на первых этапах моделирования.

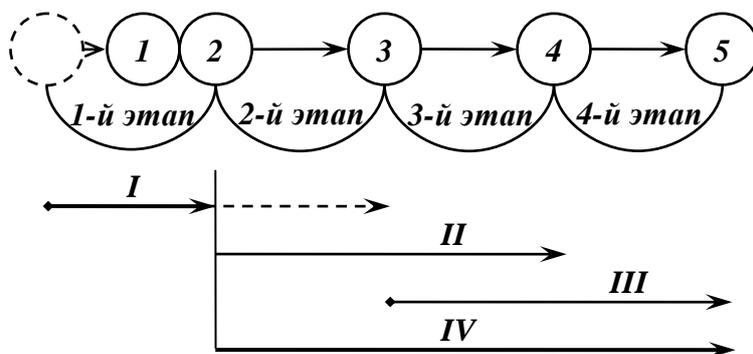


Рисунок 2.16 – Основные этапы разработки моделей системной динамики:

- I* — концептуализация; *II* — структуризация; *III* — параметризация; *IV* — формализация;
- 1* — вербальная модель; *2* — знаковый орграф модели; *3* — потоковая диаграмма модели;
- 4* — дифференциальные (разностные) уравнения модели (составление уравнений темпов);
- 5* — машинная модель.

Концептуализация проблемной ситуации. Начало разработки модели системной динамики обычно определяют как этап построения «*вербальной модели*» исследуемой проблемной ситуации. Такой этап работы, безусловно, входит в любую технологию моделирования. В

процессе построения вербальной модели осуществляются постановка проблемы, анализ исходной информации, формулировка целей моделирования и т. п. Этот этап, пожалуй, наиболее ответственный и сложный. Успех его выполнения во многом зависит от уровня подготовки и опыта системных аналитиков, участвующих в создании модели.

Составление вербального описания предполагает систематизацию причинно-следственных описаний моделируемых динамических процессов. Вербальное описание может содержать эскизы потоковых диаграмм и диаграммы причинно-следственных связей. При составлении вербального описания необходимо выполнить:

- анализ исходной информации, выявляемой в ходе интенсивных дискуссий с экспертами и специалистами;
- постановку проблемы, формулировку целей моделирования;
- формулирование наиболее принципиальных гипотез, которые впоследствии должны найти отражение в модели;
- выявление границ моделируемой системы (исходя из принципа замкнутости);
- детальное обоснование и установление основной структуры модели (состава взаимодействующих компонентов, динамика которых определяет наиболее существенные (важные) аспекты поведения и состояния системы);
- обсуждение воздействия на систему внешних факторов;
- выявление основных факторов и процессов, отображение которых является обязательным для достижения поставленной цели моделирования;
- описание всей структуры отображаемых в модели причинно-следственных взаимосвязей между факторами в форме вербального описания.

При разработке вербальной модели должны быть также выявлены:

- альтернативы (основные ситуации, варианты, стратегии), экспериментальное исследование которых предполагается проводить с помощью имитационной модели;
- критерии оценки поведения модели;
- временные параметры имитации (шаг интегрирования, время моделирования).

В результате выполнения первого этапа должно быть составлено вербальное описание, сформулированное в виде четких словесных конструкций, содержащее предварительное описание всей структуры отображаемых в модели причинных взаимосвязей, и зафиксированное специальными диаграммными представлениями, например, с помощью эскизов диаграмм потоков и/или диаграммы причинно-следственных связей.

Построение системных потоковых диаграмм. Этап разработки потоковой диаграммы является основным при структуризации модели системной динамики. Нормативное содержание данного этапа — переход от причинно-следственной диаграммы разрабатываемой модели к ее

потоковой диаграмме. Такой переход в соответствии с 1 нормативным подходом связан с выделением вершин (и дуг) орграфа причинно-следственной диаграммы в соответствии с основными типами переменных и аксиомами системной динамики. Выполнение аксиом обеспечивает в последующем разработку и алгоритмизацию по диаграмме дифференциальных (разностных) уравнений модели.

В целом рассматриваемый переход неформален и, как правило, опирается на содержательные суждения о характере и причинах взаимодействия факторов, представленных в виде переменных модели.

Параметризация модели. Предположим, что в нашем распоряжении уже имеется потоковая диаграмма модели, на которой указана структура основных причинных зависимостей темпов модели от уровней. Параметризация модели представляет собой процесс перевода вербальных описаний взаимозависимостей факторов моделируемой проблемной ситуации на язык четких количественных соотношений.

Системная динамика представляет разработчикам общие приемы, использование которых, как правило, облегчает и упрощает выбор и обоснование производящих функций темпов. Рассмотрим здесь *два основных приема*.

Первый из них основан на том, что *темпы потоков можно рассматривать в качестве функций принятия решений*. Использование такой концепции особенно удобно и естественно при моделировании производственных и экономических систем, когда производящие функции темпов фактически представляют собой количественные описания *решающих правил*, действующих в механизме управления системой.

При разработке, с этой точки зрения, рекомендуется выделять и в явном виде отображать в производящих функциях темпов следующие структурные элементы:

- желаемое состояние потокового сектора, в котором действует определенный темп (задание цели решающего правила);
- существующее (текущее) состояние сектора;
- количественное выражение различия между указанными состояниями потокового сектора;
- соотношение для выработки корректирующего воздействия на темп, которое обеспечивает перевод сектора в желаемое состояние.

Например, в производственной системе рассогласование между сетью материалов и сетью оборудования такой системы, связанные с отклонениями от требуемой экономической программы, позволяют в информационной сети модели формировать соответствующие регуляторы для достижения требуемого состояния производственной системы.

Второй методический прием, широко используемый при разработке уравнений темпов моделей системной динамики, — это *способ задания производящей функции темпа в виде*

произведения «нормального темпа» и корректирующих множителей, определяющих его зависимость от переменных состояния (уровней) модели.

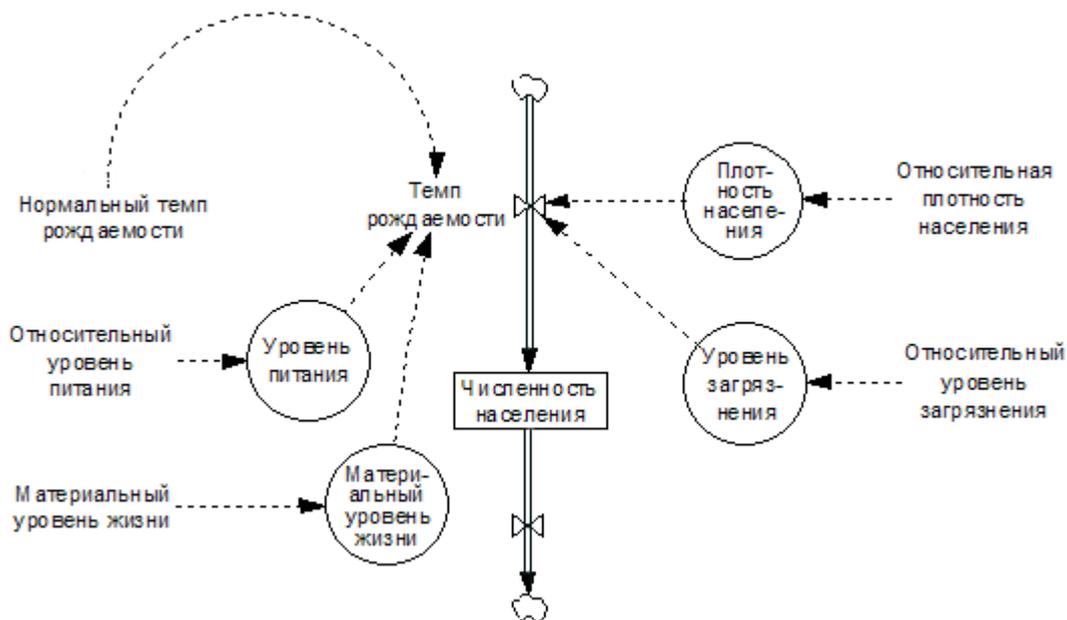


Рисунок 2.17 – Фрагмент потоковой диаграммы модели мировой динамики.

Рассмотрим фрагмент потоковой диаграммы (рис. 2.17) модели мировой динамики Дж. Форрестера [45]. Темп рождаемости населения определяется здесь как произведение численности населения (состояние), нормального темпа рождаемости и следующих сомножителей, отображающих зависимости темпа рождаемости от:

- материального уровня жизни;
- плотности населения;
- уровня питания;
- уровня загрязнения.

Каждый из четырех перечисленных выше множителей представляет собой нелинейную функцию, вид которой отражает реальные совокупности данных о характере описываемой причинной связи, или же задает экспертную оценку (гипотезу) такой связи.

Использование описанной формы уравнений темпов обеспечивает наглядность и простоту их содержательной интерпретации, является удобным средством для экспертной оценки информации о наиболее трудно формализуемых аспектах причинных связей компонентных процессов моделируемых систем.

Важным обстоятельством, способствующим преемственности различных форм конструирования моделей при использовании рассмотренных нами приемов параметризации моделей, является четкое соответствие структур уравнений темпов строению информационной сети потоковой диаграммы модели системной динамики. Например, структура представления

производящих функций темпов в виде произведений нормальных темпов и корректирующих множителей непосредственно соотносится структуре причинно-следственных зависимостей, заданных диаграммами разрабатываемой модели. Каждый из корректирующих множителей ставится в соответствие дуге информационной сети потоковой диаграммы модели. При этом вид (возрастающая или убывающая функция) будет отвечать знаку, определенному для данной дуги в причинно-следственном графе модели. Таким образом, используя второй из рассмотренных приемов, специалист по системной динамике на основе знакового орграфа модели может записать общее выражение для любого темпа модели и качественно охарактеризовать вид образующих его функциональных сомножителей.

Визуальные среды компьютерного моделирования *Vensim*, *iThink*, *Powersim* и др., поддерживающие нормативные подходы и методы системной динамики, содержат высокотехнологичный инструментарий для формирования потоковых диаграмм в идеографическом режиме, параметризации моделей с использованием различных форм представления информации и описания зависимостей, а также средства проведения машинной имитации и представления результатов компьютерных экспериментов.

2.5 Агентное моделирование

Парадигма и принципы построения агентных моделей

В последние несколько лет в научных и университетских кругах ведущих стран активно ведутся исследования в области агентных систем, которые основаны на моделировании поведения множества независимых активных объектов в определенной среде. Речь идет об активных, автономных, коммуникабельных, а главное, мотивированных объектах, «живущих» и «действующих» в сложных, динамических и, чаще всего, виртуальных средах. Уже сегодня агентно-ориентированный подход находит широкое применение в таких областях, как распределенное решение сложных задач, совмещенная разработка компьютерных программ и электронный бизнес, построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование.

Агентное моделирование и имитация (ABMS – agent-based modeling and simulation) – это новое инновационное направление в моделирование сложных систем, состоящих из автономных и независимых агентов. Агентное моделирование может рассматриваться в различных плоскостях, наиболее широко распространённые аббревиатуры: ABM (agent-based modeling), ABS (agent-based systems), IBM (individual-based modeling), ABMS (Agent-based Modeling and Simulation). Далее по тексту будет использована аббревиатура ABMS.

Агентное моделирование связано со многими другими сферами деятельности, такими как системный анализ, компьютерные технологии, комплексные адаптивные системы (CAS), многоагентные системы MAS (multi-agent systems) и разработка технологии искусственных агентов в сфере искусственного интеллекта (AI), менеджмент, социальные и другие науки, а также традиционными методами имитации и моделирования. ABMS черпает из приведённых выше сфер теоретические знания, концептуальное представление и философию их существования. Основное направление ABMS – это моделирование социального и организационного поведения людей, а также принятия ими решений. В соответствии с этим возникает необходимость в представлении социального взаимодействия, сотрудничества, группового поведения, сложной социальной структуры.

Агентная модель представляет реальный мир в виде отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами. Агентная модель состоит из множества индивидуальных агентов и их окружения. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, и внешней средой, и в процессе функционирования может изменять как свое поведение, так и внешнюю среду. Агенты функционируют независимо, по своим законам, асинхронно, обычно в таких системах не существует централизованного управления.

Поведение системы описывается на индивидуальном уровне, глобальное поведение рассматривается как результат совокупной деятельности агентов, существующих в общей среде, каждый из которых действует по своим правилам. Поведение сложной системы формируется как результат взаимодействия агентов, в которой они осуществляют свое поведение, что позволяет наблюдать и изучать закономерности и свойства присущие системе в целом. Системологическая имитационная модель формируется «снизу вверх», при построении модели задается индивидуальная логика поведения участников процесса, а тенденции, закономерности и характеристики поведения всей системы формируются как интегральные характеристики поведения совокупности агентов, составляющих систему.

Основная цель агентных моделей — получить представление об этих глобальных правилах, общих закономерностях и тенденциях в поведении, динамических свойствах системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агентное моделирование полезно, если требуется исследовать и изучать закономерности, которые проявляются не в поведении отдельных агентов, а приводят к структурным образованиям, изменениям в организации самой системы; а также если необходимо исследовать влияние индивидуального поведения агентов, процессов их адаптации и обучения на поведение, эволюцию и развитие системы.

Агентный подход применяется в тех областях исследований, где отсутствует теоретическое знание о системе и формальные модели, а также в тех случаях, когда традиционные постулаты об однородности и рациональном поведении агентов, приводящие к агрегированию моделей, не позволяют получить адекватные представления о поведении изучаемой системы. Многоагентные (или просто агентные) модели используются для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами, а наоборот, эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы.

Вычислительные возможности современных компьютеров и достижения в информационных технологиях, позволяют представить систему практически любой сложности из большого количества взаимодействующих объектов, не прибегая к агрегированию, делают возможным реализацию агентных моделей, содержащих десятки и сотни тысяч активных агентов, что позволяет применять ABMS в сферах, где необходимо моделирование большого числа агентов.

Отметим, ABMS – стохастический подход, это означает, что модель, как правило, включает стохастические элементы, влияющие на результаты поведения и взаимодействия агентов, а тенденции в функционировании системы выявляются при большом количестве проведенных компьютерных имитаций.

Существуют различные интерпретации понятия *агента*. В частности, отмечаются такие свойства агентов как: его активность, по-сравнению с пассивными объектами; фундаментальные особенности агента заключающиеся в его способности принимать свои решения вне зависимости от других агентов; поведение таких агентов может варьироваться от примитивных реакций на изменение внешней среды, до сложных адаптивных правил, в которых присутствуют механизмы адаптации, корректирующие его поведение в ответ на изменения окружающей среды. Общим во всех этих понятиях является то, что агент — это некоторая сущность, которая обладает активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими агентами, а также может изменяться (эволюционировать, адаптироваться).

С практической точки зрения выделяют следующие важные характеристики и свойства агентов (представленные также на рисунке 2.18):

- *Агент* – идентифицируемый, дискретный объект, имеющий определённый набор характеристик и правил, управляющих его поведением и способностью принимать независимые решения. Агенты по своей природе самодостаточны. Свойство дискретности указывает на то, что агент имеет границу, позволяющую любому человеку понять, что является его частью, а что нет, или является общей характеристикой.

- *Социальность*. Агент находится и действует в определенном окружении, с которым он взаимодействует в той же степени, что и с остальными агентами. Агенты используют некоторые протоколы для взаимодействия друг с другом, а также с окружением. Способность распознавать или различать других агентов также является неотъемлемой характеристикой агента.

- *Активность*. Агент сам по себе может иметь свои собственные цели для достижения (необязательно максимизация чего-либо), которые влияют на их поведение. Это позволяет агенту сравнивать достигнутые результаты с поставленными целями.

- *Автономность*. Агент автономен и может функционировать самостоятельно, независимо от окружения и взаимодействия с другими агентами, по крайней мере в некоторых ситуациях, представляющих для него особый интерес. Поведение агента определяется его внутренним состоянием.

- Гибкость поведения агента заключается в его способности учиться и адаптировать правила своего поведения, основываясь на полученном опыте. Агент может также иметь специальные правила, изменяющие базовые правила его поведения.



Рисунок 2.18. Основные характеристики агента

Состояние и поведение агентов меняется со временем. Агенты имеют динамические связи с другими агентами, и эти связи могут формироваться и исчезать в процессе функционирования.

Многие исследователи отмечают свойство динамичности среды как важный признак агентных систем. Среда, в которой действуют агенты, не является неким набором экзогенных параметров, не меняющихся во времени. Напротив, сами агенты своим коллективным поведением формируют её. Например, формирование цены на активы на фондовых рынках происходит под влиянием спроса агентов на них. Безусловно, каждый отдельный агент может воспринимать цену как фактор внешней среды, но на самом деле его значение определяется внутри самой модели динамически.

В общем и целом можно сказать, что агенты многообразны, неоднородны и динамичны в их поведении и свойствах. Агенты различаются по их атрибутам (свойствам) и накопленным ресурсам (рис. 2.18). Правила поведения варьируются по своей изощрённости, соответственно тому, сколько информации необходимо для принятия решения, представлениям агента об его окружении, включая других агентов, а также по размеру памяти агентов о событиях в прошлом, влияющих на принятие текущих решений.

Агенты могут быть рациональными (обладают поведением, удовлетворяющим экстремальным принципам) и ограниченно рациональными.

Под *интеллектуальным агентом* понимают агента, который обладает рядом знаний о себе и окружающем мире и поведение которого определяется этими *знаниями*. Интеллектуальный агент, подобно экспертной системе, имеет базу знаний и подсистему рассуждений, и реализуется с применением методов и технологий искусственного интеллекта. Помимо знаний, интеллектуальный агент может обладать так называемыми «*ментальными свойствами*», к которым относятся убеждения, желания, намерения и др.

Система, в которой существуют агенты различных классов, которые потенциально могут взаимодействовать друг с другом, называется *многоагентной системой* (МАС). Многоагентным системам присуще свойство распределенности, которое классифицируется в различных категориях:

- семантическое распределение: агенты образуют кластеры или объединения, разделенные между собой разными характеристиками и правилами принятия решений.
- пространственное распределение: например, географическое распределение, вносимое в многоагентную систему для моделирования территориально распределенных систем, где у каждой территории свои свойства и своя специфика, воздействующая на агентов.
- временное распределение: например, в общем случае агенты могут рождаться и умирать в системе в произвольные моменты времени, или в соответствии с введенными в систему закономерностями,

В многоагентной системе могут реализовываться различные виды взаимодействий агентов: базовое взаимодействие, координация, ведение переговоров, рыночные механизмы и др..

Техника разработки агентной модели.

Построение агент-ориентированной модели в целом не отличается от построения любой другой модели и включает те же этапы: - сначала определение целей моделирования, далее – системный анализ моделируемой предметной области (системы), с целью определения её компонентов, их связей, соответствующих источников данных и т.д., анализ чувствительности и - проведение ряда экспериментов с различными входными параметрами.

Агент-ориентированное моделирование привносит несколько уникальных аспектов в создание имитационной модели, учитывая тот факт, что ABMS рассматривает в основном и в первую очередь системы с ракурса индивидуальных агентов, а не процессов протекающих в ней. Тем самым, в добавление к стандартным задачам любого моделирования, добавляются идентификация агентов и их поведения, идентификация взаимоотношений агентов, а также сбор

первоначальных данных об агентах. На начальном этапе необходимо определить основные абстрактные типы объектов и данных, включая:

1. Агенты: идентифицировать предполагаемые типы агентов и других объектов (классов), включая их свойства и атрибуты.
2. Окружение: идентифицировать среду, в которой будут существовать агенты и взаимодействовать друг с другом.
3. Операционные правила или алгоритмы: определить правила, изменяющие атрибуты агентов в ответ на их взаимодействие друг с другом и окружающей средой.
4. Взаимодействие: добавить методы, контролирующие кто, когда и как должен взаимодействовать.

Идентификация агентов, точное определение правил их поведения и соответствующее представление взаимодействия агентов – ключевые задачи разработки агент-ориентированной модели. Агенты есть принимающие решения лица в системе. Они могут включать в себя как традиционных лиц, принимающих решения, таких как менеджеры, так и нетрадиционных – например, сложные компьютеризированные системы со своими собственными правилами.

Исследовать поведение агентов можно различными методами. Во-первых, необходима теоретическая база для определения их поведения. Это может быть нормативная модель, в которой агенты стремятся оптимизировать что-либо, опираясь на которую возможно создание более «простой» дескриптивной эвристической модели поведения. Можно также опереться на уже имеющиеся знания о поведении агентов в этой области. Например, существуют маркетинговые исследования, связанные с описанием поведения покупателей, основывающиеся как на теоретических, так и на чисто эмпирических знаниях и наблюдениях. Для исследования психических и когнитивных аспектов социального поведения, и их влияния на процесс принятия решений индивидами проводят широкие междисциплинарные экспериментальные наблюдения. Или напротив, ряд формальных логических структур был разработан с целью обоснования поведения агентов, таких как в модели BDI (Belief-Desire-Intent), что тоже может служить в определенных случаях базисом построения агент-ориентированной модели. Инженерия знаний является не менее полезным способом, и может быть также привлечена к изучению поведения агентов на основе экспертных знаний.

Первичные данные по агентам и внешней среде собираются на микро-уровне, где они как правило, представлены в достаточном количестве в реальных системах и их базах данных.

Программная реализация агентных моделей. Агентное моделирование может быть реализовано как небольшая модель на одном компьютере, так и крупномасштабная разработка с использованием ряда вычислительных машин и специальных компьютерных технологий.

Широкомасштабные ABMS расширяют возможности агент-ориентированного моделирования, позволяя тысячам, или даже миллионам, агентам принимать участие в имитации.

Агент-ориентированное моделирование не имеет сложившегося набора стандартных функций и процедур для разработки моделей. Для представления модели может быть использован язык *UML*. *UML* – язык визуального (графического) моделирования, в том числе и объектно-ориентированных систем, поддерживает возможность не только моделировать непосредственно самих агентов системы, но и описывать внутренние связи. *UML* включает в себя ряд чётко структурированных типов диаграмм и графических элементов, призванных различными способами представить модель. Модели, построенные при помощи языка *UML*, имеют высокий уровень абстракции и независимы от языка конкретной реализации объектно-ориентированной модели.

Большинство инструментальных средств, предоставляющих возможность агентного моделирования, опираются на парадигму объектно-ориентированного программирования. Парадигма объектно-ориентированного программирования также свойственна агентному моделированию и с точки зрения использования объектом класса как шаблона, а его методов как правил поведения агента.

Последнее время стали появляться специализированные среды для многоагентного моделирования. Благодаря солидным публичным исследованиям и разработкам многие ABMS программные среды сейчас находятся в свободном доступе. Такие среды как *Repast*, *Swarm*, *NetLogo*, *Mason*, *NEW-TIES*, *SOARS*, *ArtiSoc*, *EcoLab* и *Cormas* среди прочих. К коммерческим профессиональным симуляторам, поддерживающим агентное моделирование можно отнести *AnyLogic*. В литературе [3,14] и Интернет (www.xjtek.ru) можно найти описание функциональных и инструментальных возможностей специализированного программного решения *AnyLogic*, поддерживающего агентное и другие виды имитационного моделирования. Для визуального описания поведения агентов используются диаграммы состояний (стейтчарты), являющиеся стандартным инструментом *UML*. Диаграммы состояний представляют собой ориентированные графы, узлы которых называются «состояниями», а дуги – «переходами». Стейтчарты могут описывать поведение: состояния агента и изменение состояний под воздействием событий и условий.

Вопросы для самопроверки:

1. Какие методы формализации имитационных моделей Вам известны?
2. Какие способы структуризации дискретных имитационных моделей Вам известны?
3. В чем отличие в описании параллельных процессов с помощью транзактно-ориентированного подхода и сетей Петри.

4. Какие классы объектов относят к системам массового обслуживания (СМО), определите основные элементы и процессы СМО, как объектов моделирования?
5. Модели СМО являются детерминированными или стохастическими, статичными или динамическими?
6. Является ли склад системой массового обслуживания? Обоснуйте ответ.
7. Перечислите основные характеристики эффективности функционирования СМО?
8. Опишите базовую концепцию структуризации дискретных процессно-ориентированных систем.
9. Постройте имитационную модель СМО с отказами на языке моделирования GPSS. Поясните механизмы описания и синхронизации параллельных процессов; Поясните основные случайные события, процессы, входные и выходные случайные переменные имитационной модели.
10. Поясните базовую концепцию структуризации и способы формализации моделируемых дискретных систем на основе сетевых парадигм.
11. Постройте сеть Петри для СМО с отказами. Разработайте на основе построенного графа имитационную модель на языке GPSS.
12. Дайте определение кусочно-линейного агрегата (КЛА).
13. Можно ли представить СМО в виде КЛА?
14. На примере агрегативной системы интерпретируйте основные свойства сложных систем, их структурные и динамические характеристики, основные операции системного анализа (декомпозиция, композиция).
15. Охарактеризуйте базовые идеи и парадигму моделей и методов системной динамики. Кому принадлежат эти идеи?
16. На примере производственного предприятия поясните, какие потоки и ресурсы предприятия можно представить в виде сети потоков системно-динамической модели?
17. Какие основные типы переменных применяются в моделях системной динамики, приведите их символьное обозначение на системных потоковых диаграммах модели.
18. Как переменные темпов и уровней характеризуют динамику системы?
19. Поясните механизмы действия положительной и отрицательной обратной связи с помощью ДПСС.
20. Какие из известных вам парадигм и концепций имитационного моделирования предлагают универсальный способ описания процессов, динамических систем?
21. За счет чего и как можно повысить уровень детализации моделируемых процессов в системно-динамических моделях?

22. Какие методы и технологические приемы используются при параметризации моделей системной динамики?
23. В чем состоит основное назначение информационной сети в структурной схеме моделей системной динамики?
24. Что является формальной основой моделей системной динамики.
25. Поясните возможности языка диаграмм причинно-следственных связей и потоковых диаграмм для описания общей структуры и динамики сложной системы, охарактеризуйте плюсы и минусы этих графовых представлений динамической системы.
26. Кто является автором идеи создания компьютерных моделей системной динамики и в чем ее смысл и междисциплинарное значение. Приведите аналогии в применении этих основополагающих идей среди систем различной природы. Найдите соответствия в экономических системах.
27. Охарактеризуйте содержание концепции потоковой стратификации, приведите эквивалент диаграммного представления и математического описания сети потоков.
28. На примерах (предприятия, цепи поставок, транспортной системы, банка, социально-экономической системы) приведите интерпретации концепции потоковой стратификации.
29. Какие типы переменных фигурируют в моделях системной динамики и системных потоковых диаграммах.
30. С какими формами представления системно-динамической модели имеет дело системный аналитик на разных технологических этапах разработки.
31. На примерах имитационной модели логистической или производственной системы поясните общие свойства и принципиальное отличие в процессно(-транзактно) ориентированном имитационном моделировании и моделях системной динамики, в чем состоит отличие в особенностях исследования динамических свойств и характеристик моделируемой системы.
32. Постройте многоагентную модель и системно-динамическую модель простейшей цепи поставок. Сформулируйте цели моделирования и решаемые задачи в обоих случаях. К какому уровню управления (оперативному, тактическому, стратегическому) относятся решаемые задачи, в чем состоят особенности исследования динамических свойств и характеристик моделируемой системы на основе агентной и системно-динамической модели.
33. На каких этапах разработки моделей системной динамики структурируется ментальное экспертное знание по проблеме, осуществляется формализация имитационной модели, задаются исходные данные моделирования, кем и как реализуются эти процедуры?

34. Насколько справедливо относить модели системной динамики к математическим моделям? Графическим? Численным методам?
35. Какие структурные схемы используются при создании моделей системной динамики
36. Приведите математический эквивалент основным переменным и графическим конструкциям потоковой сети.
37. Какие вычислительные методы лежат в основе задания и реализации динамических процессов в дискретных имитационных моделях и моделях системной динамики, и в чем их отличие.
38. В чем отличие в создании агентных и системно-динамических имитационных моделей.
39. Сравните уровни детализации моделируемых экономических процессов в дискретных, системно-динамических и агентных имитационных моделях (на примере модели цепи поставок).
40. Дайте определение агента и опишите его свойства.
41. Что называют многоагентной системой, какие динамические свойства системы можно обнаружить в результате взаимодействия агентов.
42. Как можно описать и задать поведение агента в имитационной модели. Как реализуется поведение множества агентов в имитационной модели.
43. Сравните движение транзактов в процессной системе и поведение агентов в многоагентной системе. В чем отличие. Как реализуется описание динамики этих объектов в системе и синхронизация относительно системного модельного времени в имитационной модели.
44. Какие элементы динамической модели предприятия можно описать с помощью агентного моделирования.
45. Какие процессы в динамической модели предприятия могут быть описаны с помощью дискретного имитационного моделирования.

Глава 3. ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Технология системного моделирования – основа целенаправленной деятельности, смысл которой в обеспечении возможности эффективного выполнения на ЭВМ исследований функционирования сложной системы. Имитационная модель – специфическое, сложное программное изделие, ее разработка должна вестись с применением высокотехнологичных систем моделирования. Действия исследователя организуются на всех этапах имитационного моделирования, начиная с изучения предметной области и выделения моделируемой проблемной ситуации и кончая построением и реализацией планов машинных экспериментов и обработкой результатов.

Технология системного моделирования объединяет современные методы и средства, используемые на всех этапах имитационного моделирования, и включает методы и способы формализации моделируемых процессов, средства программирования и испытания имитационных моделей, поддержки имитационного эксперимента. Начальные этапы имитационного моделирования трудно поддаются автоматизации. Самая большая степень автоматизации традиционно приходится на этап программирования (и частично этап эксплуатации) имитационной модели. Технология имитационного моделирования охватывает весь цикл системного моделирования, от постановки проблемы до принятия решения по результатам компьютерного эксперимента.

Освоение технологии имитационного моделирования включает ряд аспектов:

- методологический, связанный с изучением методологических основ системного моделирования и методов проведения исследований на всем цикле системного моделирования, и др.;
- математический, связанный с широким использованием в имитационном моделировании вообще, и в процедурах вычислительного эксперимента в частности, статистических методов самого различного назначения, математических методов оптимизации и принятия решения, методов искусственного интеллекта;
- технологический аспект, т.к. сегодня имитационное моделирование становится все более зрелой компьютерной технологией.

3.1. Основные этапы имитационного моделирования.

Вне зависимости от типа моделей (непрерывные или дискретные) процесс создания и использования имитационных моделей включает в себя ряд основных этапов, представленных на рисунке 3.1 и является сложным итеративным процессом:

- 1. Формулировка проблемы и определение целей имитационного исследования**
Документированным результатом на этом этапе является составленное *содержательное описание объекта моделирования*;
- 2. Разработка концептуального описания.** Результатом деятельности системного аналитика является *концептуальная модель* (или вербальное описание) и *выбор способа формализации* для заданного объекта моделирования.
- 3. Формализация имитационной модели.** Составляется *формальное описание* объекта моделирования.
- 4. Программирование имитационной модели (разработка программы-имитатора).** На этапе осуществляется выбор средств автоматизации моделирования, алгоритмизация, программирование и отладка имитационной модели.
- 5. Испытание и исследование модели, проверка модели.** Проводится верификация модели, оценка адекватности, исследование свойств имитационной модели и другие *процедуры комплексного тестирования* разработанной модели.
- 6. Планирование и проведение имитационного эксперимента.** На данном технологическом этапе осуществляется стратегическое и тактическое планирование имитационного эксперимента. Результатом является составленный и реализованный *план эксперимента*, заданные *условия имитационного прогона* для выбранного плана.
- 7. Анализ результатов моделирования.** Исследователь проводит интерпретацию результатов моделирования и их использование – собственно принятие решений.

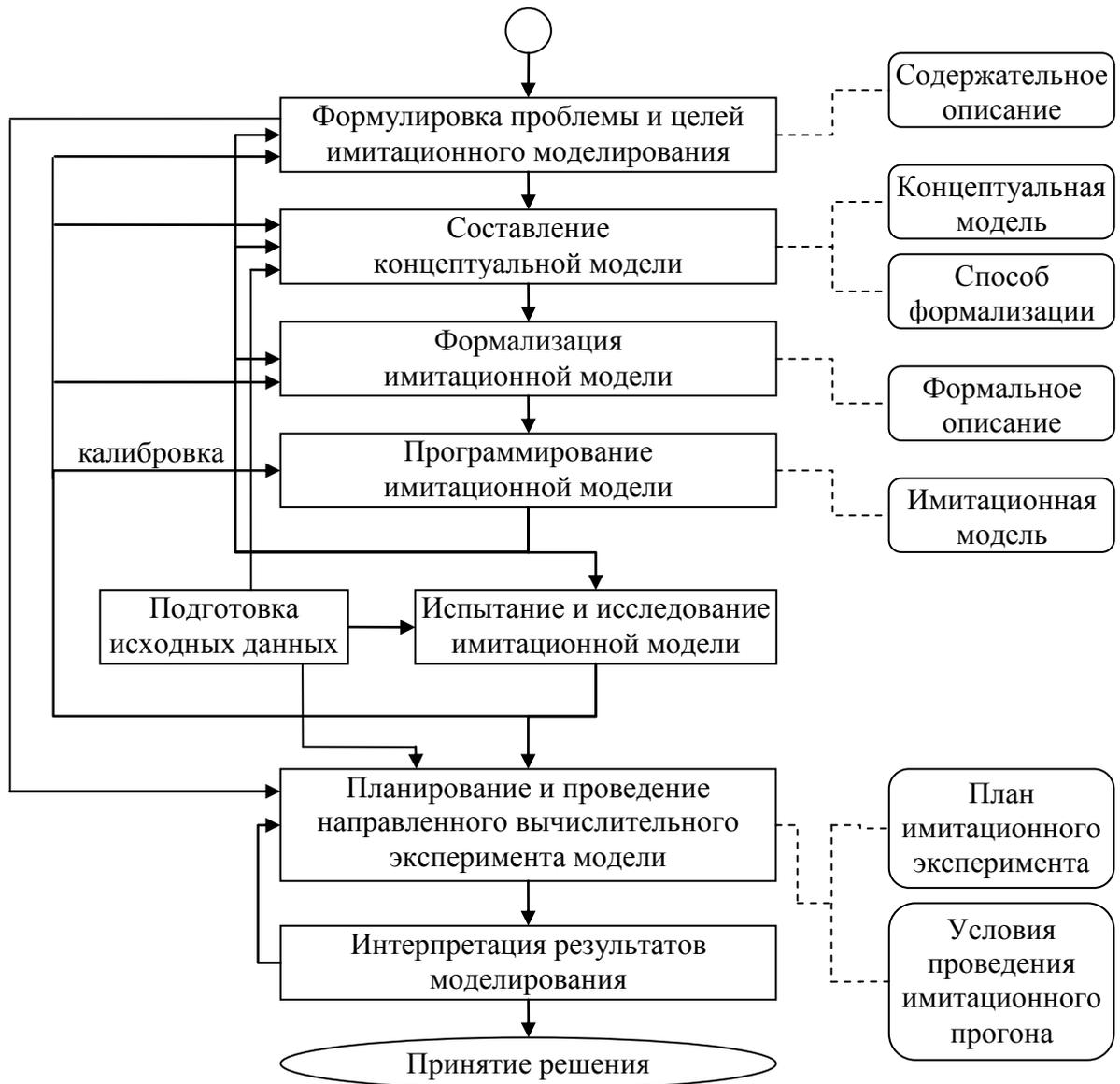


Рисунок 3.1 – Технологические этапы имитационного моделирования.

Формулировка проблемы и определение целей имитационного исследования.

На первом этапе формулируется проблема, стоящая перед исследователем и принимается решение о целесообразности применения метода имитационного моделирования. Затем определяются цели, которые должны быть достигнуты в результате имитации. От формулировки целей в значительной мере зависит выбор типа имитационной модели и характер дальнейшего имитационного исследования на имитационной модели.

На этом этапе определяется и детально изучается объект моделирования, те стороны его функционирования, которые представляют интерес для исследования. Результатом работ на данном этапе является *содержательное описание объекта моделирования* с указанием целей имитации и тех аспектов функционирования объекта моделирования, которые необходимо изучить на имитационной модели. Содержательное описание составляется в терминологии реальной системы, на языке предметной области, понятном заказчику.

В ходе составления содержательного описания объекта моделирования устанавливаются границы изучения моделируемого объекта, дается описание внешней среды, с которой он взаимодействует. Формулируются также основные критерии эффективности, по которым предполагается проводить сравнение на модели различных вариантов решений, проводится генерация и описание рассматриваемых альтернатив.

Общего рецепта составления содержательного описания не существует. Успех зависит от интуиции разработчика и знания реальной системы.

Общая технология или последовательность действий на этом этапе следующая: сбор данных об объекте моделирования и составление *содержательного описания объекта моделирования*; далее следует: изучение проблемной ситуации – определение диагноза и постановка задачи; уточнение целей моделирования; обосновывается необходимость моделирования и осуществляется выбор метода моделирования. На этом этапе четко, конкретно формулируются *цели моделирования*. Цели моделирования определяют общий замысел модели и пронизывают все последующие этапы имитационного моделирования; далее осуществляется формирование концептуальной модели исследуемого объекта.

Подробнее остановимся на основном содержании деятельности системного аналитика на этих ранних этапах. Эта работа исключительно важна для всех последующих этапов имитационного моделирования, именно здесь специалист по имитационному моделированию демонстрирует себя как системный аналитик, владеющий *искусством моделирования*. Процесс, при помощи которого аналитик, занимающийся системами, или ученый, исследующий вопросы управления, создает модель изучаемой системы, может быть лучше всего определен как интуитивное искусство. Искусством моделирования могут овладеть те, кто обладает оригинальным мышлением, изобретательностью, ровно как и глубокими знаниями систем, которые необходимо моделировать. При построении моделей мы должны полагаться на искусство, опыт, интуицию. Современный теоретический аппарат описания систем не может нам гарантировать что мы выполняем оптимальное для наших целей моделирование. Изучение конкретных образцов моделей не способствует развитию творческого подхода к созданию моделей.

Структурирование исходной проблемы. Формулирование проблемы. Прежде всего, системный аналитик должен уметь анализировать проблему. Он выполняет изучение и структурирование исходной проблемы, четкое формулирование проблемы.

Анализ проблемы необходимо начинать с детального изучения всех аспектов функционирования (здесь важно понимание деталей – поэтому надо быть специалистом в конкретной предметной области или тесно общаться с экспертами). Рассматриваемая система

связана с другими системами, поэтому с позиций системного подхода надо раскрыть клубок проблем: от исходной формулировки – расширить до проблематики. Важно правильно поставить задачи. Общая задача моделирования при этом разбивается на частные.

Основное смысловое содержание системного подхода к решению проблем демонстрируется на рисунке 3.2.

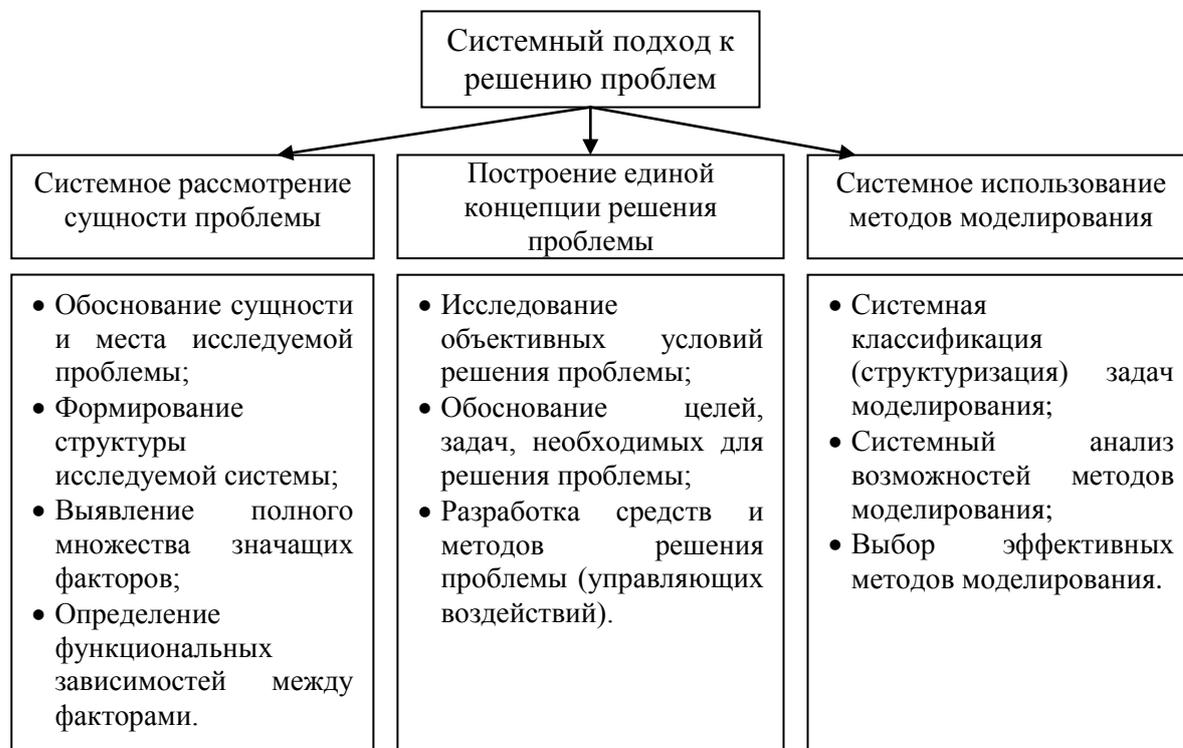


Рисунок 3.2 – Содержание системного подхода к решению проблем.

Системный подход к решению проблем предполагает:

- *Системное рассмотрение сущности проблемы:*
 - Обоснование сущности и места исследуемой проблемы;
 - Формирование общей структуры исследуемой системы;
 - Выявление полного множества значащих факторов;
 - Определение функциональных зависимостей между факторами;
- *Построение единой концепции решения проблемы:*
 - Исследование объективных условий решения проблемы;
 - Обоснование целей, задач, необходимых для решения проблемы – *структуризация целей и задач*;
 - Разработка средств и методов решения проблемы: описание альтернатив, сценариев, решающих правил и управляющих воздействий для отработки в дальнейшем на модели процедур принятия решений;
- *Системное использование методов моделирования:*
 - Системная классификация (структуризация) задач моделирования;

- Системный анализ возможностей методов моделирования;
- Выбор эффективных методов моделирования.

Выявление целей. Первый и самый важный шаг при создании любой модели состоит в определении ее целевого назначения. Цели – антиподы проблемы. Может быть применен метод декомпозиции целей, предполагающий разделение целого на части: целей - на подцели, задач – на подзадачи...и т.д. – на практике этот подход приводит к иерархическим древовидным структурам (построению дерева целей). Вся эта процедура является уделом экспертов и специалистов по проблеме. Поэтому здесь присутствует субъективный фактор, каждый эксперт сделает по-своему. Практическая задача состоит в том, чтобы достаточно полно структурировать проблемную ситуацию. (Построенное в результате этой процедуры дерево целей может в дальнейшем оказаться полезным при формировании множества критериев).

Какие подводные камни поджидают начинающего системного аналитика? То, что для одного уровня цель – для другого средство, часто их путают, происходит смешение целей. Цель – есть описание желаемого будущего, поэтому здесь легко ошибиться. Для сложной системы с большим количеством подсистем цели могут быть противоречивыми. Цель редко бывает единственной: существует опасность неверного ранжирования при множестве целей.

Сформулированные и структурированные на первом этапе цели моделирования пронизывают весь ход дальнейшего имитационного исследования.

Рассмотрим наиболее употребимые *категории целей* в имитационном исследовании: [48] *оценка, прогнозирование, оптимизация, сравнение альтернатив* и др.

Эксперименты по моделированию проводятся с весьма разнообразными целями, в числе которых могут быть:

- *Оценка* – определение, насколько хорошо система предлагаемой структуры будет соответствовать некоторым конкретным критериям,
- *Сравнение альтернатив* – сопоставление конкурирующих систем, рассчитанных на выполнение определенной функции, или же на сопоставление нескольких предлагаемых рабочих принципов или методик,
- *Прогноз* – оценка поведения системы при некотором предполагаемом сочетании рабочих условий,
- *Анализ чувствительности* – выявление из большого числа действующих факторов тех, которые в наибольшей степени влияют на общее поведение системы,
- *Выявление функциональных соотношений* – определение природы зависимости между двумя или несколькими действующими факторами, с одной стороны, и откликом системы с другой,

- *Оптимизация* – точное определение такого сочетания действующих факторов и их величин, при котором обеспечивается наилучший отклик всей системы в целом.

Формирование критериев. Исключительно важно четкое и однозначное определение критериев. Это влияет на процесс создания и экспериментирования модели, кроме того неправильное определение критерия ведет к неправильным выводам. Различают критерии, с помощью которых оценивается степень достижения цели системой, и критерии по которым оценивается способ движения к цели (или эффективность средства достижения целей). Для многокритериальных моделируемых систем формируется набор критериев, их необходимо структурировать по подсистемам или ранжировать по важности.

Разработка концептуальной модели объекта моделирования.

Концептуальная модель – есть логико-математическое описание моделируемой системы в соответствии с формулировкой проблемы. Основное содержание этого этапа – формулировка общего замысла модели, переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования (схематично общее содержание этого технологического перехода демонстрируется на рисунке 3.3). Здесь приводится описание объекта в терминах математических понятий и алгоритмизация функционирования ее компонент. Концептуальное описание представляет собой упрощенное алгоритмическое отображение реальной системы.

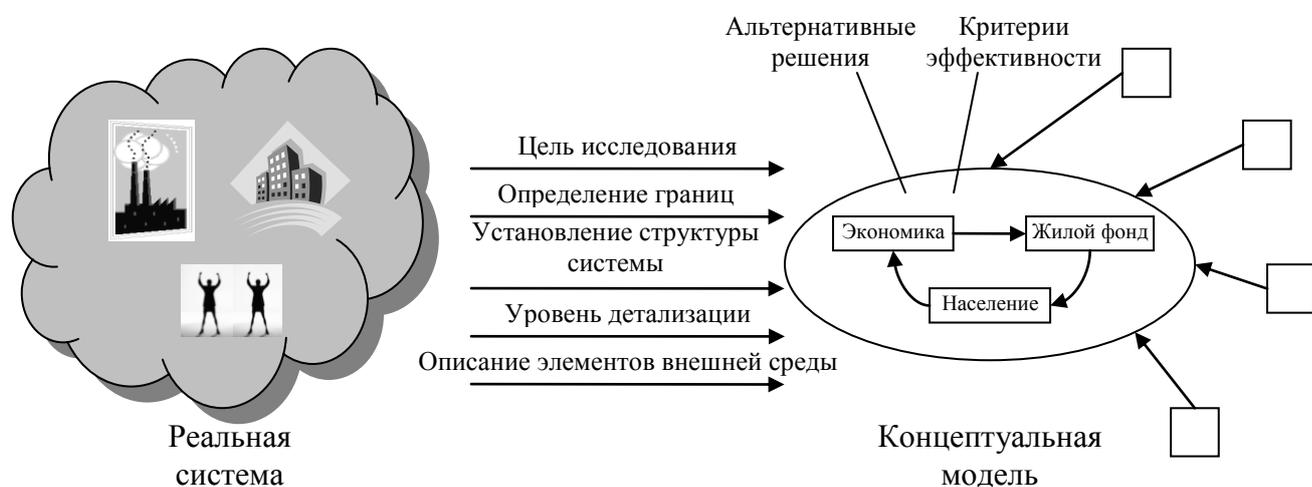


Рисунок 3.3 – Переход от реальной системы к логической схеме её функционирования.

При разработке концептуальной модели осуществляется установление *основной структуры модели*, которое включает *статическое и динамическое описание системы*. Определяются границы системы, приводится описание внешней среды, выделяются существенные элементы и дается их описание, формируются переменные, параметры, функциональные зависимости как для отдельных элементов и процессов, так и для всей системы, ограничения, целевые функции (критерии).

Результат работы на этом этапе – документированное концептуальное описание плюс выбранный способ формализации моделируемой системы. При создании небольших моделей этап совмещается с этапом составления содержательного описания моделируемой системы. На этом этапе уточняется также методика всего имитационного эксперимента.

Построение концептуальной модели начинается с того, что на основе цели моделирования устанавливаются границы моделируемой системы, определяются воздействия внешней среды. Выдвигаются гипотезы и фиксируются все допущения (предположения), необходимые для построения имитационной модели. Обсуждается уровень детализации моделируемых процессов.

Система есть совокупность взаимосвязанных элементов. Определение системы всегда субъективно, зависит от цели моделирования, и от того, кто именно определяет систему. На этом этапе осуществляется *декомпозиция системы*. Определяются наиболее существенные в смысле сформулированной проблемы элементы системы (выполняется *структурный анализ* моделируемой системы) и взаимодействия между ними, выявляются основные аспекты функционирования моделируемой систем (составляется *функциональная модель*), приводится описание внешней среды. Декомпозиция системы (объекта моделирования) или выделение подсистем – есть операция *анализа*. Элементы имитационной модели должны соответствовать реально- существующим фрагментам в системе. Сложная система разбивается на части, сохраняя при этом связи, обеспечивающие взаимодействие. Можно составить функциональную схему, которая прояснит специфику динамических процессов, происходящих в рассматриваемой системе. Важно определить, какие компоненты будут включены в модель, какие будут вынесены во внешнюю среду, и какие взаимосвязи будут установлены между ними.

Описание внешней среды выполняется по тем соображениям, что элементы внешней среды оказывают определенное влияние на элементы системы, однако влияние самой системы на них, как правило, незначительно.

При обсуждении уровня детализации модели важно понимать, что в основании всякой декомпозиции лежат два противоречивых принципа: *полнота и простота*. Обычно на начальных этапах составления модели наблюдается тенденция к учету чрезмерно большого числа компонентов и переменных. Однако хорошая модель – простая, ведь известно, что степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании. Модель, перегруженная деталями, может стать сложной и трудно реализуемой.

Компромисс между этими двумя полюсами, состоит в том, что в модель включаются только *существенные* (или *релевантные*) компоненты, - существенные по отношению к цели анализа. Выбор в этом тонком деле опять за экспертом.

Итак, сначала должна присутствовать «элементарность» – составляется самое простое дерево целей, упрощенная структура модели. Далее осуществляется постепенная детализация моделей. Надо стремиться делать простые модели, затем их усложнять. Необходимо следовать *принципу итеративного построения модели*, когда по мере изучения системы по модели, в ходе разработки, модель изменяется путем добавления новых или исключения некоторых ее элементов и/или взаимосвязей между ними.

Как же все-таки перейти от реальной системы к ее упрощенному описанию? *Упрощение, абстракция* - основные приемы любого моделирования. Выбранный уровень детализации должен позволять абстрагироваться от неточно определенных из-за недостатка информации аспектов функционирования реальной системы.

Под *упрощением* понимается пренебрежение несущественными деталями или принятие предположений о более простых соотношениях (например, предположение о линейной зависимости между переменными). При моделировании выдвигаются гипотезы, предположения, относящиеся к взаимосвязи между компонентами и переменными системы.

Другим аспектом анализа реальной системы является абстракция. *Абстракция* содержит или сосредотачивает в себе существенные качества поведения объекта, но не обязательно в той же форме и столь детально, как это имеет место в реальной системе.

После того как проанализированы и промоделированы части или элементы системы, мы приступаем к их объединению в единое целое. В концептуальной модели должно быть корректно отражено их взаимодействие. *Композиция* есть операция *синтеза*, агрегирование (при системном моделировании это не просто сборка компонентов). В ходе этой операции выполняется установление отношений между элементами (например, уточняется структура, приводится описание отношений, упорядочение и др.)

Системное исследование построено на сочетание операций анализа и синтеза. На практике реализуются итеративные процедуры анализа и синтеза. Лишь после этого мы можем пытаться объяснить целое - систему, через его составляющие- подсистемы, в виде общей структуры целого.

Критерии эффективности. Параметры, переменные модели. В описание системы должны быть включены критерии эффективности функционирования системы и оцениваемые альтернативные решения, последние могут рассматриваться как управляющие или сценарные параметры модели. При алгоритмизации моделируемых процессов уточняются также основные переменные модели, участвующие в ее описании.

Каждая модель представляет собой некоторую комбинацию таких составляющих, как *компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции (критерии)*. Приведем некоторые полезные в дальнейшем определения согласно [48].

Под *компонентами* понимают составные части, которые при соответствующем объединении образуют систему. Иногда компонентами считают также *элементы* системы или ее *подсистемы*. Система определяется как группа или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия или взаимозависимости для выполнения заданной функции. Изучаемая система состоит из компонент.

Параметрами являются величины, которые исследователь может выбирать произвольно, в отличие от *переменных* модели, которые могут принимать только значения, определяемые видом данной функции. В модели будем различать переменные двух видов: *экзогенные* и *эндогенные*. Экзогенные переменные называются также *входными*. Это означает, что они порождаются вне системы или являются результатом взаимодействия внешних причин. Эндогенными переменными называются переменные, возникающие в системе в результате воздействия внутренних причин. В тех случаях, когда эндогенные переменные характеризуют состояние или условия, имеющие место в системе, назовем их *переменными состояниями*. Когда же необходимо описать входы и выходы системы, мы имеем дело с *входными и выходными переменными*.

Функциональные зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компоненты или же выражают соотношения между компонентами системы. Эти соотношения по природе являются либо детерминистскими, либо стохастическими.

Ограничения представляют собой устанавливаемые пределы изменения значений переменных или ограничивающие условия их изменений. Они могут вводиться либо разработчиком, либо устанавливаться самой системой вследствие присущих ей свойств.

Целевая функция (функция критерия) представляет собой точное отображение целей или задач системы и необходимых правил оценки их выполнения. Выражение для целевой функции должно быть однозначным определением целей и задач, с которыми должны соизмеряться принимаемые решения.

Формализация и программирование имитационной модели.

На третьем этапе имитационного исследования осуществляется формализация объекта моделирования. Процесс формализации сложной системы включает выбор способа формализации и составление формального описания системы.

В процессе построения модели можно выделить 3 уровня ее представления:

- неформализованный (этап 2) – *концептуальная модель*;
- формализованный (этап 3) – *формальная модель*;
- программный (этап 4) – *имитационная модель*.

Каждый уровень отличается от предыдущего степенью детализации моделируемой системы и способами описания ее структуры и процесса функционирования. При этом уровень абстрагирования возрастает.

Концептуальная модель – это систематизированное содержательное описание моделируемой системы (или проблемной ситуации) на неформальном языке. Неформализованное описание разрабатываемой имитационной модели включает определение основных элементов моделируемой системы, их характеристики и взаимодействия между элементами на собственном языке, могут использоваться таблицы, графики, диаграммы и т.д. Неформализованное описание модели необходимо как самим разработчикам (при проверке адекватности модели, ее модификации и т.д.), так и для взаимопонимания со специалистами других профилей.

Концептуальная модель содержит исходную информацию для системного аналитика, выполняющего формализацию системы и использующего для этого определенную методологию и технологию, т.е. на основании неформализованного описания осуществляется разработка более строгого и подробного формализованного описания.

Далее формализованное описание преобразуется в программу-имитатор также в соответствии с некоторой методикой (технологией программирования).

Аналогичная схема, кстати, имеет место и при выполнении имитационных экспериментов: - содержательная постановка отображается на формальную модель, после чего вносятся необходимые изменения и дополнения в методику направленного вычислительного эксперимента.

Основная задача этапа формализации – дать формальное описание сложной системы, свободное от второстепенной информации, имеющейся в концептуальном описании. Формальное представление логико-математической модели позволяет отразить алгоритмы поведения компонент сложной системы и вопросы взаимодействия между собой этих компонент.

Может оказаться, что информации, имеющейся в концептуальном описании недостаточно для формализации объекта моделирования. В этом случае – необходимо вернуться к этапу составления содержательного описания и дополнить его данными, необходимость в которых обнаруживается при формализации объекта моделирования. На практике таких возвратов может быть несколько.

Формализация полезна в определенных пределах и для простых моделей неоправданна.

Наблюдается существенное разнообразие формальных схем и концепций структуризации (алгоритмических моделей), нашедших применение в имитационном моделировании. Схемы формализации ориентируются на различные математические теории и исходят из разных представлений об изучаемых процессах – отсюда их многообразие – отсюда проблема выбора подходящей (для описания данного объекта моделирования) схемы формализации.

Наиболее известные и широко используемые на практике концепции формализации: агрегативные системы и автоматы; сети Петри и их расширения; методы и конечно-разностные уравнения системной динамики, которые широко используются в практике анализа и описания динамики сложных систем и построения имитационных моделей (см. главу 2).

Концепция структуризации (схема представления алгоритмических моделей) более или менее явно лежит в основе всех языков и систем моделирования и поддерживается специально разработанными приемами и технологией программирования. Это упрощает построение и программирование имитационной модели. Например, язык моделирования GPSS, имеет блочную концепцию структуризации, структура моделируемого процесса изображается в виде потока транзактов, проходящего через обслуживающие устройства, очереди и другие элементы систем массового обслуживания. В рамках одной формальной схемы могут быть реализованы разнообразные алгоритмические модели.

Формализация модели может выполняться как вне системы моделирования, так и средствами системы моделирования. В ряде современных систем моделирования, наряду с аппаратом, поддерживающим ту или иную концепцию структуризации, имеются специальные средства, обеспечивающие применение в системе определенной концепции формализации.

Программирование имитационной модели.

Концептуальное или формальное описание модели сложной системы преобразуется в программу-имитатор в соответствии с некоторой методикой и техникой программирования, с применением языков и систем моделирования. Технологическое содержание этого этапа подробно рассматривается в практическом курсе. Важным моментом здесь является корректный выбор инструментального средства для реализации имитационной модели. Назначение и классификации языков и систем моделирования, инструментальные и технологические возможности современных систем моделирования рассматривается в следующем параграфе.

Сбор и анализ исходных данных.

Не всегда этот этап выделяется как самостоятельный, однако выполняемая на этом этапе работа исключительно важна, трудоемка. Если программирование и трассировку имитационной модели можно выполнять на гипотетических данных, то предстоящее экспериментальное исследование необходимо выполнять на реальном потоке данных. От этого зависит во многом точность получаемых результатов моделирования.

Здесь перед разработчиком имитационной модели встают два вопроса:

- где и каким образом получить, собрать исходную информацию;
- как обработать собранные данные о реальной системе.

Основные методы получения исходных данных:

- из существующей документации на систему (это могут быть данные официальных и других отчетов, статистические сборники, – например, для социально-экономических систем, финансовая и техническая документация – для производственных систем и др.);
- физическое экспериментирование. Часто для задания исходной информации необходимо провести натурные эксперимент на моделируемой системе или ее прототипах (порой это бывают дорогостоящие эксперименты, - однако это плата за то, чтобы получить точную модель, на которой можно в дальнейшем проводить испытания). Такой подход применим для космических, военных исследований, в авиации. В более простых случаях можно проводить измерения, например хронометраж при выполнении производственных операций;
- предварительный, априорный синтез данных. Иногда исходные данные могут не существовать, и сама природа моделируемой системы исключает возможность физического экспериментирования (например, проектируемые системы, прогнозирование в социальных и политических исследованиях). В этом случае предлагают различные приемы предварительного синтеза данных. Например, при моделировании информационных систем, продолжительность выполнения информационного требования оценивается на основании трудоемкости реализуемых на ЭВМ алгоритмов. К этим методам относят различные процедуры, основанные на общем анализе проблематики, анкетировании, интервьюировании, широком применении методов экспертного оценивания.

Второй вопрос связан с проблемой *идентификации входных данных* для моделируемых стохастических систем. Мы уже говорили о том, что имитационное моделирование является эффективным аппаратом исследования стохастических систем, т.е. таких систем, динамика которых зависит от случайных факторов. Входные (и выходные) переменные стохастической модели, как правило, - случайные величины, векторы, функции, случайные процессы. Поэтому возникают дополнительные трудности, связанные с синтезом уравнений относительно неизвестных законов распределения и определением вероятностных характеристик (средних значений, дисперсий, корреляционных функций и т.п.) для анализируемых процессов и их параметров. Необходимость статистического анализа при сборе и анализе входных данных связана с задачами определения вида функциональных зависимостей, описывающих входные данные модели, оценкой конкретных значений параметров этих зависимостей, а также проверкой значимости параметров. Для подбора теоретических распределений случайных величин применяют известные методы математической статистики, основанные на определении параметров эмпирических распределений и проверке статистических гипотез, с использованием критериев согласия, о том, согласуются ли имеющиеся эмпирические данные с известными законами распределения (на статистически приемлемом доверительном уровне). Конечно, на вход модели можно подавать и сырые эмпирические данные, однако это неэффективно как с точки

зрения программной реализации, так и с точки зрения моделирования, руководствуясь желанием получить более общие и полезные результаты на выходе имитационной модели.

Испытание и исследование свойств имитационной модели.

После того, как имитационная модель реализована на ЭВМ, необходимо провести испытание, проверку достоверности модели. Это является чрезвычайно важным и ответственным моментом в имитационном моделировании. Проверка, выполненная не тщательно, может привести к неизвестным последствиям.

На этапе испытания и исследования разработанной имитационной модели организуется комплексное *тестирование модели (testing) - планируемый итеративный процесс, направленный главным образом на поддержку процедур верификации и валидации имитационных моделей и данных.*

Некоторые полезные методики тестирования и оценки достоверности можно найти в настоящем пособии и специальной литературе [13, 50, 52-54, 58].

Если в результате проведенных процедур модель окажется недостаточно достоверной, может быть выполнена *калибровка имитационной модели* (в моделирующий алгоритм встраиваются калибровочные коэффициенты) с целью обеспечения адекватности модели, или в более сложных случаях возможны многочисленные итерации на ранние этапы с целью получения дополнительной информации о моделируемом объекте и доработки имитационной модели. Наличие ошибок во взаимодействии компонент модели возвращает исследователя к этапу создания имитационной модели. Возможно, в ходе формализации исследователь слишком упростил физические явления и процессы, исключил из рассмотрения ряд важных сторон функционирования системы, что привело к неадекватности модели объекту. В этом случае исследователь должен вернуться к этапу формализации системы. В тех случаях, когда выбор способа формализации оказался неудачным, исследователю необходимо повторить этап составления концептуальной модели с учетом новой информации и появившегося опыта. Наконец, когда у исследователя оказалось недостаточно информации об объекте, он должен вернуться к этапу составления содержательного описания системы и уточнить его с учетом результатов испытания.

Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели. Анализ результатов моделирования и принятие решений.

В первой главе мы уделили внимание рассмотрению экспериментальной природы имитации, дали общее определение направленного вычислительного эксперимента. Вы уже знаете, что на заключительных этапах имитационного моделирования необходимо проводить стратегическое и тактическое планирование имитационного эксперимента. Организация направленного

вычислительного эксперимента на имитационной модели предполагает выбор и применение различных аналитических методов для проведения и обработки результатов имитационного исследования. Наиболее употребимыми для целей вычислительного эксперимента аналитическими методами являются методы планирования вычислительного эксперимента, регрессионный и дисперсионный анализ, градиентные и другие методы оптимизации, о применении которых речь пойдет ниже. Очевидно, что организация и проведение эксперимента потребует от Вас серьезной аналитической подготовки и корректного применения аналитических методов. В более масштабных исследованиях организуются сценарные исследования на разработанной имитационной модели. Проведенное исследование должно позволить Вам сделать некоторые выводы по полученным результатам, достаточные для принятия решений по обозначенным на ранних этапах проблемам и задачам.

Теперь Вы представляете, что процесс имитационного исследования является трудоемким итеративным процессом, требующим от разработчиков таких моделей определенных интеллектуальных затрат и технологических усилий. Разработчик имитационной модели должен быть и искусным системным аналитиком, и мастером-технологом, владеющим современными компьютерными технологиями, применяемыми при создании и исследовании имитационных моделей, обладать хорошей аналитической подготовкой, позволяющей корректно применять методы математической статистики и другие математические и вычислительные процедуры, как для целей идентификации имитационных моделей, так и обработки результатов экспериментального исследования.

3.2. Инструментальные средства автоматизации моделирования

Назначение языков и систем моделирования.

В процессе построения имитационной модели мы выделяли три уровня ее представления: *концептуальную модель, формализованное* или алгоритмическое описание, *программу-имитатор*.

Формальное или концептуальное описание модели преобразуется в программу-имитатор в соответствии с технологией программирования. В принципе, имитационную модель можно реализовать на любом универсальном языке моделирования. Однако для облегчения написания и работы с программой-имитатором созданы специальные системы автоматизации моделирования.

Языки и системы моделирования упрощают построение программ-имитаторов и проведение имитационных экспериментов за счет частичной или полной автоматизации переходов от одного уровня представления модели к другому. В этом состоит *основное назначение языков моделирования* и преимущество перед универсальными алгоритмическими языками.

Общепризнанными являются следующие *преимущества языков и систем моделирования* по сравнению с универсальными языками и системами программирования:

- **Концептуальная выразительность.** Языки моделирования обеспечивают более строгое следование выбранной концепции построения модели.

Язык моделирования содержит абстрактные конструкции, непосредственно отражающие понятия, в которых представлена формализованная модель, или близкие концептуальному уровню описания моделируемой системы, с помощью которых четко классифицируют элементы моделируемой системы, элементы различных классов различают по характеристикам и свойствам, описываются связи между элементами системы и внешней среды, позволяющие изменять структуру модели.

Это упрощает разработку программы-имитатора, позволяет автоматизировать выявление, диагностику ошибок в программах;

- **Автоматизация стандартных функций моделирования:**

- реализация механизма модельного времени - системы моделирования имеют встроенный *механизм продвижения модельного времени* (календарь событий, методы интегрирования и др.), средства разрешения временных узлов;
- языки моделирования, как правило, содержат встроенные датчики случайных чисел, *генераторы случайных чисел* и других типовых воздействий;

- в языках моделирования автоматизирован сбор стандартной статистики и других результатов моделирования. Имеются средства автоматизации выдачи этих результатов в табличной или графической форме;
- управление процессом моделирования (анализ ошибочных ситуаций, пошаговая трассировка и т.д.)
- языки моделирования имеют средства, упрощающие процедуры проведения и программирование имитационных экспериментов и другие инструментальные возможности, используемые при проведении имитационных исследований;
- и др.

Вместе с тем нередко отмечают такие недостатки языков и систем моделирования, как недостаточная распространенность языков и систем моделирования, необходимость дополнительного обучения языкам и системам моделирования и, как следствие, недостаток программистов, хорошо владеющих современными языками и системами моделирования; высокая стоимость систем моделирования; отсутствие гибкости и широких возможностей, присущих универсальным языкам программирования.

Множество языков моделирования можно разделить на две группы:

- методо-ориентированные языки моделирования, поддерживающие определенный класс формализованных или алгоритмических описаний;

- проблемно-ориентированные языки моделирования - языки моделирования конечного пользователя, позволяющие формулировать задачи моделирования непосредственно на концептуальном уровне. Связь с пользователем в такой системе моделирования на уровне программного интерфейса осуществляется через набор понятий соответствующей предметной области исследований. Для этого в проблемно-ориентированные системы моделирования включаются абстрактные элементы, языковые конструкции и наборы понятий, взятые непосредственно из предметной области исследований. Примерами таких решений могут служить системы моделирования в таких областях как имитационное моделирование производственных систем, сетей связи и телекоммуникаций, моделирование процессов модернизации и обслуживания, пакеты имитационного моделирования для центров обработки заказов и медицинских учреждений, транспортных систем, например

- управление материальными потоками в производственной системе (*Simulap, Simflex*), моделирование гибких производственных систем (*MAST*), технологическая подготовка производственных систем (*TOMAS*) и календарное планирование производственных процессов (*SIRE*);
- телекоммуникации (*COMNET*);

– медицинское обслуживание (*MedModel*).

За годы становления технологии имитационного моделирования наблюдалось большое разнообразие специализированных языков моделирования. В известном в 80-е годы обзоре Киндлера [17] упоминалось более 500 языков и систем моделирования. Рост числа языков моделирования обусловлен многообразием моделируемых процессов в реальном мире и свидетельствует о необходимости применения средств компьютерного моделирования. Вместе с тем *разнообразие языков моделирования обусловлено* следующими факторами: существует большое число схем формализации и алгоритмизации моделируемых систем: агрегаты, сети, автоматы, процессы, системы массового обслуживания, дифференциальные уравнения, аналоговые блок-схемы, графы связей и др. Любая из этих схем может служить основой для разработки нового языка моделирования. Еще большее разнообразие возможно на уровне концептуальных моделей. Все это - существенный стимул для появления новых языков, несмотря на то, что в академической сфере продолжают поиски универсального языка описания процессов и динамических систем.

Далее рассматриваются только методо-ориентированные языки и системы, которые для краткости называются просто языками и системами моделирования.

Язык моделирования представляется пользователем как часть системы моделирования. *Система моделирования* - это совокупность языковых и программных средств, которая включает:

- собственно язык моделирования;
- язык управления системой моделирования – язык команд интерактивного взаимодействия с пользователем;
- управляющая программа – программные средства, обеспечивающие трансляцию модели и другие стандартные функции системы моделирования (продвижение модельного времени, генерацию случайных чисел, сбор статистической информации, вывод результатов и т. д.).

Проблемно-ориентированные системы моделирования включают также *средства разработки языков конечного пользователя*.

Среди большого числа языков моделирования довольно сложно выделить какое-то базовое подмножество языков, покрывающих основные потребности пользователей в средствах автоматизации моделирования. На практике существует проблема выбора системы моделирования, подходящей для поставленной задачи.

Выбор системы моделирования. При выборе системы и языка моделирования необходимо учитывать ряд факторов, определяющих выбор системы моделирования, подходящей для Вашего исследования, среди которых:

- *Область применения моделей.* Необходимо прежде всего учитывать требования к моделям со стороны заказчика, определяемые условиями ее эксплуатации. Многое зависит от

того, в контур каких информационных систем и проектов должна интегрироваться модель: СППР, САПР и т.п. Важным фактором при выполнении комплексных проектов по моделированию является совместимость аппаратно-программных платформ.

- *Пригодность языка моделирования для описания объекта моделирования.* Уточните, насколько пригодно мировоззрение языка моделирования для описания объекта моделирования, насколько подходит способ описания динамических процессов, схема формализации, принятая в языке моделирования для идентификации реальных процессов, подлежащих моделированию.

Ваши рассуждения должны строиться примерно следующим образом: если в рассматриваемой системе можно выделить агрегированное множество материальных объектов, представить их в виде непрерывных информационных потоков, то скорее всего Ваш выбор будет за непрерывной системой моделирования, поддерживающей методы системной динамики. А если в моделируемой динамической системе наблюдается дискретный характер изменений, перемещаются единичные объекты и эти изменения проходят неравномерно, связаны с появлением событий – выбор, очевидно за системой дискретного типа. Если материальные объекты движутся в сетях, система характеризуется большим числом взаимодействующих процессов – надо выбирать процессно-ориентированные системы моделирования. Если активные объекты не движутся по траекториям, ведут себя независимо, асинхронно, возможно их поведение можно описать с помощью техники агентного моделирования.

- *Прагматические соображения,* такие как, наличие или отсутствие опыта работы с данной системой моделирования, и возможности для обучения, технологические возможности системы моделирования, отвечающие требованиям реализации настоящего проекта по моделированию и многие другие соображения. Безусловно важной, но внешней по отношению к системе моделирования характеристикой является качество сопровождения системы моделирования, наличие четкой и полной документации, желательно на русском языке.

Классификация языков и систем моделирования. Технологические возможности современных систем моделирования.

Классификация языков и систем моделирования позволяет упорядочить сведения о существующих многочисленных языках моделирования, анализ основных характеристик позволяет составить достаточно полное представление о языке и поддерживающей его системе моделирования.

В основу классификации положим следующие общепризнанные характеристики языков и систем моделирования:

- *Класс моделируемых систем;*

- Средства описания моделируемых систем;
- Инструментально-технологические возможности систем моделирования.

Принято выделять три класса моделируемых объектов: дискретные, непрерывные, дискретно-непрерывные (комбинированные). Соответственно различают три класса языков и систем моделирования. Языки комбинированного моделирования используются при работе с моделями объектов и непрерывного, и дискретного класса. Примерами классических языков и систем непрерывного типа являются: *DYNAMO*, *Vensim* и др., поддерживающие методы системной динамики. Широко известные в свое время языки непрерывно-дискретного моделирования: - *GASP*, *SLAM*, языки дискретного моделирования: *SIMULA*, *GPSS*, *SLX*, и системы моделирования : *Arena*, *Extend* и др.

Средства описания моделируемых систем включают базовую и альтернативные для языка или системы моделирования схемы алгоритмизации; собственно язык моделирования и его синтаксическая основа; средства проблемной ориентации, представленные в языке или системе моделирования.

Под базовой схемой алгоритмизации подразумевается совокупность понятий, которые используются для алгоритмизации (формализации) моделируемой системы и непосредственно представлены в языке моделирования. В настоящее время используется большое число различных способов алгоритмизации. В языках непрерывного моделирования широко применяются системы дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, структурные схемы, потоковые диаграммы моделей системной динамики. Среди дискретного моделирования различают: языки событий, языки процессов и транзактов, языки, основанные на автоматных и сетевых представлениях, и др. Языки комбинированного моделирования могут основываться на агрегатах и других формальных схемах, использовать смешанные схемы алгоритмизации языков непрерывного и дискретного моделирования. Базовая схема алгоритмизации предполагает определенную организацию работы управляющей системы моделирования.

В качестве доминирующих базовых концепций формализации и структуризации в современных системах моделирования используются:

- для дискретного моделирования – системы, основанные на описании процессов (process description) или на сетевых концептах (network paradigms), Наиболее яркими представителями систем этого класса являются коммерческие симуляторы *Extend*, *Arena*, *ProModel*, *Witness*, *eM-Plant*, *QUEST*, *Taylor Enterprise Dynamics*, *Gpss/H-Proof*, и др.;
- для систем, ориентированных на непрерывное моделирование – модели и методы системной динамики, - *Powersim*, *Vensim*, *Dynamo*, *Stella*, *Ithink* и др..

Кроме базовой схемы алгоритмизации в систему моделирования могут быть включены

альтернативные схемы, близкие к базовой, либо приводимые к ней. Например, язык структурных схем можно использовать для моделирования систем дифференциальных уравнений, дискретные сети можно моделировать на языке транзактов или процессов. Как правило, в современных системах, с целью расширения их функциональности присутствуют альтернативные концепции формализации. Так, например, в системах *Powersim*, *Ithink* встроен аппарат дискретного моделирования, и, наоборот, в системах *Extend*, *ProModel* реализована поддержка, правда, довольно слабая, непрерывного моделирования. Таким образом, один и тот же язык или система моделирования может применять для реализации различные способы алгоритмизации моделей.

Актуальной задачей сегодня является разработка систем моделирования, интегрирующих различные подходы в имитационном моделировании. Примером является система моделирования *AnyLogic*, совмещающая различные подходы в описании динамических процессов: транзактно-ориентированный способ описания дискретных систем, динамическое моделирование, потоковые диаграммы и разностные уравнения системной динамики, диаграммы состояний универсального языка моделирования *UML* и агентный подход в моделировании.

Средства описания моделируемых процессов могут быть представлены в системе моделирования языками моделирования, специальными графическими интерфейсами и нотациями, специализированными библиотеками решений. Различают языки моделирования: вложенные в базовый язык программирования (моделирования) или расширяющие его, а также с собственным синтаксисом. Классическим языком с собственным синтаксисом является язык моделирования GPSS. Универсальным языком имитационного моделирования, поддерживающим принципы объектно-ориентированного программирования, является язык *SIMULA* (*SIMUL8*). Язык *SIMULA* в историческом плане был первым объектно-ориентированным языком программирования.

Наличие *средств проблемной ориентации* в языке моделирования позволяет разрабатывать языки конечных пользователей, вводить макропонятия для упрощения программирования. Средства проблемной ориентации могут быть реализованы различными способами. Весьма распространенный способ - использование макросов или создание специализированной библиотеки решений. В универсальном языке моделирования *SIMULA* для проблемной ориентации языка служат классы. В процедурно-ориентированных языках могут использоваться подпрограммы или процедуры.

Далее рассмотрим группу характеристик, определяющих *инструментально-технологические возможности систем моделирования*.

Технологические возможности систем моделирования.

Опыт эксплуатации различных систем моделирования показывает, что инструментальные возможности системы моделирования определяется наличием средств, поддерживающих

реализацию следующих основных функций:

- Подготовка, редактирование и модификация в ходе трассировки программы-имитатора и основных модельных характеристик;
- Интерактивное взаимодействие системы с исследователем в процессе имитации;
- Управление направленным вычислительным экспериментом на имитационной модели.

Для поддержки этих функций в системе моделирования, как правило, представлены инструменты:

- поддержки создания формализованных описаний;
- построение модели с помощью программирования и применения графических интерфейсов (icon or drag-and-drop);
- средства визуализации и редактирования программы и модельных характеристик в реальном времени (по ходу имитации) и по окончании прогона;
- средства трансляции, компилирования программы-имитатора;
- средства диагностики, выдача диагностических сообщений в процессе составления модели и по ходу имитации;
- трассировка (пошаговая отладка, верификация программы) в реальном времени, по ходу имитации, ручная имитация;
- средства сбора и выдачи результатов моделирования, возможность управления ими. Присутствуют как стандартные формы вывода выходной статистики, так и средства для создания нестандартных форм представления результатов моделирования, осуществляется выдача стандартной и формируемой пользователем выходной статистики. (Как правило, все системы моделирования имеют стандартные средства сбора и вывода результатов моделирования в табличной или графической форме. Эти средства не всегда достаточно гибки и не во всех случаях удовлетворяют пользователя. Поэтому должна быть предусмотрена возможность подключения нестандартных средств обработки и вывода результатов моделирования, разработанных пользователем);
- передача выходных данных в другие среды (в том числе в базы данных);
- средства для анализа входных данных (Input Analyzer и др.);
- средства для реализации арифметических, математических, логических функций, расширяющие алгоритмические возможности языка моделирования;
- интерактивные средства взаимодействия с пользователем, удобный графический интерфейс, возможность доступа пользователя к модельным характеристикам, к графикам, таблицам с промежуточной статистикой,

- управление ходом имитации, управление прогоном (задание начальных условий, условий завершения имитационного прогона, возобновление имитации и др.) Средства управления имитационными экспериментами позволяют автоматизировать установку начального состояния модели, определить условия завершения прогона, выбрать режимы работы управляющей программы, хранить и восстанавливать промежуточные состояния программы-имитатора, проводить серию прогонов. Наличие таких средств значительно упрощает проведение имитационных экспериментов с моделями;
- наличие специальных средств испытания имитационных программ, анализ чувствительности (проведение многократных прогонов с различными входными данными, регулировка параметров, а также сбор и обработка выходной статистики);
- анимация (animation) двух-мерная или трехмерная, в реальном времени (современные графические системы, позволяющие наблюдать за поведением «реальной» системы на модели);

Управление направленным вычислительным экспериментом на имитационной модели. Для управления имитационным исследованием в системе моделирования должно присутствовать: развитое математическое и программное обеспечение (библиотеки, макросы) для обработки результатов эксперимента, включая средства для организации статистических исследований, инструменты для реализации и поддержки обработки результатов направленных вычислительных экспериментов, алгоритмы оптимизации, и другие алгоритмы, основанные на эвристическом программировании и интеллектуальных методах, средства поддержки сценарного анализа, а также средства для хранения выходных результатов моделирования: файловые структуры, базы данных с результатами моделирования, или организации транспорта данных в другие инструментальные программные среды. Как правило, наборы этих инструментов в системе моделирования включают:

- поддержку анализа результатов моделирования и выходной информации, средства разработки эксперимента;
- средства автоматизированного анализа чувствительности;
- библиотеку решений для статистической обработки результатов моделирования (*Output Analyzer* и др.);
- накопление данных по серии прогонов и организация их в файловые структуры или базы данных, организация связи с системой управления базой данных;
- оптимизация (*OptQuest* и др. пакеты (табл 3.), реализующие эффективные процедуры поиска оптимального варианта в условиях вычислительного эксперимента) ;
- транспорт данных в другие инструментальные среды (например, таблицы Excel и базы данных);
- и др..

Таблица 3 – Инструментальные среды и пакеты оптимизации, применяемые в имитационном моделировании

Пакет	Поставщик	Поддерживаемые программы моделирования	Применяемые процедуры поиска
AutoStat	AutoSimulation, Inc	AutoMod, AutoSced	Эволюционные стратегии
OptQuest	Optimization Technologies, Inc	Arena, QUEST, Taylor Enterprise Dynamics, AnyLogic	Поиск с рассеиванием, поиск с запрещением, нейронные сети
OPTIMIZ	Visual Thinking International Ltd.	SIMUL8	Нейронные сети
SimRunner2	PROMODEL Corp.	MedModel, ProModel	Эволюционные стратегии, генетические алгоритмы
WITNESS Optimizer	Lanner Group, Inc.	WITNESS	Моделирующий отжиг, поиск с запрещением

Предпосылки совершенствования технологии системного моделирования были связаны, с одной стороны, - с общим развитием информационных технологий (графических оболочек, мультимедийных средств, объектно-ориентированного программирования и т.д.), а с другой - с усложнением решаемых задач и комплексным исследованием сложных систем, таких как социально-экономические, производственно-технологические, созданием систем поддержки принятия решения в различных областях научно-исследовательской деятельности. По данным обзоров [64], публикуемых в Internet, куда информация предоставляется компаниями - производителями программного обеспечения для имитационного моделирования, сегодня на рынке информационных технологий фигурирует более 100 программных продуктов аналитического типа, ориентированных на имитационное моделирование. Диапазон и разнообразие такого программного обеспечения продолжает расти, отражая тенденцию устойчивого спроса на него.

Сегодня имитационное моделирование становится все более зрелой компьютерной технологией. *Технологические возможности современных систем моделирования* характеризуются:

- универсальностью и гибкостью базовой и альтернативной к базовой концепций структуризации и формализации моделируемых динамических процессов, заложенных в систему моделирования. Сегодня популярны среди систем моделирования дискретного типа процессно-ориентированные концепции структуризации, основанные на сетевых парадигмах, и некоторые другие; среди систем моделирования непрерывного типа – модели и методы системной динамики;

- наличием средств проблемной ориентации, когда система моделирования содержит наборы понятий, абстрактных элементов, языковые конструкции из предметной области соответствующего исследования;
- применением объектно-ориентированных специализированных языков программирования, поддерживающих авторское моделирование и процедуры управления процессом моделирования;
- наличием удобного и легко интерпретируемого графического интерфейса, когда блок-схемы дискретных моделей и системные потоковые диаграммы непрерывных реализуются на идеографическом уровне, параметры моделей определяются через подменю;
- использованием развитой двух- и трех-мерной анимации в реальном времени;
- возможностью для реализации нескольких уровней представления модели, средствами для создания стратифицированных описаний. Современные системы моделирования применяют структурно-функциональный подход, многоуровневые иерархические, вложенные структуры и другие способы представления моделей на разных уровнях описания;
- наличием линеек и инструментов для проведения и анализа результатов сценарных, вариантных расчетов на имитационной модели;
- математической и информационной поддержкой процедур анализа входных данных, анализа чувствительности и широкого класса вычислительных процедур, связанных с планированием, проведением и обработкой результатов направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели;
- Экспериментальные исследования на имитационной модели информативны, поэтому необходима реализация подхода *Simulation Data Base*, основанного на доступе к базам данных моделирования. Технологически это решается при помощи собственных специализированных аналитических блоков системы моделирования или за счет интеграции с другими программными средами, в отдельных системах поддерживается транспорт данных из САПР (CAD) и передача данных в другие среды;
- исполнительный модуль может функционировать вне среды для разработки модели;
- применением многопользовательского режима работы, интерактивного распределенного моделирования, разработками в области взаимодействия имитационного моделирования со Всемирной паутиной и др.

Рассмотрим некоторые характеристики современных систем имитационного моделирования .

Идеографический режим построения моделей. Большинство систем моделирования имеют удобный, легко интерпретируемый графический интерфейс, системные потоковые диаграммы

или блок-схемы реализуются на идеографическом уровне, т.е. рисуются, параметры моделей определяются через подменю (pull-down menus). Сохраняются элементы программирования (на языках общего назначения или объектно-ориентированных) для отдельных элементов модели или создания специализированных блоков подготовленным пользователем, так называемое авторское моделирование (например, в системе Extend существует встроенный язык ModI для создания специализированных блоков).

Анимация. Системы моделирования имеют развитые средства мультипликации (animation), подчас мультипликация весьма сложная, трехмерная с использованием стандарта в области виртуальной реальности языка VRML, *в реальном времени*, как, например, в TAYLOR (и может быть перенесена в другие среды – например, в форме апплета для презентаций). Имитационное моделирование – это «компьютерный экстрасенс», который может создавать картины будущего.

Стратификация. В современных системах моделирования появляется некоторый инструментарий для создания стратифицированных моделей [40]. Стратификация систем, являясь общим принципом системного моделирования, реализуется в технологии имитационного моделирования либо путем детализации, итерационной процедуры эволюции имитационной модели, - либо путем создания комплекса взаимосвязанных моделей, с развитыми информационными и имплицитными связями между моделями. Стратифицированные модели представляют собой машинно-ориентированные понятия, предполагающие конструирование баз данных и знаний, над которыми определены вычислительные процессы решения задач системного анализа и принятия решения.

Разработчики систем моделирования используют различные подходы для реализации стратифицированных моделей. Ряд программных продуктов, такие как *AUTOMOD, ProModel, TAYLOR, WITNESS* и др. поддерживают интеграцию моделей на основе создания *вложенных структур*. В системах *Arena, Extend* реализован подход к стратификации, основанный на построении *иерархических многоуровневых структур*. Наиболее перспективным является *структурно-функциональный подход*, реализованный, например, в системах моделирования *Ithink, Rethink*, базирующийся на методологии структурного анализа и проектирования. При такой технологии есть возможность для реализации нескольких уровней представления моделей, - высоко-уровневое представление в виде блок-схем, с использованием CASE-средств, а на нижнем уровне модели могут отображаться, например, потоковыми схемами и диаграммами.

Поддержка направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели. Новая методология научного исследования в компьютерном моделировании, предполагающая организацию и проведение вычислительного эксперимента на имитационной модели, требует серьезной математической и информационной поддержки процесса системного моделирования, особенно в части вычислительных процедур, связанных с планированием эксперимента,

оптимизацией, организации работы с большим объёмом данных в процедурах принятия решений. Имитационные модели в зависимости от решаемых задач применяются совместно с дифференциальными уравнениями балансового типа, в сочетании с принципами и методами логистики, основанными на оптимизации, управлении, интеграции потоков в сложных системах. Перспективно применение компьютерного моделирования в сочетании с другими методами принятия решений, интеллектуальными технологиями (эволюционные вычисления, нейросетевые метамоделли и генетические алгоритмы), экспертными процедурами, реализация имитационно-оптимизационных вычислительных процедур [9] с применением развитых алгоритмов оптимизации.

Средства интеграции с другими средами. Многие системы моделирования обеспечены средствами для интеграции с другими программными средами, осуществляют доступ к процедурным языкам, связанным с кодом имитационной модели, для реализации специальных вычислений (в электронную таблицу, например), доступа к базам данных. В более мощных пакетах осуществляется интеграция через дополнительное программное обеспечение (add-on software) со специализированными блоками различного назначения. Это могут быть блоки *анализа входных данных (моделирование входных потоков –Input Distribution Fitting)*, гибкие средства *анализа чувствительности* (контроль экспериментов, анализ результатов –*Output Analysis Support*), позволяющие осуществлять многократные прогоны с различными входными данными и проводить статистическую обработку результатов эксперимента. Перспективным направлением является создание систем моделирования с функционально широкими, ориентированными на специфику имитационного моделирования, аналитическими блоками *оптимизации* и проведения сценарных исследований. В таблице 3 приведены некоторые пакеты оптимизации, применяемые в современных системах моделирования.

Реализуемый в ряде систем *многопользовательский режим*, применение интерактивного *распределенного моделирования*, разработки в области *взаимодействия имитационного моделирования со Всемирной паутиной*, расширяют возможности и сферу применения имитационного моделирования, позволяя отрабатывать совместные или конкурирующие стратегии различным компаниям.

Более подробную информацию о современных системах моделирования можно найти в [22,24,26,64,68].

3.3 Испытание и исследование свойств имитационной модели

Комплексный подход к тестированию имитационной модели.

После того, как имитационная модель реализована на ЭВМ, необходимо провести испытание, проверку модели. Это является чрезвычайно важным и ответственным моментом в имитационном моделировании. Проверка, выполненная не тщательно, может привести к неизвестным последствиям при принятии решений.

Поскольку моделирование связано с решением реальных задач, мы должны, прежде всего, быть уверены, что конечные результаты моделирования точно *отражают истинное положение вещей*, что модель *не абсурдна*, не дает нелепых ответов, оценить насколько модель и данные, полученные на ней, *полезны* и могут быть использованы при принятии решений, насколько точна разработанная модель.

Считается, что имитационные модели обладают высокой степенью изоморфизма (изоморфизм – сходство модели с объектом), т.к. существует взаимно однозначное соответствие между элементами модели и реального объекта моделирования, а также сохраняется характер взаимодействия между элементами (вы знаете, что имитационная модель призвана отражать структуру и внутренние связи моделируемой системы). Считается, что область пригодности модели тем обширнее, чем ближе структура модели к структуре системы и чем выше уровень детализации. Однако, большинство моделей все же гомоморфны. При построении любой модели используют упрощения, абстракции реальной системы, поэтому модель не является абсолютно точной в смысле однозначного соответствия её реальной системе. Кроме того, при описании системы, несмотря на наше стремление к объективности, действует субъективный фактор. Основной вопрос - насколько модель может быть в известной степени гомоморфной, и в то же время точной.

Таким образом, на этапе исследования имитационной модели мы должны *укрепить свое доверие к модели*, убедиться, что модель *функционально надежна*, оценить ее *достоверность*. Исследователь должен провести серию проверок, и в процессе проверки модели достигнуть приемлемого уровня уверенности, что выводы, сделанные на основе моделирования, будут правильными и применимыми для реальной системы

Это сложная, *философская* проблема. Моделирование является методом научного познания окружающей действительности. Исторически существует несколько направлений в науке об отношениях к методам научного познания: *эмпиризм, рационализм, абсолютный прагматизм*.

На одном конце философского спектра находится *эмпиризм*, критерий которого - практика. Эмпирик считает, что должна быть проведена эмпирическая проверка любой испытуемой гипотезы (с помощью эксперимента, или на основе анализа эмпирических данных).

Рационализм основывается на применении методов формальной логики. Приверженцы рационализма считают, что модель есть совокупность правил логической дедукции (типа «если, то»), которые могут привести от предпосылок к объективным выводам. Получается, что согласиться с правильностью модели, значит согласиться с основными предпосылками и логикой построения такой модели. (А вдруг исходные предпосылки необоснованны, ошибочны? Что, если мы моделируем всего лишь собственные мысли, имеющие мало отношения к реальной действительности? Такие вопросы всегда задает себе начинающий системный аналитик).

Третий философский подход – философия *абсолютного прагматизма*, у которого основной критерий – полезность, утверждает, что, модель должна с определенной точностью позволять достигать некоторых целей и давать полезные результаты, поэтому прагматика не интересуется внутренностью модели – «черного ящика», его интересуют лишь соотношения между входами и выходами модели.

Но истина, как говорят философы, посередине. Поэтому должна быть произведена всесторонняя проверка пригодности модели, *комплексная оценка модели*, отражающая все философские точки зрения.

В практике имитационного моделирования к настоящему времени сформировались методолого-технологические подходы к решению проблемы оценки достоверности имитационных моделей. Следует заметить, что оценка достоверности относится к числу «вечных» проблем имитационного моделирования. Такое положение обусловлено прежде всего спецификой применения имитационного моделирования как инструментария исследования, который в отличие от классических методов математического моделирования не обеспечивает проектировщиков и исследователей сложных систем соответствующими формализованными средствами определения (описания) таких систем. Однако нелишне заметить, что простота реализации некоторых процедур исследования в имитационном моделировании, например, анализа чувствительности, делают метод имитационного моделирования привлекательным и доступным.

Исследованию различных аспектов проблемы оценки достоверности уделяли и уделяют много внимания известные учёные и специалисты в области имитационного моделирования Р.Шеннон [48], Н.П.Бусленко [2], Дж.Клейнен [20], В.В.Калашников [13], А.А.Вавилов, С.В.Емельянов [40], и др.

В середине 90-х годов прошлого века американские специалисты выполнили цикл работ применительно к проблеме оценки достоверности. Наиболее известными являются методологические схемы О.Балчи и Р.Сэджента [51-54, 56, 58] сформулированные как своего рода методолого-технологические стандарты решения указанной проблемы, согласно которым реализация задачи оценки достоверности есть многоэтапный итерационный процесс получения

доказательства правильности и корректности выводов (или, по крайней мере, достижение приемлемого уровня уверенности в правильности таких выводов) относительно поведения исследуемой (проектируемой) системы. Вопросы практического использования этих стандартов рассматриваются в [50,56].

На практике выделяют 3 **основные категории оценки:**

- **Оценка адекватности или валидация модели.**

В общем случае валидация предполагает проверку соответствия между поведением имитационной модели и исследуемой реальной системы. *Валидация модели (validation)* есть подтверждение того, что модель в пределах рассматриваемой области приложений ведет себя с удовлетворительной точностью в соответствии с целями моделирования.

- **Верификация модели.**

Это проверка на соответствие поведения модели замыслу исследователя и моделирования. Т.е. процедуры верификации проводят, чтобы убедиться, что модель ведет себя так, как было задумано. Для этого реализуют формальные и неформальные исследования имитационной модели.

Верификация имитационной модели предполагает доказательство возможности использования создаваемой программной модели в качестве машинного аналога концептуальной модели на основе обеспечения максимального сходства с последней. Цель процедуры верификации - определить уровень, на котором это сходство может быть успешно достигнуто.

Валидация и верификация имитационной модели связаны с обоснованием *внутренней структуры модели*, в ходе этих процедур проводятся испытания внутренней структуры и принятых гипотез, исследуется внутренняя состоятельность модели.

- **Валидация данных.**

Валидация данных (data validity) направлена на доказательство того, что все используемые в модели данные, в том числе входные, обладают удовлетворительной точностью и не противоречат исследуемой системе, а значения параметров точно определены и корректно используются.

В ходе имитационного исследования выполняется анализ и интерпретация полученных в результате эксперимента данных, формулируются статистически значимые выводы на основе данных, полученных в результате эксперимента на имитационной модели, проверяется правильность интерпретации полученных с помощью модели данных. С этой целью проводят *исследование свойств имитационной модели*: оценивается *точность, устойчивость, чувствительность результатов моделирования*. Эти проверки связаны с выходами модели, сама имитационная модель рассматривается как черный ящик.

Таким образом, на этапе испытания и исследования разработанной имитационной модели организуется комплексное *тестирование модели (testing) - планируемый итеративный процесс, направленный главным образом на поддержку процедур верификации и валидации имитационных моделей и данных.*

Некоторые полезные процедуры тестирования рассмотрим ниже. Более широкое изложение методов тестирования имитационных моделей можно найти в специальной литературе [18, 28, 50].

Проверка адекватности модели.

При моделировании исследователя прежде всего интересует, насколько хорошо модель представляет моделируемую систему (объект моделирования). Модель, поведение которой слишком отличается от поведения моделируемой системы, практически бесполезна.

Различают *модели существующих и проектируемых систем.*

Если реальная система (или ее прототип) существует, дело обстоит достаточно просто. Поэтому для моделей существующих систем исследователь должен выполнить проверку адекватности имитационной модели объекту моделирования, т.е. проверить соответствие между поведением реальной системы и поведением модели.

На *реальную систему* воздействуют *переменные G^** , которые можно измерять, но нельзя управлять, *параметры X^** , которые исследователь может изменять в ходе натурных экспериментов. На выходе системы возможно измерение *выходных характеристик Y^** .

При этом существует некоторая неизвестная исследователю зависимость между ними $Y^*=f^*(X^*, G^*)$.

Имитационную модель можно рассматривать как преобразователь входных переменных в выходные. В любой имитационной модели различают составляющие: компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции. *Модель системы* определяется как совокупность компонент, объединенных для выполнения заданной функции $Y=f(X,G)$. Здесь Y, X, G – векторы соответственно результата действия модели системы *выходных переменных, параметров моделирования, входных переменных модели*. Параметры модели X исследователь выбирает произвольно, G – принимают только те значения, которые характерны для данных объекта моделирования.

Очевидный подход в оценке адекватности состоит в *сравнении выходов модели и реальной системы при одинаковых (если возможно) значениях входов*. И те, и другие данные (данные, полученные на выходе имитационной модели и данные, полученные в результате эксперимента с реальной системой) – статистические. Поэтому *применяют методы статистической теории оценивания и проверки гипотез.*

Используя соответствующий статистический критерий для двух выборок, мы можем проверить статистические гипотезы (H_0) о том, что выборки выходов системы и модели являются выборками из различных совокупностей или (H_1), что они «практически» принадлежат одной совокупности.

Могут быть рекомендованы два основных подхода к оценке адекватности:

1 способ: по средним значениям откликов модели и системы.

Проверяется гипотеза о близости средних значений каждой n -й компоненты откликов модели Y_n известным средним значениям n -й компоненты откликов реальной системы Y^*n .

Проводят N_1 опытов на реальной системе и N_2 опытов на имитационной модели (обычно $N_2 > N_1$).

Оценивают для реальной системы и имитационной модели математическое ожидание и дисперсию Y^*n, D^*n и Yn, Dn соответственно.

Гипотезы о средних значениях проверяются с помощью критерия t -Стюдента, можно использовать параметрический критерий Манна-Уитни и др.

Например, продемонстрируем использование t -статистики. Основой проверки гипотез является $E_n = (Y_n - Y^*n)$, оценка её дисперсии:

$$Dpn = \frac{(N_1 - 1)D_n + (N_2 - 1)D_n^*}{N_1 + N_2 - 2}$$

t -статистика:

$$t_n = (\bar{Y}_n - Y_n^*) \sqrt{\frac{N_1 N_2}{Dpn(N_1 + N_2)}}$$

Берут таблицу распределения t -статистики с числом степеней свободы: $\gamma = N_1 + N_2 - 2$ (обычно с уровнем значимости $\alpha = 0.05$). По таблицам находят критическое значение $t_{кр}$. Если $t_n \leq t_{кр}$, гипотеза о близости средних значений n -й компоненты откликов модели и системы принимается. И т.д. проводят оценку по всем n -компонентам вектора откликов.

2 способ: по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов систем.

Сравнение дисперсии проводят с помощью критерия F (проверяют гипотезы о согласованности), с помощью критерия согласия χ^2 (при больших выборках, $n > 100$), критерия Колмогорова-Смирнова (при малых выборках, известны средняя и дисперсия совокупности), Кохрена и др.

Проверяется гипотеза о значимости различий оценок двух дисперсий: D^*_n и D_n .

Составляется F -статистика: $F = D_n / D^*_n$, (задаются обычно уровнем значимости $\alpha = 0,05$, при степенях свободы $\gamma_1 = \gamma_2 = N_1 = N_2$), по таблицам Фишера для F -распределения находят $F_{кр}$. Если

$F > F_{кр}$, гипотеза о значимости различий двух оценок дисперсий принимается, значит - отсутствует адекватность реальной системы и имитационной модели по n -ой компоненте вектора отклика.

Процедура повторяется аналогичным образом по всем компонентам вектора отклика. Если хотя бы по одной компоненте адекватность отсутствует, то модель неадекватна. В последнем случае, если обнаружены незначительные отклонения в модели, может проводиться *калибровка имитационной модели* (вводятся поправочные, калибровочные коэффициенты в моделирующий алгоритм), с целью обеспечения адекватности.

А если не существует реальной системы (что характерно для задач проектирования, прогнозирования)? Проверку адекватности выполнить в этом случае не удастся, поскольку нет реального объекта. Для целей исследования модели иногда проводят специальные испытания (например, так поступают при военных исследованиях). Это позволяет убедиться в точности модели, полезности ее на практике, несмотря на сложность и дороговизну проводимых испытаний.

Могут использоваться и другие подходы к проведению валидации имитационной модели [50], кроме статистических сравнений между откликами реальной системы и модели. В отдельных случаях полезна валидация внешнего представления, когда проверяется насколько модель выглядит адекватной с точки зрения специалистов, которые с ней будут работать, так называемый *тест Тьюринга* (установление экспертами различий между поведением модели и реальной системы). В процессе валидации требуется постоянный контакт с заказчиком модели, дискуссии с экспертами по системе. Рекомендуется также проводить эмпирическое тестирование допущений модели, в ходе которого может осуществляться графическое представление данных, проверка гипотез о распределениях, анализ чувствительности и др. Важным инструментом валидации имитационной модели является графическое представление промежуточных результатов и выходных данных, а также анимация процесса моделирования. Наиболее эффективными являются такие представления данных, как гистограммы, временные графики отдельных переменных за весь период моделирования, графики взаимозависимости, круговые и линейчатые диаграммы. Методика применения статистических технологий зависит от доступности данных по реальной системе.

Верификация имитационной модели.

Верификация модели – есть доказательство утверждений соответствия алгоритма ее функционирования замыслу моделирования и своему назначению. На этапе верификации устанавливается *верность логической структуры модели*, реализуется комплексная отладка с использованием средств трассировки, ручной имитации, в ходе которой проверяется правильность реализации моделирующего алгоритма.

Комплексные процедуры верификации включают неформальные и формальные исследования программы-имитатора. Неформальные процедуры могут состоять из серии проверок следующего типа:

- проверка преобразования информации от входа к выходу;
 - трассировка модели на реальном потоке данных (при заданных G и X):
- X изменяется по всему диапазону значений – контролируется Y ;
- можно посмотреть, не будет ли модель давать абсурдные ответы, если ее параметры будут принимать предельные значения;
- “проверка на ожидаемость”, когда в модели заменяют стохастические элементы на детерминированные и др.

Полезным при решении указанных задач могут быть также следующие приёмы [50]:

- обязательное масштабирование временных параметров в зависимости от выбранного шага моделирования (валидация данных);
- валидация по наступлению «событий» в модели и сравнение (если возможно) с реальной системой;
- тестирование модели для критических значений и при наступлении редких событий;
- фиксирование значений для некоторых входных параметров с последующим сравнением выходных результатов с заранее известными данными;
- вариация значениями входных и внутренних параметров модели с последующим сравнительным анализом поведения исследуемой системы;
- реализация повторных прогонов модели с неизменными значениями всех входных параметров;
- оценка фактически полученных в результате моделирования распределений случайных величин и оценок их параметров (математическое ожидание и дисперсия) с априорно заданными значениями;
- сравнение исследователями поведения и результатов валидируемой модели с результатами уже существующих моделей, для которых доказана достоверность;
- для существующей реальной исследуемой системы предсказание её будущего поведения и сравнение прогноза с реальными наблюдениями.

Формальные процедуры верификации связаны с проверкой исходных предположений (выдвинутых на основе опыта, теоретических знаний, интуитивных представлений, на основе имеющейся информации). Общая процедура включает:

- построение ряда гипотез о поведении системы и взаимодействии ее элементов;

- проверка гипотез с помощью статистических тестов: используют методы статистической теории оценивания и проверки гипотез (методы проверки с помощью критериев согласия, непараметрические проверки и т.д., а также дисперсионный, регрессионный, факторный, спектральный анализы).

Валидация данных имитационной модели предполагает исследование свойств имитационной модели, в ходе которого оценивается *точность, устойчивость, чувствительность результатов моделирования* и другие свойства имитационной модели.

Наиболее существенные процедуры исследования свойств модели:

- *оценка точности результатов моделирования;*
- *оценка устойчивости результатов моделирования;*
- *оценка чувствительности имитационной модели.*

Получить эти оценки в ряде случаев бывает весьма сложно. Однако без успешных результатов этой работы, доверия к модели не будет, невозможно будет провести корректный проблемный анализ и сформулировать статистически значимые выводы на основе данных, полученных в результате имитации.

Оценка точности результатов моделирования.

Экспериментальная природа имитации требует, чтобы мы учитывали случайную вариацию оценок, получаемых на модели характеристик. В ходе этих испытаний исследователь интересуется выходами модели, прежде всего его интересует:

- какой разброс данных на выходе имитационной модели или точность имитации;
- и какие выводы можно сделать по полученным результатам моделирования.

Точность имитации явлений представляет собой оценку влияния стохастических элементов на функционирование модели сложной системы.

Всем стохастическим элементам имитационной модели присущи флуктуации. Данные одного имитационного прогона представляют собой единичную выборку, т.е. результаты прогонов на имитационной модели могут рассматриваться как случайные величины – и к ним должны быть применены все определения и правила математической статистики. Ясно, для того, чтобы увеличить точность имитации (уменьшить разброс данных) необходимо выборку сделать большой (представительной). Поэтому, для достижения заданной точности результатов эксперимента, либо повторяют эксперимент несколько раз, либо имитируют более продолжительный период времени и оценивают полученные результаты (см. основные задачи тактического планирования: определение продолжительности имитационного прогона, анализ

установившегося состояния). Для повышения точности используют специальные методы понижения дисперсии.

Степень точности определяется величиной флуктуации случайного фактора (дисперсией). Мерой точности является доверительный интервал.

Для определения точности результатов имитации оцениваем доверительные интервалы. Если мы имеем оценку \bar{X} истинного среднего μ совокупности, мы определяем верхнюю и нижнюю границы интервала, так, чтобы вероятность попадания истинного среднего в интервал, заключенный между этими границами, равнялась некоторой заданной величине (α – доверительная вероятность) следующим образом:

$$P \{ \mu - d < \bar{X} < \mu + d \} = 1 - \alpha, \text{ где} \quad (3.1)$$

\bar{X} – выборочное среднее,

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

Оценка устойчивости результатов моделирования.

Под устойчивостью результатов имитации будем понимать степень нечувствительности ее к изменению условий моделирования. Универсальной процедуры для такой проверки не существует.

Устойчивость результатов моделирования характеризуется сходимостью контролируемого параметра моделирования к определенной величине при увеличении времени моделирования варианта сложной системы.

На практике, рекомендуется устойчивость результатов моделирования оценивать дисперсией значений отклика (по выбранной компоненте). Если эта дисперсия при увеличении времени моделирования не увеличивается, значит, результаты моделирования устойчивы.

Может быть рекомендована следующая *методика оценки устойчивости*. В модельном времени с шагом Δt контролируются выходные переменные Y . Оценивается амплитуда изменений параметра Y . Рост разброса контролируемого параметра от начального значения при изменении модельного времени указывает на неустойчивый характер имитации исследуемого процесса.

Для проверки статистической гипотезы *о равенстве дисперсий значений откликов* имитационной модели ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$) для испытаний с различными длительностями прогонов может быть использован *критерий Бартлетта*:

$$B = \frac{1}{c} \left(\int \ln S^2 - \sum_{i=1}^k f_i \ln S_i^2 \right), \text{ где}$$

$$S^2 = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^k f_i S_i^2$$

$$f = \sum_{i=1}^k f_i, f_i = n - 1$$

Методика несмещенной оценки k -дисперсий нормальных генеральных совокупностей включает установление длительности прогона, с заданным шагом Δt сканируется весь период моделирования по контролируемой компоненте вектора отклика y_i , оценивается дисперсия, формулируется нулевая статистическая гипотеза: о равенстве дисперсий и проверяется с помощью критерия Бартлетта. Если $B > \chi^2$, то гипотеза принимается и считается, что модель устойчива по i -компоненте вектора отклика. Процедура повторяется по всем компонентам вектора отклика. В случае удачной проверки, считается, что модель устойчива по всему вектору выходных переменных

Анализ чувствительности имитационной модели.

Чувствительности модели определяет оценку влияния колебаний значений входных переменных на выходные переменные (отклики) модели.

Под *анализом чувствительности* понимаем определение чувствительности наших окончательных результатов моделирования к изменению используемых значений параметров. Анализ означает, как меняется выходная переменная Y при небольших изменениях различных параметров модели или ее входов X .

Простота проведения анализа чувствительности в имитационном моделировании - одно из преимуществ этого метода. Оценка чувствительности является исключительно важной процедурой и подготовительным этапом перед планированием имитационного эксперимента.

Дело в том, что в ходе имитационного исследования величины параметров систематически варьируются в некоторых представляющих интерес пределах ($X_{min} - X_{max}$) и наблюдается влияние этих вариаций на характеристики системы ($Y_{min} - Y_{max}$). Если при незначительных изменениях величин некоторых параметров результаты меняются очень сильно, то это – основание для затраты большого количества времени и средств с целью получения более точных оценок. И наоборот, если конечные результаты при изменении величин параметров в широких пределах не изменяются, то дальнейшее экспериментирование в этом направлении бесполезно и неоправданно. Поэтому очень важно заранее определить степень чувствительности результатов относительно выбранных для исследования величин параметров.

Исследование чувствительности является *предварительной процедурой перед планированием эксперимента* и позволяет определить стратегию планирования экспериментов на имитационной модели. Этой информации бывает достаточно для ранжирования компонент вектора параметров модели X по значению чувствительности вектора отклика модели. Если модель оказывается малочувствительной по какой-либо q -й компоненте вектора параметров

модели X_q , то зачастую не включают в план имитационного эксперимента изменение X_q , чем достигается экономия ресурса времени моделирования.

Анализ чувствительности поможет также *внести коррективы в разрабатываемую модель* – упростить, например, перейти от использования закона распределения к использованию среднего значения переменной, а некоторые подсистемы вообще отбросить (или процессы не детализировать). И наоборот, анализ чувствительности может показать, какие части модели было бы полезно разработать более детально.

Чувствительность имитационной модели представляется величиной минимального приращения выбранного критерия качества, вычисляемого по статистикам моделирования, при последовательном варьировании параметров моделирования на всем диапазоне их изменения.

Методика (процедура) оценки чувствительности [28]:

По каждому параметру X определяется интервал изменения его значений ($\min X_q, \max X_q$). Остальные компоненты вектора X не изменяются и соответствуют центральной точке. Проводят пару модельных экспериментов и получают отклики модели ($\min Y, \max Y$ соответственно). Для оценки чувствительности используют абсолютные или относительные значения переменных. В последнем случае вычисляют приращение вектора параметров

$$\delta X_q^0 = \frac{(\max X_q - \min X_q)^2}{(\max X_q + \min X_q)} 100\%$$

и вычисляют приращение вектора отклика

$$\delta Y_q = \frac{(\max Y_q - \min Y_q)^2}{(\max Y_q + \min Y_q)} 100\%$$

Выбирают $\delta Y_q^0 = \max\{\delta Y_n\}$.

Итак, чувствительность модели по q - компоненте вектора параметров X определяют парой значений $(\delta X_q^0, \delta Y_q^0)$.

Все рассмотренные процедуры в комплексе дают необходимую информационную базу обеспечения доверия к разработанной имитационной модели и перехода к следующим этапам работы с моделью.

Тактическое планирование имитационного эксперимента.

Имитационное исследование и испытание имитационной модели требуют проведения широкого спектра компьютерных прогонов согласно сценариям, разработанным в процессе стратегического планирования вычислительного эксперимента. Стратегическое планирование

(подробно рассматривается в следующем параграфе) направлено на решение задач анализа чувствительности имитационной модели и определение комбинации оптимизирующих исследуемую систему параметров.

Тактическое планирование позволяет определиться с условиями проведения каждого прогона в рамках составленного плана эксперимента и связано с вопросами эффективности и определением способов проведения испытаний (прогонов), намеченных планом экспериментов.

Тактическое планирование направлено на решение проблемы повышения точности оценивания результатов имитационного моделирования, и связано с тем, что в условиях стохастической модели, чтобы достигнуть заданной точности стремятся повторять реализации (проводить многочисленные прогоны). Выше мы обсуждали, что экспериментатор должен не только получить данные, но и оценить их точность, т.е. степень доверия к тем выводам, которые будут сделаны на основе этих результатов. Поэтому он стремится увеличить продолжительность прогона или число прогонов (размер выборки), т.к. от этого зависит точность результатов. Время на серию машинных прогонов сложного модельного эксперимента может быть большим, а выделенное на эксперимент машинное время ограничивается имеющимися временными и машинными ресурсами. Поэтому необходимо стремиться к получению максимальной информации с помощью небольшого числа прогонов. Основное *противоречие* - между *точностью результатов и ограничением на ресурс* (затратами на машинное время и на проведение серии экспериментов). На практике ищется компромисс.

Основные задачи тактического планирования, которые решаются в связи с этим:

- Определение продолжительности имитационного прогона или требуемого числа повторений каждого прогона (размера выборки), обеспечивающего заданную точность результатов моделирования;
- Определение длительности переходного режима (анализ установившегося состояния), задание начальных условий (начального состояния).

Дополнительно могут здесь решаться также такие задачи:

- выбор шага моделирования, поскольку именно от шага моделирования зависит точность воспроизведения процессов в имитационной модели;
- контроль повторяемости результатов;
- установление правил остановки,
- уменьшении дисперсии выходов (используются специальные методы понижения дисперсии),
- снижение погрешности имитации, обусловленной наличием в имитационной модели генераторов псевдослучайных чисел,
- и многие другие.

Рассмотрим основные задачи тактического планирования.

Определение необходимого числа прогонов.

В ходе вычислительного эксперимента используются различные методы организации прогонов с целью получения представительных данных по результатам моделирования: либо повторяют имитацию несколько раз (метод повторных прогонов), либо имитируют более продолжительное время (метод удлиненных прогонов); способы задания продолжительности имитационного прогона: задается момент времени завершения моделирования или правила, управляющие размером выборки (например, задание числа компонентов, обрабатываемых в системе)

Чтобы результаты, полученные на имитационной модели, были статистически значимы, стремятся повысить точность результатов моделирования, повторяя эксперимент и усредняя полученные результаты. Этот способ неэффективен, т.к. разброс значений : $\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{n}}$, где n - число повторений. Встает вопрос: как много выборочных значений следует взять, чтобы обеспечить статистическую значимость результатов моделирования. *Задача состоит в том, чтобы определить при заданной точности необходимое число прогонов.* Задача является обратной рассмотренной выше задачи оценивания точности методом доверительных интервалов.

Задача состоит в определении необходимого для выполнения условия (3.1) объема выборки n . В предположении нормальности распределения выборочных значений из генеральной совокупности можно показать, что

$$n = (\sigma Z_{\alpha/2})^2 / d^2, \text{ где}$$

$Z_{\alpha/2}$ – двусторонняя стандартная нормальная статистика.

Для решения n необходимо знать σ , $Z_{\alpha/2}$, d .

На практике проводят пробные прогоны и определяют необходимое число прогонов следующим образом:

$$n \cong n_0 \frac{d_0^2}{d^2}, \text{ где}$$

n – необходимое число прогонов;

n_0 – количество пробных прогонов;

d_0 – доверительный интервал, оцененный по результатам пробного прогона;

d - требуемая точность.

Анализ установившегося состояния. Определение участка разгона (разогрева) модели для исключения данных неустановившихся режимов функционирования системы.

Установившимся (стационарным) называется такое состояние модели, когда последовательные наблюдения отклика в установившемся состоянии имеют некоторое предельное стационарное распределения вероятностей, не зависят от времени.

Стационарность режима моделирования характеризует собой некоторое установившееся равновесие процессов в модели системы. Часто говорят, что динамическая система находится в равновесии (стационарном состоянии), если её функционирование происходит в соответствии с параметрами предельного стационарного распределения, которое не зависит от времени. Обычно имитационные модели применяются для изучения системы в некоторых типичных для системы условиях. Установившееся состояние обычно характерно для типичных условий функционирования (например, для процессов обслуживания в аэропорту, на транспорте, в больнице не естественны начальные состояния $(0,0)$ - «пуст и свободен»)

В некоторых стохастических моделях требуется некоторое время для достижения моделью необходимого установившегося состояния, имитационная модель не сразу выходит в стационарный режим работы. Необходимо определить момент достижения стационарного режима моделирования и позаботиться об уменьшении влияния начального периода моделирования или его исключения из результатов моделирования. Очевидно, что если исследовать только установившийся режим, то качество статистических оценок повысится. Чтобы исключить влияние начального периода на результаты моделирования используют длинные прогоны модели (если позволяет машинное время) или исключают из рассмотрения начальный период прогона с помощью процедуры отсечения и сброса данных переходного периода. Эта задача решается с помощью определения в пробном прогоне момента выхода системы в стационарный режим и задания соответствующих начальных условий в имитационной модели.

Однако рассмотренной процедурой надо пользоваться аккуратно, т.к. для некоторых исследуемых процессов переходный режим может представлять самостоятельный интерес.

Обсуждение других задач тактического планирования можно найти в специальной литературе [28,48].

3.4 Направленный вычислительный эксперимент на имитационной модели.

Содержание направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели

Мы уже обсуждали с Вами, что компьютерное моделирование рассматривает вычислительный эксперимент как новую методологию научного исследования. В первой главе мы определяли метод имитационного моделирования как *экспериментальный метод*, предполагающий экспериментирование с помощью модели с целью получения информации о реально действующей системе. Вычислительный эксперимент здесь рассматривается как *целенаправленное* исследование, организованное на имитационной модели, которое позволяет получить информацию, необходимую для принятия решений.

Имитационные модели являются моделями *прогонного типа*. Исследование на имитационной модели состоит из серии прогонов, в ходе каждого прогона осуществляется оценка функционирования системы при заданном (фиксированном) наборе условий, при определенном наборе исходных данных и управляемых параметров (здесь мы временно отвлечемся от стохастичной природы имитации и будем подразумевать детерминированный случай). Характерной чертой имитационной модели является то, что каждый машинный прогон имитационной модели дает результаты, которые действительны только при определенных значениях параметров, переменных и структурных взаимосвязей, заложенных в имитационную программу. Для различных исследуемых вариантов могут изменяться параметры, переменные, операционные правила, структурные отношения имитационной модели, которые характеризуют определенный вариант. Цель имитационных исследований – снабжать данными при изменении входных условий.

Имитационный эксперимент, содержание которого определяется:

- *предварительно-проведенным аналитическим исследованием (являющимся составной частью вычислительного эксперимента),*
 - *результаты которого достоверны и математически обоснованы,*
- назовем **направленным вычислительным экспериментом.**

Приведенное выше определение отражает две части и основные задачи исследователя при организации и проведении вычислительного эксперимента на имитационной модели. Эти задачи включают:

- Стратегическое планирование вычислительного эксперимента;

- Выбор (математического) метода анализа (обработки) результатов вычислительного эксперимента.

Рассмотрим первую задачу. *Проблемы стратегического планирования* в имитационном исследовании мы обсуждали ранее. Стратегическое планирование вычислительного эксперимента - это организация вычислительного эксперимента, выбор метода сбора информации, который дает требуемый (для данной цели моделирования, для принятия решения) ее объем *при наименьших затратах*. Т.е. основная цель стратегического планирования – получить желаемую информацию для изучения моделируемой системы при минимальных затратах на экспериментирование, при наименьшем числе прогонов.

Перед началом исследования необходимо разработать *план проведения эксперимента на модели*. Планирование эксперимента позволяет:

1) выбрать конкретный *метод сбора* необходимой для получения обоснованных выводов информации, т.е. план задает схему исследования. Таким образом, *план эксперимента служит структурной основой процесса исследования*.

2) достигнуть цели исследования *эффективным* образом, т.е. уменьшить число экспериментальных проверок (прогонов).

Действительно, если в процессе имитационного исследования рассматривается большое число вариантов (для каждого варианта могут меняться параметры, переменные, структурные отношения, операционные правила), то число прогонов растет, растут и затраты машинного времени. Допустим, число уровней, принимаемых значений переменной всего 2. В случае 3-х двухуровневых факторов (или переменных) необходимо проводить прогонов $N = 2^3 = 8$, при 7 факторах требуемое число прогонов возрастает до $2^7 = 128$.

Проблема выбора ограниченного числа прогонов может быть решена с помощью *статистических методов планирования эксперимента*, которые мы будем рассматривать ниже.

Вторая задача при организации и проведении направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели: *выбор метода анализа результатов*. В зависимости от целей и задач вычислительного эксперимента могут применяться различные математические методы для обработки результатов эксперимента. На данном технологическом этапе имитационного моделирования, имитационная модель представляется исследователю в виде черного ящика, как показано на рисунке 3.4. Взаимосвязь между входом X и выходом Y имитационной модели, должна быть описана с помощью некоторой вторичной математической модели:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

В простейшем случае – это может быть некоторая регрессионная модель. В задачах интерполяции ищется функция F , в задачах оптимизации – экстремум функции F .

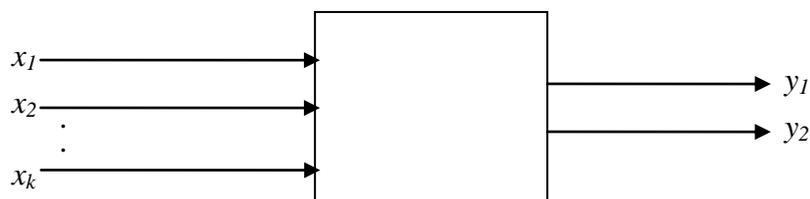


Рис. 3.4 – Представление имитационной модели в виде «черного ящика».

Выбор метода анализа результатов исследования зависит в основном от цели и характера исследования. На практике, выбор аналитического метода анализа результатов исследования определяется целью исследования и методом анализа его результатов, необходимым для достижения этой цели.

Итак, решение основных задач этапа экспериментального исследования на имитационной модели связано с составлением плана компьютерного эксперимента, позволяющего достигать поставленные цели эксперимента эффективным образом, с учетом ограничений на ресурсы, а также выбором математического метода анализа (истолкования) результатов моделирования. Технологическая цепочка такого экспериментального исследования на имитационной модели представляет последовательность следующих действий: в соответствии с целью исследования осуществляется математическая постановка задачи (определяется содержание направленного вычислительного эксперимента); в соответствии с поставленной задачей исследования разрабатывается план эксперимента; по плану проводится серия экспериментов, в ходе которых собирается информация (результаты экспериментов); далее в зависимости от цели эксперимента выбирается метод анализа результатов, позволяющий в конечном итоге исследователю принимать решение по результатам моделирования.

Далее мы будем изучать анонсируемые выше методы, полезные в вычислительном эксперименте на имитационной модели.

Основные цели и типы вычислительных экспериментов в имитационном моделировании.

В соответствии с наиболее употребляемыми целями моделирования, рассмотренными в первой главе, *целями вычислительного эксперимента* могут быть:

- оценка выходных переменных сложной системы при заданных параметрах системы;
- выбор на множестве альтернатив;
- получение знаний о влиянии управляемых параметров на результаты эксперимента;

– определение тех значений входных параметров и переменных, при которых достигается оптимальный выход (отклик).

Наиболее широко на практике распространены следующие *типы вычислительных экспериментов*, представленные в таблице 3.3.:

Таблица 3.3 – Основные типы направленных вычислительных экспериментов и применяемые в них методы.

<i>Цели вычислительного эксперимента</i>	<i>Тип направленного вычислительного эксперимента</i>	<i>Применяемые математические модели и методы</i>
Оценка выходных переменных при заданных параметрах системы. Сравнение альтернатив (или выбор на множестве альтернатив)	<i>Оценка и сравнение средних и дисперсий различных альтернатив</i>	Статистические методы оценивания, проверки гипотез; однофакторный дисперсионный анализ; методы множественного ранжирования и сравнения; процедуры ранжирования, отбора, эвристические приемы и др.
Получение знаний о влиянии управляемых параметров на результаты эксперимента	<i>Анализ чувствительности (задача интерполяции)</i>	Методы планирования эксперимента, дисперсионный, регрессионный анализ; и др.
Определение тех значений входных параметров и переменных, при которых достигается оптимальный выход	<i>Поиск оптимума на множестве возможных значений переменных (задача оптимизации)</i>	Последовательные методы планирования эксперимента (методология анализа поверхности отклика).
Вариантный синтез. Анализ сценариев.	<i>Многокритериальная оптимизация, сценарное планирование</i>	Итерационные имитационно-оптимизационные процедуры, методы принятия решений

1. *Оценка и сравнение средних и дисперсий различных альтернатив.*

2. *Анализ чувствительности* системы к изменению параметров. Основным содержанием такого эксперимента является определение влияния управляемых параметров, переменных (факторов) на результаты экспериментов (отклик). В эксперименте этого типа ставится математическая *задача интерполяции* и осуществляется построение интерполяционных формул. Например, функция F может быть аппроксимирована полиномиальной функцией, например

некоторой линейной регрессионной моделью. В задачах интерполяции необходимо *найти функцию F*.

3. *Поиск оптимальных значений на некотором множестве возможных значений переменных.* В задачах оптимизации необходимо *найти экстремум функции F*.

4. *Вариантный синтез, сценарное планирование* - это более сложный класс вычислительных экспериментов, как правило, связанный с многокритериальной оптимизацией, реализацией итерационных имитационно-оптимизационных процедур [9], выбором и принятием решения в различных условиях, анализом сценариев.

Рассмотрим *основные математические модели и методы*, применяемые в вычислительных экспериментах этого типа и общие схемы по их организации и проведению.

Эксперименты первого типа довольно просты в планировании и обычно являются так называемыми *однофакторными экспериментами*, в которых изменяется лишь единственный фактор. Основные вопросы, встающие перед экспериментатором при их проведении, - это вопросы о размере выборки, начальных условиях, наличие или отсутствии автокорреляции и другие задачи тактического планирования машинного эксперимента, которые рассматриваются подробнее в соответствующем разделе учебника.

Уровни (значения) исследуемого фактора могут быть качественными или количественными, фиксированными или случайными. Число наблюдений или прогонов для каждого уровня фактора определяется допустимыми затратами, желаемой мощностью проверки или статистической значимостью результатов.

Рассматриваемую ситуацию можно представить в виде следующей математической модели:

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \mathcal{E}_{ij}, \text{ где}$$

Y_{ij} обозначает i -е наблюдение ($i=1, 2, \dots, n$) на j -м уровне ($j=1, 2, \dots, k$ уровней).

Например, X_{42} обозначает четвертое наблюдение или прогон на втором уровне фактора;

μ - общее влияние всего эксперимента ;

T_j - влияние j -го уровня,

\mathcal{E}_{ij} - случайная ошибка i -го наблюдения на j -м уровне. В большинстве рассматриваемых в литературе экспериментальных моделей \mathcal{E} предполагается нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним и дисперсией σ^2 , одинаковой для всех j .

В более сложных случаях в правую часть приведенного выше уравнения модели включают дополнительные переменные, позволяющие учесть влияние других факторов и условий задачи.

В таблице показан типичный план (макет) однофакторного эксперимента с k уровнями фактора.

Таблица 3.4 – План однофакторного ДАНа.

Уровень фактора	1	2 ...	j ...	k
	y_{11}	y_{12}	y_{1j}	y_{1k}
	y_{21}	y_{22}	y_{2j}	y_{2k}
	...			
Среднее	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_j	\bar{y}_k

Основные математические методы, применяемые и рекомендуемые в этом эксперименте:

- *статистические методы оценивания* таких величин, как среднее значение, стандартное отклонение, коэффициент корреляции др.;
- процедуры *проверки гипотез* с использованием стандартной тестовой статистики (t , F , χ^2 и др.), если количество альтернатив равно двум;
- *однофакторный дисперсионный анализ* - если фактор имеет более двух уровней, то обычно используется однофакторный дисперсионный анализ (ДАН) с нулевой гипотезой $T_j=0$ для всех j . Количество наблюдений или прогонов не обязательно одинаково для различных уровней фактора. Если нулевая гипотеза верна, то наблюдение Y_{ij} не зависит от уровня фактора и имеет среднее μ и случайную ошибку \mathcal{E} .
- при сравнении и выборе альтернатив рекомендуются статистические процедуры ранжирования (веса) и отбора: *методы множественного ранжирования и методы множественного сравнения*. Это методы применяются при сравнении нескольких $k > 2$ вариантов систем, когда каждой системе соответствует одна частная комбинация уровней факторов, варьируемых в эксперименте. Статистические методы множественного ранжирования позволяют определить число наблюдений, которые надо взять из каждой $k > 2$ совокупностей, чтобы выбрать наилучшую совокупность. Наилучшая, обычно, – та совокупность, которая имеет наибольшее (или наименьшее – в зависимости от задачи) – среднее. Обзор, эффективность этих методов подробно рассматривается в [18].

Эксперименты второго типа предполагают обычно широкое использование специальных *методов планирования эксперимента*, которые мы подробнее будем изучать в следующем разделе учебного пособия. Основными методами истолкования результатов этих экспериментов являются *дисперсионный и регрессионный анализы*. Для исследования динамических рядов (в моделях системной динамики) рекомендуется *спектральный анализ*.

План эксперимента определяет комбинацию значений управляемых параметров модели и для каждой комбинации задает число повторных прогонов модели. Выбирают и осуществляют план, далее, используя данные эксперимента, определяют параметры регрессионной модели.

Предполагают, что выход (отклик) имитационной модели системы является временным рядом. Пусть, выход содержит только одну выходную переменную. (Для множественных выходов рассматриваемая процедура должна быть применена к каждой переменной отдельно). Назовем такую величину переменной отклика $-Y$.

Если $X = (x_1, \dots, x_k)$ – факторы, то отклик Y является функцией факторов X .

$$Y = f(x_1, \dots, x_k)$$

Y – стохастическая переменная, является функцией от k факторов x_j ($j=1, k$); f – и есть результат действия имитационной модели. Эта модель может быть аппроксимирована некоторой (например, линейной) регрессионной моделью (внутри некоторой экспериментальной области E).

Простейшая (линейная) регрессионная модель для выражения эффектов от k -факторов имеет вид:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + e_i \quad (i=1, N)$$

где в i -м имитационном прогоне (i -наблюдение) фактор j имеет значение X_{ij} ($j=1, k$) и e_i представляет ошибку в регрессионной модели и по предположению имеет нулевое математическое ожидание.

Эта модель подразумевает, что изменение в x_j имеет постоянный эффект на ожидаемый отклик Y :

$$\partial Y / \partial x_j = \beta_j \quad (j=1, k)$$

Более общая регрессионная модель постулирует, что эффект от фактора j зависит также от значения других факторов (с этим связан тот или иной вид нелинейности в регрессионных моделях).

Например, для случая $k=3$ имеет место уравнение:

$$Y_i = \beta_0 + (\beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3}) + \beta_{12} X_{i1} X_{i2} + \beta_{13} X_{i1} X_{i3} + \beta_{23} X_{i2} X_{i3} + \beta_{123} X_{i1} X_{i2} X_{i3} + e_i \quad (i=1, N),$$

где вектор коэффициентов β содержит *суммарное среднее, главные эффекты, и эффекты взаимодействия*.

Общая схема исследования в экспериментах этого типа при анализе чувствительности следующая:

- Выбор ограниченного числа прогонов вариантов системы решается с помощью статистических методов планирования экспериментов. Используют *полные и дробные факторные планы*;
- Эксперимент, содержащий конечное число прогонов позволяет получить выборочные оценки для коэффициентов регрессионного уравнения. Параметры полинома оцениваются и проверяются на их значимость с помощью известной техники регрессионного анализа путем применением *обычного или обобщенного метода наименьших квадратов*;
- *Проверка адекватности математической модели* с использованием статистического теста Стьюдента или F-теста. Если предполагаемая модель в результате окажется неприемлемой, то можно попробовать усложнить исходную модель путем добавлений двух- трех -факторных взаимодействий, или использовать преобразование исходных факторов, сужение экспериментальной области E и другие подходы;
- Исследователь выполняет *анализ регрессионной модели и коэффициентов регрессии*. Коэффициенты указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент со знаком «+», - то с увеличением значения фактора значение выходной переменной увеличивается, если «-», - то уменьшается.

Вычислительный эксперимент, ориентированный на решение *задачи оптимизации* (определяются такие значения управляемых параметров и переменных, которые максимизируют или минимизируют заданную целевую функцию), предполагает использование *последовательных или поисковых методов построения экспериментов*. Полезно применение *методологии анализа поверхности отклика*, рассматриваемой в следующих разделах, комбинирующей методы планирования и итерационные имитационно- оптимизационные вычислительные процедуры.

В более сложных задачах, в вычислительном эксперименте на имитационной модели могут применяться методы оптимизации и принятия решений, проводятся экспериментальные исследования типа «Что, если?..», применяться методы *сценарного планирования*.

Сценарный подход представляет собой определенным образом организованную итеративную исследовательскую процедуру построения возможного сценария развития рассматриваемой системы. Процедуры данного метода основаны на сочетании логико-эв-

ристического анализа с формальными методами исследований, в том числе с проведением сценарных расчетов на имитационных моделях. Под сценарием понимается некоторая гипотетическая логическая последовательность событий, показывающая, как из заданной ситуации, при заданных начальных условиях, можно последовательно шаг за шагом, изменять будущее состояние исследуемого объекта. Природа имитационной модели идеально подходит для исследований такого типа. В условиях сценарных исследований во времени изменяется и наблюдается состояние моделируемой динамической системы и значения управляемых (сценарных) параметров модели.

Основы теории планирования экспериментов.

Проблема выбора ограниченного числа экспериментов для анализа вариантов моделируемой системы может быть решена с помощью статистических методов планирования экспериментов.

Теория планирования эксперимента традиционно используется в химии, физике, сельском хозяйстве. В экономике натурный эксперимент исключен, так как труден и дорогостоящ, однако машинный эксперимент, когда все факторы находятся под управлением исследователя – возможен.

Теория и практика использования методов планирования разработана в настоящее время достаточно хорошо, – существует большое число работ, специальные справочники, в которых представлены некоторые типы планов, поэтому их можно использовать в проектах, как выкройки для готовой одежды. Чтобы начинающему симуляционисту можно было сделать правильный выбор для своего проекта, необходимо познакомиться с основами теории планирования эксперимента и изучить некоторые полезные планы экспериментов. Можно рекомендовать следующую специальную литературу, в которой обсуждаются методы планирования машинных экспериментов [11,18, 31,48].

Машинный эксперимент имеет целый ряд преимуществ по-сравнению с физическим:

- Машинный эксперимент *управляемый, активный*. Существует возможность управления условиями проведения эксперимента. Можно выбирать уровни факторов заведомо постоянные, а не случайные, т.е. строить модели постоянных эффектов. Это упрощает методы планирования экспериментов и анализа результатов;
- В условиях машинного эксперимента выполняется требование *воспроизводимости* эксперимента, присутствует легкость прерывания и воспроизведения условий проведения экспериментов. Это позволяет, например, на ЭВМ реализовать одну и ту же последовательность событий в экспериментах при сравнении альтернатив. Кроме того,

можно создавать такие условия в компьютерных экспериментах, которые позволяют выполнять допущения и предположения дисперсионного и регрессионного анализов, например, т.к. независимость отклика, однородность дисперсии и другие;

- При машинных экспериментах можно использовать *последовательные или эвристические методы планирования*, которые могут оказаться нереализуемыми при экспериментах с реальными системами. В компьютерном эксперименте можно прервать эксперимент, выполнить анализ результатов, а дальше принять решение об изменении параметров модели или продолжить эксперимент с теми же параметрами.

В машинном эксперименте возникают и некоторые трудности:

- существует «чистая ошибка опыта», вносимая программными датчиками случайных чисел, правда ее можно оценить на стадии определения пригодности модели;
- большая роль отводится случайным внешним (экзогенным) факторам,

Основные понятия теории планирования экспериментов.

Чтобы оказать помощь в самостоятельном освоении теории планирования экспериментов введем некоторые термины и понятия.

При планировании и построении модельных экспериментов мы имеем дело с двумя типами переменных, *факторами* и *откликами*. В терминах теории планирования экспериментов вход модели называется *фактором*, конкретные значения фактора – *уровнями*, выход модели – *откликом*.

Для выяснения различий между ними рассмотрим простой эксперимент, в котором рассматриваются лишь две переменные x и y и цель которого состоит в ответе на вопрос: как при изменении x изменяется y ? В этом случае x — фактор, а y — отклик. В литературе факторы называют независимыми переменными, а отклики — выходами или зависимыми переменными. Итак, в случае вычислительного эксперимента на имитационной модели термины *фактор*, *режим*, *независимая переменная*, *входная переменная* и *экзогенная переменная* эквивалентны, так же как и термины *отклик*, *выход*, *зависимая переменная*, *выходная переменная*, *переменная состояния*, *эндогенная переменная*.

Уровни — это значения квантования каждого фактора.

План эксперимента имеет вид:

$$N = (q_1), (q_2), (q_3) \dots (q_k), \text{ где}$$

N — число информационных точек эксперимента;

k — число факторов эксперимента;

q_i — число уровней i -го фактора, $i=1, 2, \dots, k$.

Одна информационная точка эксперимента определяется как простейший эксперимент в случае одного фактора и одного уровня, т. е. $k = 1$, $q = 1$, $N_s = 1$ и соответствует одному прогону на имитационной модели. *План эксперимента в общем случае определяет* количество различных информационных точек, которые должны служить действительными измерителями отклика имитационной модели. Подобные планы могут быть либо совершенными, либо несовершенными. План называется совершенным, если в измерении отклика участвуют все информационные точки

$$N = pq^k, \text{ где}$$

p - число повторений экспериментов;

q - число уровней факторов;

k - число факторов (входных параметров и переменных).

Выбор параметров q , k , p определяется целями эксперимента, точностью измерений факторов, интересом к нелинейным эффектам и т. п. На этот выбор не должна влиять ограниченность числа возможных измерений, возникающая вследствие ограниченности ресурсов.

Однако в имитационном эксперименте существует ограничение на ресурс, поэтому при планировании и выборе допустимого числа прогонов N необходимо установить компромисс между имеющимися ресурсами и желаниями.

Планирование эксперимента по имитационному моделированию, как и другие проблемы планирования, требует систематического подхода. Разработка плана эксперимента включает ряд шагов, в ходе которых экспериментатор должен ответить на ряд важных вопросов. Для выбора плана эксперимента следует определить критерии планирования эксперимента. В качестве основных *критериев планирования* рассматриваются: отклик, число варьируемых факторов, число уровней, необходимое число измерений переменной отклика.

Первый шаг при планировании состоит в *выборе переменной отклика* (целевой функции, параметра оптимизации), который определяется целями проводимого исследования. Это означает, что мы должны решить, какие отклики интересуют нас в первую очередь, т. е. какие величины необходимо измерить, чтобы получить искомые ответы. При рассмотрении методов планирования в этой главе мы будем иметь дело в основном с однокритериальными задачами. Основные требования к параметру оптимизации: он должен быть эффективным с точки зрения достижения цели, универсальным, количественным, статистически эффективным, простым и легко вычисляемым, существующим при различных состояниях и ситуациях.

Второй шаг: *выделение существенных факторов*. После выбора интересующих нас переменных откликов мы должны определить факторы, которые могут влиять на эти переменные. Обычно число таких факторов довольно велико, и потому необходимо выделять среди них несколько наиболее существенных. К сожалению, чем меньше мы знакомы с системой, тем больше таких факторов, которые, как нам представляется, способны, влиять на отклики. Известно, что,

как правило, степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании. Большинство систем работает в соответствии с принципом Парето, который гласит, что с точки зрения характеристик системы существенны лишь некоторые из множества факторов. Действительно, в большинстве систем 20% факторов определяют 80% свойств системы, а остальные 80% факторов определяют лишь 20% ее свойств. Наша задача - *выделить существенные факторы*. Предварительная процедура в имитационном моделировании, которая упрощает эту задачу – анализ чувствительности имитационной модели.

После определения переменных отклика и выделения существенных факторов необходимо классифицировать эти факторы в соответствии с тем, как они войдут в будущий эксперимент.

Каждый фактор может входить в эксперимент тремя способами:

- фактор может быть постоянным и тем самым играть роль граничных условий эксперимента (в имитационной модели это входные переменные и константы);
- фактор может быть переменным, но неуправляемым и вносить тем самым вклад в ошибки эксперимента (в имитационной модели это, как правило, внешние, экзогенные переменные);
- фактор может быть измеряемым и управляемым. Для построения плана эксперимента важны факторы третьего вида. В имитационной модели это – управляемые параметры.

Основные требования к факторам: управляемость (это позволяет реализовать активный эксперимент) и однозначность. Требования к совокупности факторов: выбранное множество должно быть достаточно полным; точность фиксации факторов должна быть достаточно высокой; совместимость и отсутствие линейной корреляции, независимость факторов, т.е. возможность установления факторов на любом уровне, вне зависимости от уровней других факторов.

Необходимо понимать важность проводимых на этой стадии процесса моделирования и экспериментирования рассматриваемых факторов. Исследователю необходимо знать, какие переменные ему понадобятся измерять и контролировать в процессе планирования и проведения эксперимента.

Следующий шаг разработки плана эксперимента состоит в *определении уровней*, на которых следует измерять и устанавливать данный фактор. На это влияет точность измерения, интерес к нелинейным эффектам.

Минимальное число уровней фактора, не являющегося постоянным, равно двум. Очевидно, что число уровней следует выбирать минимально возможным и в то же время достаточным для достижения целей эксперимента. Каждый дополнительный уровень увеличивает стоимость эксперимента, и следует тщательно оценивать необходимость его введения. Выбор для каждого фактора одинакового числа уровней (в особенности если уровней всего два-три) дает определенные аналитические преимущества. Такие структурные модели *симметричны* и имеют вид

$$N=q^k.$$

Уровни могут быть:

- *качественные* или *количественные*;
- *фиксированные* или *случайные*.

Количественной называется переменная, величина которой может быть измерена с помощью некоторой интервальной или относительной шкалы. Примерами могут служить доход, загрузка, цена, время и т. п. *Качественной* же называется переменная, величина которой не может быть измерена количественно, а упорядочивается методами ранжирования. Примерами качественных переменных могут служить способ организации, решающие правила, тип очереди в системах массового обслуживания, стратегии в системах принятия решений и т.п. Качественный фактор по своей сути принимает ряд возможных уровней, хотя мы для удобства обозначаем уровни качественного фактора цифрами 1, 2, 3 или буквами *A, B, C*, мы должны помнить, что подобное упорядочение произвольно, так как качественные уровни нельзя измерять с помощью количественной шкалы.

Для количественного фактора необходимо выделить интересующую нас область его изменения и определить степень нашей заинтересованности нелинейными эффектами. Если нас интересуют только линейные эффекты, достаточно выбрать два уровня количественной переменной на концах интервала области ее изменения. Если же исследователь предполагает изучать квадратичные эффекты, он должен использовать три уровня. Соответственно для кубического случая необходимы четыре уровня и т. д. *Число уровней равно минимальному числу точек, необходимых для восстановления полиномиальной функции.*

Анализ данных существенно упрощается, если сделать уровни равноотстоящими друг от друга. Такое расположение позволяет рассматривать *ортогональное разбиение* и тем самым упрощает определение коэффициентов полиномиальной функции. Поэтому обычно две крайние точки интересующей нас области изменения количественной переменной выбирают как два ее уровня, а остальные уровни располагают так, чтобы они делили полученный отрезок на равные части.

Термин *фиксированные уровни* означает, что мы управляем уровнями квантования или устанавливаем их. Если уровни квантования выбираются случайно (например, с помощью метода Монте-Карло), то уровни называются *случайными*. План эксперимента может содержать как фиксированные, так и случайные факторы.

Чтобы определить необходимое число измерений переменной отклика экспериментатор должен ответить также на ряд вопросов:

а) Следует ли выявить взаимное влияние различных факторов и оценивать эффект взаимодействия?

Эффектом взаимодействия можно назвать комбинированное влияние на отклик двух или более факторов, проявляющееся помимо индивидуального влияния всех этих факторов по отдельности. На практике это приводит к нелинейным эффектам при построении регрессионных моделей;

б) Каков характер имеющихся ограничений: ограничено время на исследования, ограничены средства или машинное время на проведение машинных прогонов?

в) Какова требуемая точность результатов моделирования?

Факторный анализ, полный и дробный факторный эксперимент.

В однофакторном эксперименте нас интересовало влияние на отклик одного фактора. Рассмотрим теперь случай наличия двух и более факторов, влияние которых на отклик должен исследовать экспериментатор.

Один из традиционных методов исследований многофакторных экспериментов состоит в фиксации всех факторов, кроме одного, на некоторых уровнях и вариации уровней этого фактора. При такой схеме факторы изменяются и исследуются поочередно. Наиболее эффективен в планировании *симметричный полный факторный эксперимент*, план которого приведен в таблице 34. *Факторным экспериментом называется такой эксперимент, в котором все уровни данного фактора комбинируются со всеми уровнями всех других факторов.* Под «симметричностью» понимается одинаковое количество уровней для всех факторов.

Основные достоинства факторного анализа:

- простота применения и интерпретации;
- максимальная эффективность метода исследования (факторный анализ позволяет получить требуемую информацию при заданной точности с меньшими затратами, т.е. количество требуемых экспериментов меньше);
- если имеют место взаимодействия между факторами – то их можно правильно идентифицировать и интерпретировать эти взаимодействия (важно в задачах интерпретации);
- результаты справедливы, как правило, в более широком диапазоне условий (т.к. влияние фактора оценивается при нескольких уровнях других факторов).

Если число уровней каждого фактора 2, то имеем полный факторный эксперимент типа 2^k - он наиболее прост в планировании. Требуемое количество машинных прогонов $N = 2^k$, k – число факторов, 2- число уровней.

В планировании эксперимента используют кодированные значения факторов: +1, -1 (1 опускают для простоты). Условия эксперимента описывают в виде таблицы – *матрицы планирования* эксперимента: вектор – строки матрицы соответствуют № прогона, вектор – столбцы – значениям факторов.

Таблица 3.4 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_1	X_2	Y
1	- 1	- 1	y_1
2	+ 1	- 1	y_2
3	- 1	+ 1	y_3
4	+ 1	+ 1	y_4

Геометрическая интерпретация полных факторных планов в кодированном двухфакторном пространстве имеет вид:

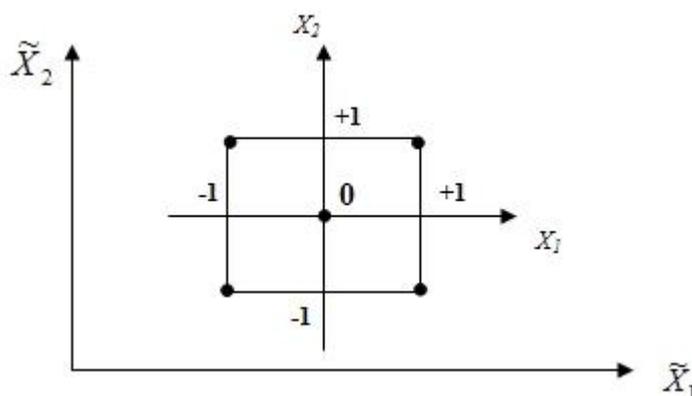


Рисунок 3.4 – Геометрическая интерпретация полных факторных планов 2^2 .

В области определения факторов (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2), найдем точку, соответствующую основному уровню, и проведем оси координат. Вершины квадрата соответствуют опытам, каждая сторона равно двум интервалам. Площадь, ограниченная квадратом называется областью определения эксперимента. В задачах интерполяции – это область предсказываемых значений y .

План 2^2 задается координатами вершин квадрата.

Геометрической интерпретацией полного факторного эксперимента 2^3 служит куб, координаты вершин которого задают условия прогонов.

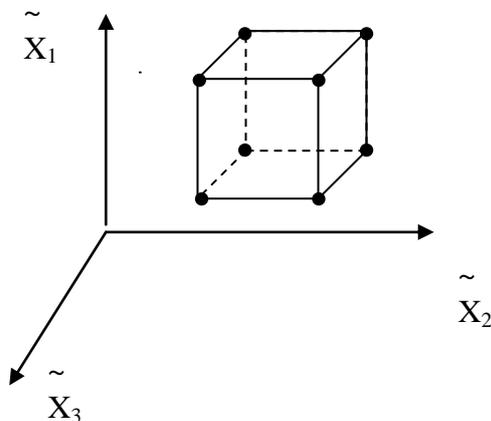


Рисунок 3.5 – Геометрическая интерпретация полных факторных планов 2^3 .

При $k > 3$ – план определяется координатами вершин гиперкуба.

Свойства полного факторного эксперимента. Полный факторный эксперимент типа 2^k обладает свойствами: *симметричности, нормировки, ортогональности, рототабельности:*

1. *Симметричность* относительно центра эксперимента:

Алгебраическая сумма элементов вектор-столбца каждого фактора равна 0.

$$\sum_{i=1}^N X_{ji} = 0, \text{ где}$$

$j=1, \dots, k$ – номер фактора,

N – число опытов.

2. *Условие нормировки:* сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов, или

$$\sum_{i=1}^N X_{ji}^2 = N$$

(т.к. значения факторов в матрице задаются +1, -1)

Первые два свойства вытекают из построения матрицы планирования, это свойства отдельных столбцов матрицы планирования. Теперь остановимся на свойствах совокупности столбцов.

3. *Ортогональность* матрицы планирования: сумма почленных произведений любых двух вектор-столбцов матрицы равна 0.

$$\sum_{i=1}^N X_{ji} X_{ui} = 0, \quad j \neq u, j, u = 0, 1, 2, \dots, k$$

4. *Рототабельность* (для линейной модели), т.е. точки в матрице планирования подбираются так, что точность предсказания значений параметра оптимизации одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента и не зависит от направления.

Следующий вопрос – как оценить нелинейность, пользуясь полным факторным экспериментом. Часто встречающийся вид нелинейности в математических моделях связан с тем, что эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор – так называемый *эффект взаимодействия*. При оптимизации стремятся сделать эффекты взаимодействия меньше, при интерполяции – важно их выявить.

Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия, пользуясь правилом перемножения столбцов. Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^2 с учетом эффекта взаимодействия будет иметь вид:

Таблица 3.5– Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^2 с учетом эффекта взаимодействия.

№ опыта	X_1	X_2	$(X_1 X_2)$	Y
1	-1	-1	+1	Y_1
2	+1	-1	-1	Y_2
3	-1	+1	-1	Y_3
4	+1	+1	+1	Y_4

Матрица планирования эксперимента составлена с помощью приема, развитого в теории планирования эксперимента: последняя колонка получена умножением соответствующих элементов в столбцах X_1 и X_2 . Все свойства матрицы планирования сохраняются, теперь математическая модель выглядит:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

b_{12} вычисляется обычным образом. Необходимо оценить 4 параметра (эффекта).

Теперь не составляет труда составить матрицу планирования для полного факторного эксперимента 2^3 : значения получаются перемножением столбцов (таблица 7.5.3.).

Таблица 3.6. – Полный факторный эксперимент 2^3 .

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	-	-	+	+	-	-	+	Y_1
2	+	-	-	-	-	+	+	Y_2
3	-	+	-	-	+	-	+	Y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	Y_4
5	-	-	-	+	+	+	-	Y_5
6	+	-	+	-	+	-	-	Y_6
7	-	+	+	-	-	+	-	Y_7
8	+	+	-	+	-	-	-	Y_8

Эффект взаимодействия 2-х факторов называется эффектом взаимодействия 1-го порядка (парные эффекты взаимодействия); порядок на единицу меньше числа факторов. Здесь присутствуют тройные эффекты взаимодействия $x_1x_2x_3$.

Неполный факторный анализ. В полном факторном эксперименте разность между числом опытов и числом коэффициентов велика. Надо уменьшать число опытов. Эксперимент 2^7 уже содержит 128 прогонов (и это без повторов): $2^7 = 128$

Таблица 3.7 Количество прогонов в полном факторном эксперименте

k	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
N	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	

С ростом числа факторов k число комбинаций переменных растет, растет число взаимодействий высокого порядка. Это демонстрируется в таблицах 3.7 и 3.8. (Полное число взаимодействий равно C_k^m , где k - число факторов, m - число элементов во взаимодействии).

Таблица 3.8 Количество главных эффектов и эффектов взаимодействий в полном факторном эксперименте

k	2^k	Число главных эффектов	Число взаимодействий				
			1й порядок	2й порядок	3й порядок	4..	5...
5	32	5	10	10	5	1	
6	64	6	15	20	15	6	1
7	128	7	21	35	35	21	7
8	256	8	28	56	70	56	28

При больших k появляются взаимодействия очень высоких порядков. Часто на основе априорных и общих соображений их предполагают пренебрежимо малыми. Т.к. взаимодействия высоких порядков соответствуют членам высокого порядка в регрессионном полиноме, – члены высокого порядка полагаются равными нулю, и считается, что полином низкого порядка дает адекватного регрессионное уравнение. А если некоторые эффекты предполагаются равными нулю, то мы не обязаны делать наблюдение во всех экспериментальных точках, можно сделать только часть точек – т.е. поставить *дробный факторный эксперимент*.

Оказывается, что если нас не интересуют взаимодействия высокого порядка, мы можем получить достаточное количество информации с помощью исследования лишь некоторой части (1/2, 1/4, 1/8 и т.д.) всех возможных комбинаций (реализовать часть экспериментальных точек или дробный факторный эксперимент).

Неполным факторным планом называется план эксперимента, если в факторном эксперименте производится лишь часть всех возможных повторений. Такой эксперимент называется дробным факторным экспериментом, а его матрица планирования – *дробной репликой*.

Всякий раз, когда мы используем выборку меньшую, чем этого требует полный факторный план, мы платим за это риском смешивания эффектом. Под смешиванием мы понимаем то, что статистик, измеряя один эффект, в то же время измеряет, возможно, и некоторый другой эффект. Например, если главный эффект смешивается с взаимодействиями более высокого порядка, то эти два эффекта уже невозможно отделить друг от друга. Т.е., если наш анализ показывает наличие некоторого эффекта, то мы не можем с уверенностью сказать, главный ли это эффект, или эффект взаимодействия, или некоторая аддитивная комбинация этих эффектов. Поэтому экспериментатору необходимо выбирать эффективную стратегию экспериментирования. При построении неполного факторного плана экспериментатор должен определить эффекты, смешивание которых он может допустить. Вообще говоря, лучше спутать взаимодействия высокого порядка, чем главные эффекты. Обычно, можно надеяться, что взаимодействия высокого порядка отсутствуют, и можно получить разумную информацию о главных эффектах или взаимодействиях низкого порядка. Эффективная стратегия экспериментирования или успех неполного факторного эксперимента достигается в случае, если его план позволяет не смешивать ни один главный эффект с другим. Эффективность применения дробных реплик зависит от удачного выбора системы смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия.

Когда 2 или более эффекта смешиваются, то говорят, что они являются *совместными*.

При построении дробных реплик используют *правило*: для того, чтобы сократить число опытов при введении в планирование нового фактора, нужно поместить этот фактор в вектор столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь. Тогда значение нового фактора в условиях опытов определяется знаками этого столбца.

Таблица 3.9 - Пример.

X_1	X_2	$X_3=(X_1X_2)$	Y
-	-	+	Y_1
+	-	-	Y_2
-	+	-	Y_3
+	+	+	Y_4

Поясним на примере. Пользуясь планом (табл.3.5.), можно вычислить 4 коэффициента и представить результаты:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

Если предположить и считать, что в выбранных интервалах варьирования процесс может быть описан линейной моделью, то достаточно определить 3 коэффициента: b_0, b_1, b_2 .

Для минимизации числа опытов, предполагаем $b_{12} \rightarrow 0$, столбец x_1x_2 используется для нового фактора x_3 . Но теперь оценки будут смешанные. Оценки смешаются следующим образом:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}$$

Это так называемые *смешанные эффекты* или *эффекты, оцениваемые совместно* (вместе). Однако основные эффекты оцениваются отдельно друг от друга. Мы постулируем линейную модель, значит все парные взаимодействия предполагаем незначимыми:

$$b_1 \cong \beta_1; b_2 \cong \beta_2; b_3 \cong \beta_3.$$

Главное, что удалось минимизировать число опытов – вместо 8 опытов для 3 факторов можно поставить 4. При этом матрица планирования не потеряла своих свойств (ортогональность, ротатабельность и т.п.) – в этом вы можете самостоятельно убедиться.

Таким образом, поставив 4 опыта для оценки влияния 3-х факторов, мы воспользовались половиной полного факторного эксперимента 2^3 , т.е. «полурепликой». Если $x_3 = -x_1x_2$, то получили бы 2-ую половину матрицы 2^3 (см. табл.7.5.3.), объединение этих 2-х полуреplik есть полный факторный эксперимент 2^3 . Есть две полуреплики 2^{3-1} : 1 случай – когда x_3 приравниваем к x_1x_2 ; 2 случай – x_3 приравниваем к $-x_1x_2$.

Для обозначения дробных реплик, в которых p линейных эффектов приравнены к эффектам взаимодействия, используют условные обозначения 2^{k-p} . Например, полуреплика от 2^6 – обозначается 2^{6-1} . Бывают реплики большей дробности (см. табл.3.10). Например, при 15 факторах можно в 2048 раз сократить число опытов, применяя реплику большей дробности

(поставить 16 опытов вместо 32768). Реплики, которые используются для сокращения опытов в 2^m раз, где $m=1,2,3,4,\dots$ называются *регулярными* и пользуются популярностью, т.к. расчет коэффициентов производится также просто, как в случае полного факторного эксперимента.

Таблица 3.10 – Примеры дробных реплик.

		Число опытов	
		Дробная реплика	Полный факторный эксперимент
$\frac{1}{2}$ реплики от 2^4	2^{4-1}	8	16
$\frac{1}{2}$ реплики от 2^5	2^{5-1}	16	32
$\frac{1}{4}$ реплики от 2^6	2^{6-2}	16	64
$\frac{1}{8}$ реплики от 2^6	2^{6-3}	8	64
$\frac{1}{2048}$ реплики от 2^{15}	2^{15-11}	16	32768

При применении дробных реплик линейные эффекты смешиваются с эффектами взаимодействия. Чтобы определить систему смешивания, надо знать *определяющие контрасты и генерирующие соотношения*.

Символическое обозначение произведения столбцов, равного +1 или -1, называется *определяющим контрастом*.

Контраст помогает определять *смешанные эффекты*. Для того, чтобы определить какой эффект смешан с данным, нужно помножить обе части определяющего контраста на столбец, соответствующий данному эффекту.

Так, если $I = x_1x_2x_3$, то

$$X_1 = x_1^2x_2x_3 = x_2x_3 \text{ (т.к. } x_1^2 = 1).$$

$$X_2 = x_1x_2^2x_3 = x_1x_3$$

$$X_3 = x_1x_2x_3^2 = x_1x_2$$

Это значит, что коэффициенты линейного уравнения будут оценками

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}$$

Соотношение, показывающее, с каким из эффектов смешан данный эффект, называется *генерирующим соотношением*.

Полуреплики, в которых основные эффекты смешаны с двухфакторными взаимодействиями, носят название планов *с разрешающей способностью III*. (по наибольшему числу факторов (символов) в определяющем контрасте). Обозначают такие планы 2^{3-1}_{III} . Разрешающая способность плана равна наименьшему числу символов в коде определяющего контраста. Эффективность реплики зависит от системы смешивания реплики, планы, у которых линейные эффекты смешаны с взаимодействиями наивысшего порядка, являются наиболее эффективными, т.к. обладают наибольшей разрешающей способностью.

Основные классы планов, применяемые в вычислительном эксперименте.

Рассмотрим основные классы планов, применяемые в вычислительном эксперименте.

Планы многофакторного анализа.

На практике применяют следующие типы планов:

- *Планы разрешающей способности III*: ни один главный эффект не смешан ни с каким другим главным эффектом, но главные эффекты смешаны с двухфакторными взаимодействиями, которые смешаны друг с другом.
- *Планы разрешающей способности IV*: ни один главный эффект не смешан с другим главным эффектом или взаимодействием двух факторов, но эти взаимодействия смешаны друг с другом.
- *Планы разрешающей способности V*: ни один главный эффект и ни одно взаимодействие 2-х факторов не смешаны с другими главными эффектами или двухфакторными взаимодействиями, но эти взаимодействия смешаны с взаимодействиями трех факторов.

Рассмотренные *планы многофакторного анализа и дробные реплики типа 2^{k-p}* применяются для получения *линейных моделей*. Они наиболее популярны, и поэтому подробно рассмотрены нами.

Планы отсеивающего эксперимента.

Если k велико, число комбинаций все-таки остается большим даже при неполном факторном плане (2^{k-p}), –тогда используются *планы отсеивающих экспериментов*. «Отсеивающий эксперимент» предполагает предварительное отсеивание, определение наиболее важных (существенных) факторов и используется на стадии предварительного исследования.

Хорошие оценки индивидуальных эффектов могут быть получены с помощью *случайных планов*, которые не требуют специальных методов анализа, - применяются традиционные методы дисперсионного и регрессионного анализа. В этих планах комбинации уровней факторов случайно (рандомизация) отбираются среди всех возможных комбинаций. Число комбинаций N может быть определено независимо от числа факторов и уровней. (N может быть, например, $< k$) .

Планы для изучения поверхности отклика.

В имитационном моделировании используется технология *последовательного планирования*. Аналогичные типы планов, основанные на последовательном планировании используются в методологии анализа поверхности отклика (см. следующий раздел), которая предназначена для отыскания оптимальной комбинации уровней k количественных факторов. Дело в том, что в почти стационарной области желательно аппроксимировать поверхность отклика по меньшей мере полиномом второго порядка. Для этой цели проводится эксперимент *квадратичного приближения*. Ниже приведен общий вид квадратичного полинома (второго порядка) для случая двух независимых переменных

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{12} x_1 x_2$$

Для оценивания коэффициентов регрессии в этой модели необходимо измерить каждый фактор или переменную по меньшей мере на *трех* уровнях. Это означает необходимость использования полного 3^n -факторного эксперимента или же неполного факторного эксперимента. К сожалению, в случае более чем трех переменных число необходимых прогонов может стать слишком большим даже при использовании неполного факторного эксперимента. Кроме того, эксперимент с 3^n комбинациями дает довольно низкую точность оценок коэффициентов регрессии.

Для квадратичных полиномов используют специальные способы построения эксперимента. Из них наиболее полезны *центральные композиционные*, или *ротатабельные*, построения, которые получаются посредством добавления дополнительных точек к данным, полученным из 2^n -факторного эксперимента. Для ротатабельных построений стандартная ошибка одинакова для равноудаленных от центра области точек. Такие построения существуют для любого числа факторов и представляют собой регулярные и полурегулярные геометрические фигуры с центральными точками. Приведем некоторые планы, полезные для анализа поверхности отклика.

Весьма простое и полезное построение, называемое *куб плюс звезда плюс центральные точки*, приведено для случая двух переменных на рисунке 3.6. Отметим, что это 2^2 эксперимент (куб), плюс четыре дополнительные точки (звезда), расположенные на равном расстоянии друг от друга в плоскости по окружности с центром $(0,0)$, плюс центральные точки. Тот же самый принцип, но применительно к 3-факторному эксперименту, иллюстрируется на рис. 3.7.

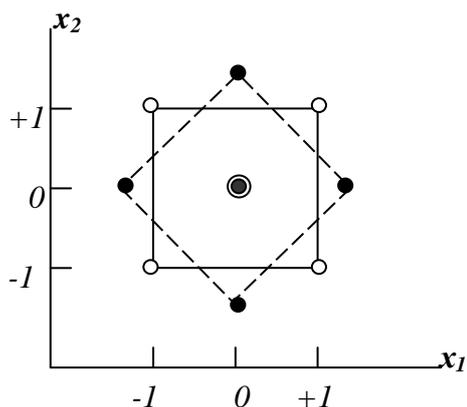


Рисунок 3.6. – 2^2 -факторный план плюс звезда и центральные точки.

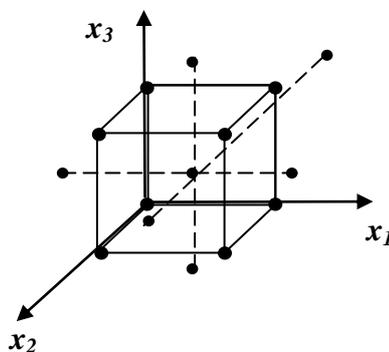


Рисунок 3.7 – 3^2 -факторный план плюс звезда и центральные точки.

Другое полезное ротатабельное построение, называемое *гексагональ плюс центральные точки*, приведено на рисунке 3.8.

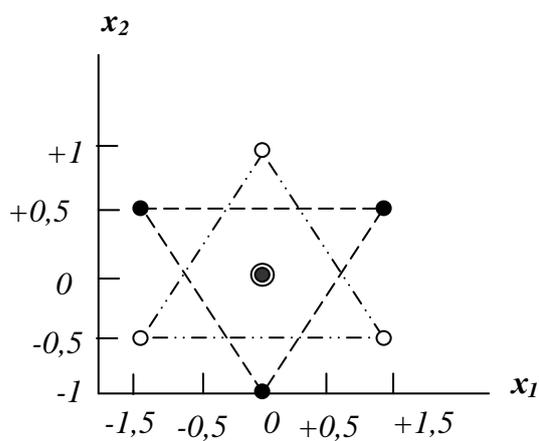


Рисунок 3.8. – Гексагональный план.

Известны и другие типы планов: латинские квадраты, квадраты Юдена, сбалансированные блоки и др.

На практике может быть полезен план Бокса В2 в кодированном двухфакторном пространстве, иллюстрированный на рисунке 3.9.

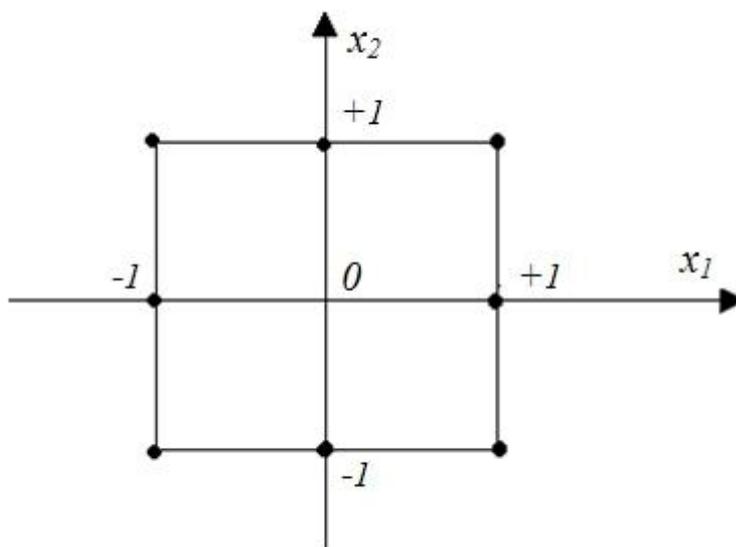


Рисунок 3.9. – План Бокса В2.

Методология анализа поверхности отклика.

Методология анализа поверхности отклика полезна для реализации третьего типа вычислительного эксперимента, связанного с решением задачи оптимизации.

Во многих случаях целью моделирования является отыскание таких величин или уровней независимых переменных, при которых отклик или зависимая переменная достигает оптимальных (максимальных или минимальных) значений. Если зависимая и независимая переменные количественны и непрерывны, то для решения задачи поиска оптимума обычно используется *методология поверхности отклика (RSO)*, которая состоит в отыскании оптимальной комбинации уровней k -количественных факторов.

Если обозначить зависимую переменную через y , а независимые переменные через (x_1, x_2, \dots, x_k) , где k — число факторов, и предположить, что все переменные *количественны, непрерывны* и измеримы, то уравнение поверхности отклика можно записать в следующем виде:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Очень полезно иметь геометрическое представление поверхности отклика. На рисунке 3.10 изображена поверхность отклика, отображающая зависимость отклика y от двух независимых переменных x_1 и x_2 в прямоугольной системе координат.

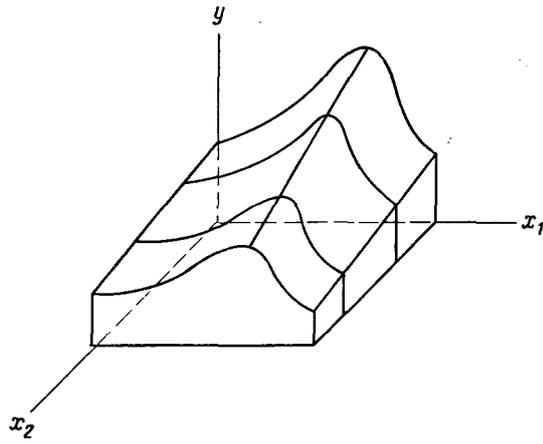


Рисунок 3.10 – Поверхность отклика.

Другое полезное представление поверхности отклика можно получить, изображая на плоскости $x_1 x_2$ проекции на нее линий постоянного отклика $y=y_0$, проведенных на поверхности отклика (контуры отклика). Ряд примеров подобных представлений приведен на рисунках 3.11, 3.12, 3.13, 3.14.

(Такое изображение поверхностей отклика аналогично изображению на топографических картах рельефа местности посредством контуров равной высоты или изображению на картах погоды изобар, показывающих распределение атмосферного давления на поверхности Земли.)

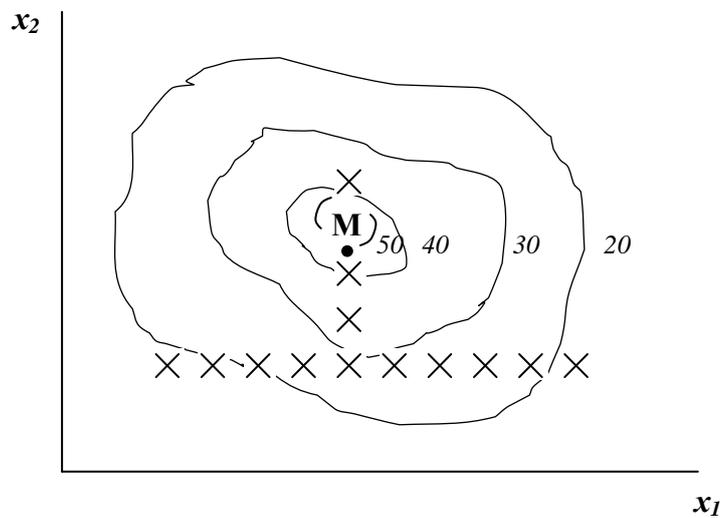


Рисунок 3.11 – Типичные контуры отклика: «Холм».

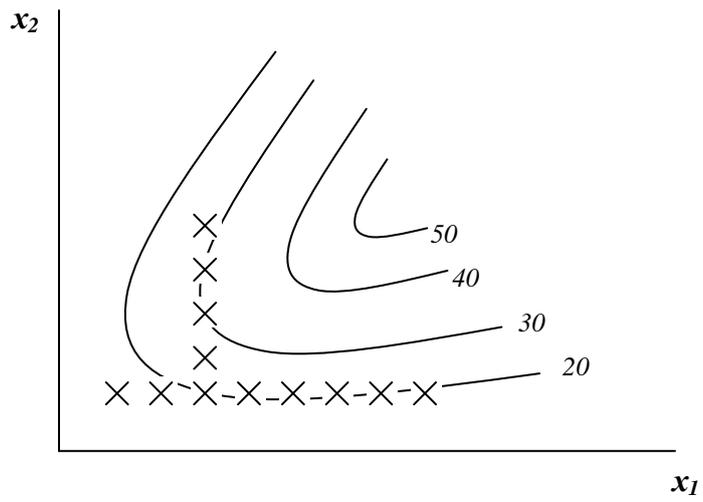


Рисунок 3.12 – Типичные контуры отклика: «Поднимающийся гребень».

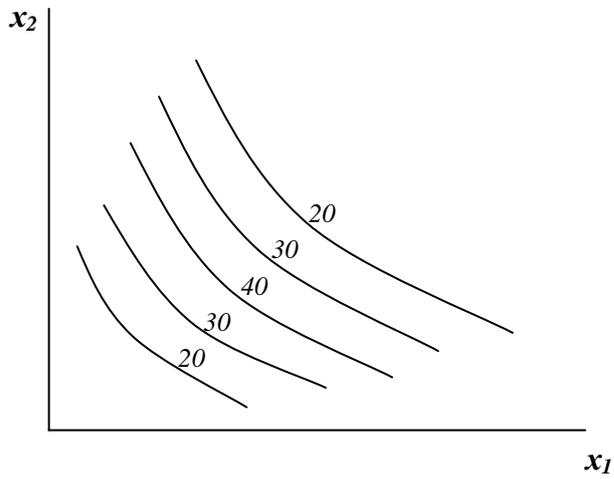


Рисунок 3.13 – Типичные контуры отклика :«Гребень постоянной высоты».

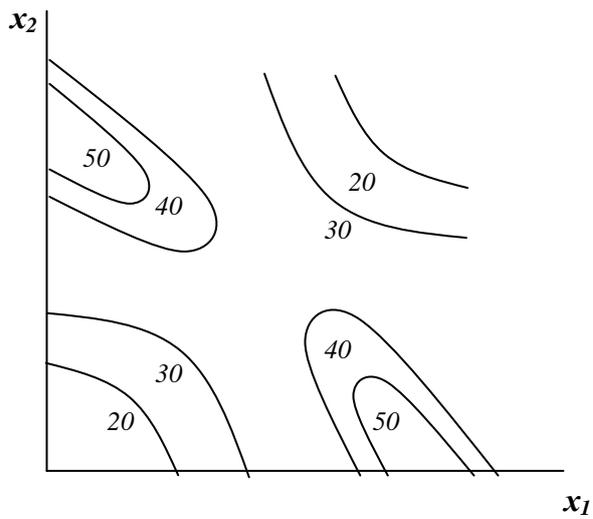


Рисунок 3.14 – Типичные контуры отклика: «Минимум», или «Седло».

Каждая линия соответствует постоянному значению параметра оптимизации и является проекцией сечений поверхности отклика на плоскость. Такая линия называется *линией равного отклика*. На рисунке 3.11. точка M – та точка оптимума, которую мы ищем.

Безусловно, геометрические представления поверхности отклика ограничены трехмерными изображениями. Однако геометрическое представление трехмерных поверхностей отклика вида $y=f(x_1, x_2)$ помогает понять, что происходит в более общем случае — при k независимых переменных. Поэтому дальше мы ограничимся рассмотрением трехмерных поверхностей отклика.

Методология анализа поверхности отклика обычно основана на исследовании поверхности отклика с помощью ряда небольших полных или неполных факторных экспериментов, используется технология *последовательного планирования*. Такого рода последовательные планы в методологии анализа поверхности отклика реализуются на основе пошаговой процедуры движения к точке оптимума.

Сделаем небольшое пояснение. Если известно точное математическое выражение функции отклика, то отыскание оптимальной точки можно сравнительно просто осуществить аналитическими методами. Так как обычно мы не знаем вид поверхности отклика, то необходимо использовать в качестве аппроксимации какую-либо гибкую, плавно изменяющуюся функцию. В качестве такой функции обычно используют полином первого порядка или полином второго порядка, где коэффициенты этого полинома оцениваются с помощью эксперимента.

В этом случае задача экспериментального исследования состоит в разрешении двух вопросов:

- как можно быстрее выйти в близкую к оптимуму область,
- а затем воспользоваться аналитическими методами локального представления этой функции в окрестности точки оптимума.

Первый из них связан с выбором такого направления перемещения для проведения следующего эксперимента, чтобы приблизиться к оптимальной точке. К точке оптимума (вернее в область оптимума) надо придти наискорейшим образом – для этого используется метод наискорейшего подъема (или *крутое восхождение по поверхности отклика*). С этой целью реализуются планы 2^k или 2^{k-p} , используется линейная регрессия.

Второй вопрос возникает тогда, когда мы уже находимся в достаточной близости к точке экстремума. Этот второй вопрос — *вопрос о виде уравнения поверхности отклика вблизи оптимальной точки*. Можно воспользоваться аналитическими методами для локального представления этой функции в окрестности точки оптимума. Вблизи точки оптимума линейная

аппроксимация перестает быть удовлетворительной, и используется полином более высокого порядка. Для этого необходимо использовать планы 3^k и др., – и квадратичные полиномы.

Предлагаемая концепция решения задачи оптимизации условно включает 2 этапа:

1 этап – крутое восхождение с целью скорейшего достижения области оптимума. Используется линейное планирование и реализуется пошаговая итерационная процедура движения в направлении градиента.

Однако область оптимума не может быть описана линейным приближением.

2 этап – описание области оптимума методами нелинейного планирования и исследование почти стационарной области.

Давайте подробнее рассмотрим эти 2 задачи.

Крутое восхождение по поверхности отклика. Одним из традиционных методов поиска оптимума (максимума) является *метод по координатного подъема*. Как показано на рисунке 3.11, если зафиксировать x_2 и варьировать x_1 , то мы можем найти максимум по x_1 при фиксированном значении x_2 . Зафиксировав x_1 в найденной точке максимума, будем искать максимум по x_2 . В случае поверхности отклика как на рисунке 3.11, этот метод за два шага приведет в близкую к оптимуму точку. Однако в случае поверхности вида рисунка 3.12 этот метод не приведет в точку оптимума. Обычно вид поверхности отклика неизвестен, поэтому желательно иметь такой метод поиска оптимума, который работал бы при неизвестной форме поверхности отклика.

Наиболее часто используется так называемый *метод наискорейшего подъема или крутого восхождения по поверхности отклика*. Наиболее короткий путь к вершине – направление градиента функции отклика, на рисунке 3.15. – это направление Q , перпендикулярное линиям уровня. Это так называемый *градиентный метод* поиска оптимума. Вы знаете, что, градиент непрерывной однозначной функции

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + e_i \quad (i=1, N)$$

есть частная производная функции Y

$$\partial Y / \partial x_j = \beta_j \quad (j=1, k)$$

Составляющие градиента суть частные производные функции отклика, оценками которых являются коэффициенты регрессии.

Основная идея метода состоит в построении линейной аппроксимации поверхности отклика в окрестности данной точки с помощью простого факторного эксперимента. По построенной линейной функции определяется направление наискорейшего подъема к точке оптимума – в направлении градиента функции отклика. По этому направлению делается небольшой шаг, затем повторяется процедура определения направления наискорейшего подъема и т.д.

Этот метод не позволяет определять длину шага (длина шага определяется экспериментатором, она не должна быть очень большой, чтобы не проскочить оптимум, и не должна быть очень маленькой - чтобы не проводить большое количество шагов), однако показывает направление движения.

Рассмотрим пример, приведенный на рисунке 3.15.

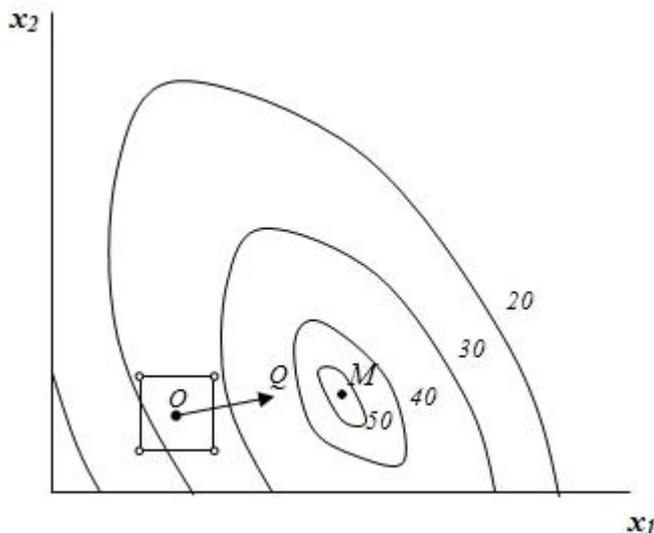


Рисунок 3.15 – Контуры отклика с изображением 2^2 -факторного плана.

Предположим, что исследователь провел в точке O эксперимент с 2^2 комбинациями плюс два наблюдения в центре. Эксперимент позволил оценить коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 , определяющие наклон плоскости аппроксимации, и вычислить направление наискорейшего возрастания функции отклика или максимального наклона плоскости. Это направление показывает относительные величины изменения факторов, обеспечивающие увеличение отклика. Продвинувшись по этому направлению до некоторой точки Q , следует повторить всю процедуру.

Такая пошаговая процедура позволяет достигать все больших и больших откликов. Итак, изменяя независимые переменные пропорционально коэффициентам регрессии (с учетом их знаков), мы будем двигаться в направлении градиента функции отклика по самому крутому пути. Поэтому процедура движения к почти стационарной области называется *крутым восхождением*.

Техника расчета крутого восхождения. Технику расчета крутого восхождения удобно рассмотреть для простейшего случая – одного фактора (рис 3.16).

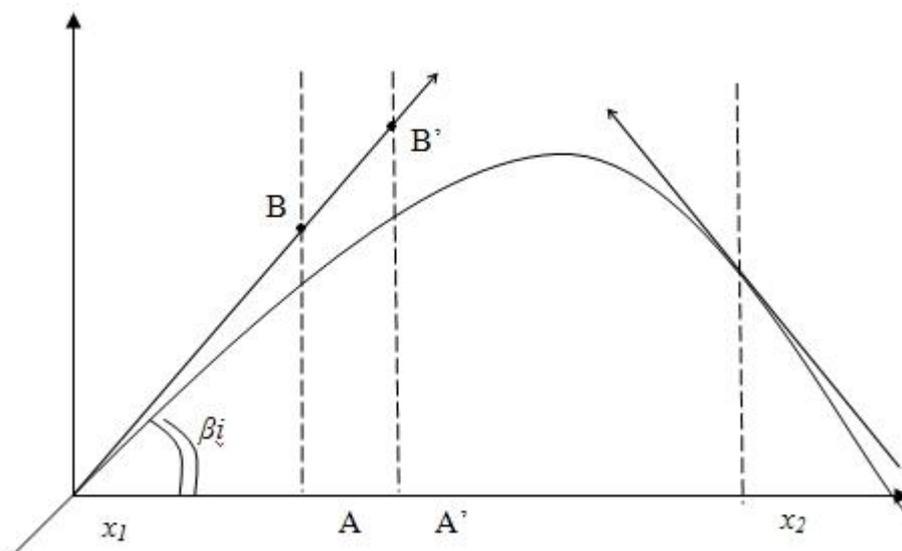


Рисунок 3.16 – Расчет координат точек в направлении градиента.

Значение коэффициента регрессии равно tg угла наклона между линией регрессии и осью данного фактора. Если tg умножить на интервал варьирования OA , то получим катет AB , где B – координаты точки, лежащие на градиенте. Обобщение на k -факторов делается механически, коэффициенты умножаются на соответствующие интервалы. Получаются точки, лежащие на том же градиенте.

Расчет крутого восхождения производится по следующему правилу. В крутом восхождении независимые переменные изменяют пропорционально величинам коэффициентов регрессии и с учетом их знаков. Составляющие градиента однозначно получаются умножением коэффициентов регрессии на интервалы варьирования по каждому фактору. Серия опытов (называются мысленными) в направлении градиента рассчитывается последовательным прибавлением к основному уровню факторов величин, пропорциональных составляющим градиента.

Шаг движения по градиенту выбирается экспериментатором, если сделаете его минимальным - придется проводить много опытов при движении к оптимуму, максимальным – можно проскочить оптимум.

Величины составляющих градиента определяются формой поверхности отклика и тем, как выбран параметр оптимизации, нулевая точка и интервалы варьирования. Знак составляющих градиента зависит от формы поверхности отклика и положения нулевой точки x_0 . Итак, если для данной поверхности отклика (предполагается, что один оптимум) выбраны нулевая точка и интервалы варьирования, проведен эксперимент, оценены коэффициенты линейной регрессии, то направление градиента задается однозначно и является единственным.

Далее в эксперименте реализуются мысленные опыты (обычно только те, условия которых выходят за область эксперимента хотя бы по одному фактору). *Крутое восхождение эффективно*, если реализация мысленных опытов на стадии крутого восхождения улучшило значение параметра оптимизации по сравнению с самым хорошим результатом в матрице планирования. Потом выполняется анализ на достижение оптимума, а если оптимум найден, окончание исследования и переход к исследованию почти стационарной области, или совершается следующий цикл крутого восхождения.

Таким образом, процедура поиска оптимума основана на шаговом принципе. Выбираем некоторую точку в факторном пространстве и сначала исследование проводим внутри малой подобласти. В данной точке факторного пространства планируем эксперимент: проводятся короткие (небольшие, насколько возможно) серии прогонов, по их результатам строят математическую модель (линейную регрессию). Полученную модель используют для оценки градиента (направления движения к оптимуму). А далее делается небольшой шаг в направлении градиента и ставят новые эксперименты (вне нашей подобласти) в этом направлении и т.д. Получается циклический процесс, который заканчивается при попадании в область, близкую к оптимуму. Такая область называется *«почти стационарной»*.

Многошаговая итерационная процедура, реализуемая на основе методологии анализа поверхности отклика условно включает следующие этапы:

1. Планирование эксперимента, т.е. выбор комбинаций уровней факторов. Методика использует полные и дробные типа 2^{k-p} планы эксперимента и некоторые специальные планы.
2. Подбор уравнения регрессии по наблюдениям. Отклик рассматривается как функция независимых переменных. Уравнение линейной регрессии описывает поверхность отклика в некоторой точке (нулевой или центральной).
3. «Влезание» по поверхности отклика к вершине. Для нахождения направления увеличения отклика служит метод «крутого восхождения». В направлении, где ожидается увеличение отклика, этапы 1,2,3 повторяются до тех пор, пока не будет достигнута область максимума.
4. Исследование почти стационарной области с помощью полиномов 2-го порядка.
5. Канонический анализ в области максимума функции отклика. Канонический анализ показывает, имеется ли один максимум, несколько максимумов, седловая точка или гребень.

Давайте теперь подробнее остановимся на заключительных этапах, связанных с анализом «почти стационарной» области.

Хотя последовательное использование эксперимента с 2^n комбинациями и измерениями в центральной точке не дает возможность точно определить точку оптимума, оно, однако, позволит исследователю быстро найти окрестность точки оптимума, которую можно назвать *почти стационарной областью*. Однако вблизи точки оптимума описанная пошаговая процедура уже не эффективна. Вблизи точки оптимума линейная аппроксимация перестает быть удовлетворительной, и для аппроксимации необходимо брать полином более высокого порядка. По достижении такой области необходимо исследовать вид в ней поверхности отклика, чтобы определить более точно оптимальную точку. Для этой цели обычно используются аппроксимации полиномами второго и более высокого порядка. Переход к полиномам высокого порядка вызывается существенной потерей точности аппроксимации полиномом первого порядка. В разделе по планированию экспериментов мы рассмотрели специальные планы для анализа поверхности отклика.

Канонический анализ. Тот факт, что достигнута почти стационарная область, не означает, что мы находимся вблизи точки максимума, как это имеет место на рисунке 3.17.a (также см. рис. 3.17.б). Мы можем при этом находиться на медленно поднимающемся гребне, как на рисунке 3.12 (также см. рис. 3.17.б), или на гребне постоянной высоты, как на рисунке 3.13 (также см. рис. 3.17.в). При движении по градиенту возможны различные ситуации:

- параметр оптимизации проходит через максимум (рис.3.17.a),
- параметр оптимизации все время возрастает (рис.3.17.б),
- все опыты на градиенте имеют одно и то же значение (рис. 3.17.в). Поверхность отклика имеет вид *постоянного гребня*;
- более сложный случай: нарушена предпосылка одноэкстремальности (рис.3.17.г). Возможно, что мы достигли окрестности минимаксной точки (иногда называемой седловой точкой), которая является точкой максимума по одним направлениям и точкой минимума по другим (рис. 3.14.). Появление седловой точки может сообщить нам полезную информацию о том, что наша поверхность отклика имеет два или более максимума, и, следуя методу скорейшего подъема, мы можем найти не глобальный, а некоторый локальный, второстепенный максимум.

Метод наискорейшего подъема не гарантирует сходимость в точку глобального максимума. В какую именно точку максимума сойдется построенная с его помощью последовательность, зависит от начальных условий эксперимента. Если предполагается наличие нескольких максимумов, то один из основных способов отыскания глобального максимума — это повторное применение метода наискорейшего подъема с меняющимися в широкой области начальными условиями. То есть надо продвинуться в другую точку факторного пространства, построить линейный план нового цикла крутого восхождения. Хотя такой случай и возможен, в реальных условиях обычно имеется единственный максимум, и это упрощает дело.

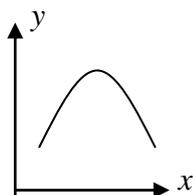


Рисунок 3.17.а.

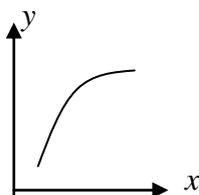


Рисунок 3.17.б.

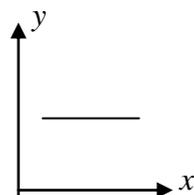


Рисунок 3.17.в.

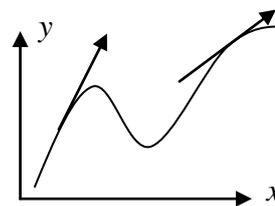


Рисунок 3.17.г.

Рисунок 3.17 – Канонический анализ поверхности отклика.

Вопросы для самопроверки.

1. Представьте в качестве объекта моделирования любую экономическую систему или производственное предприятие. Осуществите в общем виде декомпозицию системы на основные подсистемы, в процессе композиции поясните характер взаимодействия подсистем. Сформулируйте основные цели моделирования, оперируя такими категориями, как анализ, прогнозирование, сравнение альтернатив, оптимизация и выбор.
2. На примере производственной системы, как объекта управления, поясните основные свойства сложных систем, выделите наиболее существенные процессы и свойства объекта управления и исследования
3. Какие технологии используются при составлении имитационной модели?
4. Перечислите основные этапы технологического цикла создания и испытания имитационных моделей
5. Опишите любую проблемную ситуацию из области экономики или управления. Сформулируйте проблему, проведите формирование общей структуры системы и выявление значащих факторов, обоснуйте задачи моделирования и применимость метода имитационного моделирования.
6. Какие полезные процедуры позволяют подтвердить достоверность разработанной имитационной модели.
7. Какие задачи решает системный аналитик на этапе анализа исходных данных моделирования.
8. Что общего в процедурах оценки адекватности и верификации имитационной модели.
9. Что является мерой точности полученных результатов моделирования и как можно повысить точность оценки результатов моделирования.

10. Как процедуры анализа чувствительности влияют на процесс разработки имитационной модели, а также планирование и организацию вычислительных экспериментов.
11. Какие задачи решаются при тактическом планировании имитационного эксперимента.
12. Как определить необходимое число прогонов имитационной модели.
13. В чем основная проблематика стратегического планирования вычислительного эксперимента. Какие два основных критерия определяют эффективность такого планирования?
14. Каким образом поставленные цели моделирования определяют общую структуру имитационной модели? Интерпретируйте на примере.
15. Каким образом поставленные цели моделирования определяют содержание и методы обработки результатов направленного вычислительного эксперимента на имитационной модели? Интерпретируйте на примере.
16. Можно ли с помощью имитационного моделирования исследовать влияние факторов, и как, и в чем отличие такого подхода от традиционного факторного анализа в математической статистике.
17. Можно ли с помощью имитационного моделирования решать задачу поиска оптимального варианта или решения, как, и в чем отличие такого подхода от традиционных методов оптимизации в исследовании операций.
18. Поясните суть, содержание и преимущества сценарного подхода в имитации.
19. На каких этапах имитационного моделирования полезна и с какими целями применяется анимация и визуализация имитационной модели.
20. В чем состоит преимущество использования языков и систем моделирования по сравнению с универсальными языками программирования.
21. В чем основное назначение систем моделирования. Перечислите основные классификационные признаки коммерческих симуляторов.
22. Как в современных симуляторах реализуется объектно-ориентированный подход в проектировании программных систем.
23. Какие технологические возможности соответствуют симуляторам 3 и 4 поколений?
24. Какие ИТ-технологии применяются в современных коммерческих симуляторах, как это влияет на возможности метода имитационного моделирования.
25. Какими дополнительными возможностями должен обладать предметно-ориентированный симулятор (например, системы моделирования производственных систем, медицинского обслуживания, транспортных систем и т.п.).
26. Какие факторы влияют на выбор симулятора при решении конкретных задач.
27. Какие стандартные функции моделирования выполняет система моделирования.

28. Какие переменные имитационной модели соответствуют переменным уровням и откликам при планировании эксперимента? Какие требования предъявляются к этим переменным при планировании?
29. Чему равно минимальное число уровней фактора и какие соображения влияют на выбор необходимого числа уровней?
30. В чем основные достоинства факторного анализа и его преимущества перед классическим экспериментированием?
31. Постройте матрицу планирования полного факторного эксперимента 2^2 и приведите его математическую модель.
32. Какие стратегии экспериментатор применяет при переходе от полного факторного эксперимента к неполному.
33. Приведите матрицу планирования по плану Бокса и его математическую модель. В каких задачах и методах планирования имитационного эксперимента полезно применение этих планов?
34. Постройте матрицу планирования 2^3 и образуйте от нее «полуреплику», приведите обозначение полученной дробной реплики, с помощью определяющего контраста и генерирующего соотношения поясните механизм образования неполного факторного эксперимента.
35. Постройте матрицу планирования 2^3 и получите неполный факторный эксперимент на основе случайного плана. Сравните эффективность планирования с дробной репликой 2^{3-1}
36. В каких задачах анализа поверхности отклика поверхность отклика аппроксимируется линейным полиномом, в каких – квадратичным?
37. Как определить в условиях имитационного эксперимента направление движения к точке оптимума?
38. Какими соображениями необходимо руководствоваться, выбирая шаг движения по поверхности отклика при «крутом восхождении»?
39. Отметьте основные слабости и ограничения в применении методологии анализа поверхности отклика при решении задач оптимизации.
40. В каких случаях в имитационных экспериментах для анализа результатов моделирования следует применять дисперсионный анализ, а в каких – регрессионный.
41. Какие статистические методы и процедуры применяются в имитационном исследовании на различных этапах создания и использования имитационных моделей.
42. С какой целью осуществляется канонический анализ поверхности отклика?

Глава 4. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

4.1 Наиболее существенные приложения дискретного имитационного моделирования в операционном и производственном менеджменте, логистике.

В настоящем параграфе рассмотрим наиболее существенные и распространенные приложения дискретного, процессно-ориентированного подхода имитационного моделирования в операционном и производственном менеджменте, логистике. В заключении обзора остановимся на концепции и основах реализации современного Цифрового производства (*e-Manufacturing*). Наиболее популярные направления применения дискретного имитационного моделирования в менеджменте:

- Моделирование бизнес-процессов на основе современных техник имитационного моделирования;
- Имитационное моделирование дискретных производственных систем;
- Логистика складских комплексов;
- Комплексное управление логистическими процессами на основе *Simulation Software*;
- Управление цепочками поставок;
- Цифровое производство.

Прикладные аспекты имитационного моделирования требуют корректной экономической постановки задач управления и понимания специфики применения имитационного моделирования в конкретной предметной области, оценки особенностей реализации моделей и проводимых на них исследований в зависимости от объекта моделирования и задач исследования, чему в настоящем параграфе автор уделяет особенное внимание.

Моделирование и анализ поведения бизнес-процессов.

Принцип имитационного моделирования бизнес-процессов получил достаточно большое распространение и приобрёл большую популярность сначала на Западе, а в последнее время активно применяется и в России. В отличие от традиционных CASE-средств, дающих статические «снимки» бизнес-ситуаций и бизнес-процессов, имитационная модель способна показать целостную картину развития ситуации во времени, продемонстрировать или выявить скрытые тенденции, предоставить возможность оперативно проанализировать последствия принимаемых решений, оценить влияние различных факторов случайного характера и цену риска, выполнить расширенный ABC-анализ.

Сегодня перспективный топ-менеджмент начинает проявлять все больший интерес к нетрадиционным методологиям и подходам, ситуационному анализу принятия решений, возможностям прогнозирования нетривиального поведения бизнес-процессов на самых ранних, преинвестиционных фазах развития проектов.

Рост масштабов управления, внедрение ERP, MRP-систем, сложность оргструктур, приводит к пониманию, что любой бизнес-процесс – не просто набор функций и структур, а процесс, обладающий поведенческой сложностью, - отсюда проблематика реинжиниринга, предполагающая фундаментальное переосмысление и радикальную перестройку бизнес-процессов компании.

Программные продукты, поддерживающие имитационное моделирование, интегрируют достоинства структурных и объектно-ориентированных технологий в рамках CASE-средств, позволяют проанализировать проблемные ситуации с самых обобщенных концептуальных позиций, современные технологии обеспечивают легкоинтерпретируемый идеографический интерфейс, возможность быстрого прототипирования структурных и функциональных схем бизнес-процессов

Концепция имитационного моделирования становится все более популярной для решения как тактических задач анализа поведения бизнес-процессов, так и при стратегическом планировании самых разнообразных управленческих ситуаций. На российском рынке получили хождение несколько решений, основанные на интеграции CASE-технологий и различных техник дискретного имитационного моделирования: *BPWin* – симулятор *Arena*, *ARIS Simulation* и симулятор *QUEST* (методология *IDEF03*). Применение техник имитационного моделирования расширяет возможности традиционных CASE-средств и обеспечивает:

- визуализацию бизнес-процессов, возможности проводить анализ узких мест в динамике;
- возможности сбора и анализа количественных (временных и стоимостных) показателей эффективности бизнес-процессов,
- проведение ABC-анализа с привязкой к процессам в реальном времени,
- выполнение реинжиниринга, сравнение по количественным показателям вариантов «как есть» и «как должно быть» (с применением статистических тестов);
- оптимизацию бизнес-процессов с применением развитых генетических алгоритмов.

Имеется положительный опыт применения системной динамики на актуальные задачи реинжиниринга, например, процессное моделирование организационной деятельности. Сегодня системную динамику и инструменты с комфортабельным идеографическим интерфейсом (*iThink*, поддерживающий нотации на основе методологии Гейна-Сарсона, *Powersim*) используют при решении разнообразных задач инжиниринга и реинжиниринга бизнес-процессов. Особое значение подход приобретает на ранних стадиях реализации широкомасштабных проектов при оценке нетривиальных управленческих ситуаций. Топ-менеджмент интересуется развитием всего бизнеса.

Как разобраться в его функционировании на основе соответствующих моделей бизнес-процессов, и выдвинуть предложения по их совершенствованию? Необходимо понимание природы деловых ситуаций. Возникающие проблемы требуют изучения взаимодействий, степени их воздействия на эффективность бизнес-процессов и плодотворность процедур принятия стратегических решений.

Бизнес процессы всегда существуют в контексте рыночных отношений. При организации бизнес-процессов объектом внимания все чаще становится синергетический фактор, когда повышение эффективности осуществляется за счет взаимовлияния деятельности, участвующих в таких интегрированных бизнес-процессах, как бизнес-процесс разработки нового изделия и вывода его на рынок, бизнес-процесс сбыта и снабжения, бизнес-процесс обслуживания клиентов и т.п.

Имитационные модели всегда динамические – это позволяет исследовать поведение моделируемого бизнес-процесса как развивающегося процесса по определенной траектории в течение некоторого периода модельного времени, что позволяет предсказывать будущие состояния, тенденции развития с учетом их взаимодействия и влияния факторов внешней среды в условиях неопределенности. Бизнес-процессы, подобно сложным организационным структурам, характеризуются скорее не отдельными элементами, а отношениями между ними, не статическим бытием, а постоянным развитием. Системная динамика декларирует, что именно взаимодействия раскрывают поведенческую сложность и определяют нетривиальное поведение организационных структур, которые поддаются целенаправленному управлению. Системная динамика концентрирует внимание на взаимодействиях, возникающих в схемах рефлексивных контуров обратных связей, а управление взаимодействиями предлагает интерпретировать эффектами срабатывания соответствующих процедур принятия решений, трансформирующего ресурсный потенциал организаций.

Технология системной динамики предлагает средства полуконцептуального проектирования бизнес-процессов, позволяет формировать динамические варианты управленческих ситуаций «AS-IS» (как есть) и «TO-BE» (как должно быть) на ранних стадиях реализации проектов реинжиниринга. Бизнес-процесс может быть описан в терминах перемещающихся ресурсов, анализа взаимодействующих фондовых потоков. В модели выделяют наиболее важные аспекты поведения бизнес-процесса: управление персоналом, управление финансами, обслуживание клиентов, управление качеством.

Имитационное моделирование дискретных производственных систем.

В сфере промышленного производства имитационное моделирование применяется шире, чем в любой другой. Это объясняется многими причинами:

- Современные компьютеризованные производственные системы и оборудование очень дорогостоящие и сложные, что требует их анализа с помощью моделирования;

- Наличие анимации, визуализирующей течение процесса, и информации, полученной на основе имитационной модели, способствует лучшему пониманию менеджерами по производству сути происходящих процессов и последствий принимаемых решений.

С помощью имитационной модели можно провести анализ узких мест, что обусловлено динамической природой имитационной модели, устранить их, выявить имеющиеся проблемы, предложить решения по повышению производительности, сокращению временных потерь и стоимостных затрат на эксплуатацию производственной системы. Главная польза от применения имитационного моделирования производственных систем заключается в том, что оно позволяет менеджеру получить представление о влиянии «локальных» изменений в масштабе всей производственной системы. Если изменение вносится на некоторой рабочей станции, его влияние на работу этой станции будет вполне предсказуемым, а заранее определить, каким образом оно скажется на работе системы в целом, будет затруднительно. Имитационная модель позволяет провести анализ влияния изменений в плане на интегральные характеристики системы. Благодаря приемам блочного моделирования, можно создать полную модель всей производственной системы и провести на ней испытания задолго до реального воплощения на предприятии на ранних стадиях проектирования. Имитационное моделирование используется для анализа, планирования и оптимизации производственных систем. Имитационная модель предоставляет возможность оценки и сравнения большого количества альтернатив построения системы и использования сложных и множественных стратегий управления (управления ресурсами, персоналом, запасами, транспортировкой и др.) и сценариев работы производства, сложных управляющих алгоритмов и бизнес-правил, с целью выбора оптимальных.

Под *дискретными производственными системами* будем понимать производственные системы, процессы, в которых оперирование выполняется над отдельными деталями, полуфабрикатами, узлами и т.п. Могут рассматриваться производственные процессы, связанные как с производством штучных изделий, так и поточное производство.

Дискретные имитационные модели производственных процессов применяются для решения широкого класса задач на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях планирования.

Стратегическое планирование. Задачи этого класса встают перед проектировщиками в случае создания новых или модернизации существующих производств. Основной целью является оценка функционирования производственной системы на больших временных интервалах (обычно от недели до года) и вычисление основных производственных показателей. По результатам моделирования принимается решение о типах и количестве единиц оборудования, о топологии системы и правилах организации материалопотоков. Имитационная модель является основой принятия инвестиционных решений и выбора варианта модернизации производственной системы,

оценки возможностей развития системы или внедрения таких подходов, как «just-in-time», «just-in-sequence», инструментом проигрывания сценариев «что-если» без вмешательства в реальный процесс, например, при переходе на новый тип изделия или в условиях расширения номенклатуры выпускаемых изделий, наращивания производственной мощности или замены существующего оборудования на более технологичное.

Тактическое планирование подразумевает решение таких задач, как:

- оценка текущего состояния и эффективности функционирования действующей производственной системы;
- анализ узких мест на производстве;
- выбор рациональной организационно-технологической структуры, включая формирование и синхронизацию основных материальных потоков в пределах производственной системы, выбор необходимого состава оборудования и рабочих ресурсов для выполнения технологического процесса.

Например, при формировании портфеля заказов, может потребоваться оценка того, как в условиях привлечения дополнительных заказов выполняется соответствие фактических сроков выполнения заказов плановым ограничениям.

Оперативное и календарное планирование означает построение графика производства на короткий период времени – от часов до дней. С помощью имитационной модели осуществляется текущее планирование, составление расписания загрузки технологического оборудования, разрабатывается оперативно-плановое задание или сменно-суточное задание для персонала, выполняется расчет графика поступления заказов (деталей) и оснастки производственного участка, решаются задачи диспетчирования (способы и правила назначения деталей на обработку), формируются оптимальные технологические маршруты прохождения деталей в процессе производства и т.п.

Основой для решения каждого из перечисленных типов задач может служить одна и та же имитационная модель производственной системы, детализированная и настроенная с учетом особенностей решаемого класса задач. Так, для решения стратегических задач, потребуются временные характеристики процессов, заданные с помощью усредненных параметров распределения соответствующих характеристик. Для тактического планирования потребуется сбор и обработка статистики по временным процессам, показателям надежности оборудования, полученной с реальной системы. Для оперативного планирования параметры надежности и статистические распределения параметров теряют свою актуальность и заменяются на графики использования основных ресурсов производства и движения материальных потоков.

Кроме общих преимуществ имитационного моделирования, существует множество потенциальных плюсов его использования при исследованиях производственных систем, позволяющих не только оценить, но и *повысить эффективность функционирования систем*, за счет:

- Увеличение производительности (числа деталей, выпускаемых в единицу времени),
- Сокращение времени пребывания деталей в системе;
- Уменьшение запасов деталей в процессе производства;
- Увеличение занятости, сокращение простоев станков и рабочих;
- Обеспечение своевременной доставки комплектующих и оснастки к производственным местам;
- Сокращение потребностей в капитале (земля, производственные помещения, станки и т.п.) или эксплуатационных расходов (затрат на выполнение процессов, хранение, транспортировку и др.).

Моделирование помогает успешно решать ряд специальных производственных проблем, *оценивать управленческие решения*, которые можно разделить на три общие категории:

Оценка потребностей в ресурсах (оборудование и персонал) и их рациональное использование:

- количество, тип и расположение станков для выполнения определенной задачи (например, выпуск 1000 деталей в неделю);
- требования к погрузочно-разгрузочным устройствам и другому вспомогательному оборудованию (например, поддоны и приспособления для закрепления);
- расположение складских площадей и объем материально-производственных запасов;
- оценка изменений в объеме продукции или ассортименте изделий (например, влияние новых товаров);
- оценка влияния установки нового оборудования (например, робота) в существующую производственную линию;
- оценка капиталовложений и затрат на эксплуатацию; снижение инвестиций в новое производство;
- число смен, разработка регламентов.

Оценка производительности:

- анализ производительности;
- анализ времени пребывания в системе и непроизводительного времени;
- анализ недостатка ресурсов.

Оценка технологических операций, различных стратегий и сценариев работы:

- технологическое проектирование и производственное планирование (например, оценка предлагаемых режимов выдачи заказов цеху, определение объемов партии продукции,

загрузка деталей на рабочую станцию и установление последовательности прохождения деталями рабочих станций в системе);

- стратегии синхронной работы (синхронизация материалопотоков в контуре производственной системы)
- стратегии управления запасами комплектующих деталей или сырья;
- стратегии управления транспортировкой (например, для конвейерного устройства или автоматизированной транспортной системы);
- анализ надежности (например, влияние надежности оборудования на работу производственной системы, профилактического обслуживания);
- политики контроля качества.

Концептуальные основы имитационного моделирования дискретных производственных систем. В концептуальной схеме модели производственной системы выделяют описание производственного процесса - движущихся единиц материальных потоков, которые объединяются в общей структуре производственной системы на основе определенных операционных правил. Рассмотрим базовые составляющие, основные элементы моделируемых производственных систем.

1.Производственный процесс. Производственный процесс, как правило, расчленяется на отдельные производственные операции, или элементы (рабочие места, агрегаты). Примеры типичных производственных операций: обработка детали, сборка изделия, контроль качества изделия, упаковка .

Выделенная производственная операция, в зависимости от задач моделирования, может относиться к некоторому конкретному производственному оборудованию или описывать совокупность производственных операций, выполняемых группой оборудования. Сущность любой технологичной операции – ее выполнение над каким-то изделием или полуфабрикатом, связанное с изменением свойств этого изделия. Свойства изделий могут быть описаны характеристиками или атрибутами, а выполнение операции над ними может быть связано с изменением этих характеристик, описывающих состояние (свойства) заготовок, полуфабрикатов, изделий и т.п.

Таким образом, *каждая производственная операция может рассматриваться как преобразователь следующего вида (рис.8.1.1), определяющий изменение характеристик изделия во времени.*

Элементы производственных систем делятся на следующие классы:

- элементы, где согласно условиям производства имеет место целенаправленное изменение состояния продукции (обточка, пайка, фрезер, монтаж и т.д.);
- элементы, в которых не происходит изменение состояния продукции (транспортёры, склады, манипуляторы и т.п.);

- элементы, в которых исследуется состояние продукции (контроль, тестирование, поиск неисправностей и т.п.).

На практике, при реализации алгоритмов имитационных моделей, различают 3 абстрактные операции:

Операция обработки: например, резание, ковка, штамповка – операции, связанные с изменением свойств детали; транспортировка, повороты – изменением положения детали в производстве, а также остывание, высыхание, окисление (последние не являются операциями в обычном смысле слова).

Операция сборки– акт производственного процесса над совокупностью полуфабрикатов (в операции участвуют не менее двух полуфабрикатов), в результате изменяется состояние ведущего полуфабриката за счет присоединения к нему ведущих.

Алгоритмические или операционные правила при описании операции сборки:

- момент наступления операции зависит от наличия всех полуфабрикатов;
- по окончании операции остается один полуфабрикат (копии активностей сщепляются).

Операция управления - регулирование, подача полуфабрикатов к станку в зависимости от длины и элементов очереди. В производственных системах применяют метод приоритетных очередей и другие действия, связанные с контролем хода производства (операция может выполняться как устройством, так и оператором).

Важный параметр производственной операции - *длительность процесса (T)*, который может быть:

- детерминированным – в этом случае жестко определяются закономерности синхронизации отдельных операций в данном производственном процессе (например, для станков с ЧПУ);
- случайным - задается в модели функцией распределения времени выполнения операции со случайным отклонением.

Также различают процессы:

- с постоянной длительностью;
- с переменной длительностью.

В общем случае операция выполняется на специальном станке и характеризуется временем выполнения операции $F(T)$ – случайной величиной, вероятностные характеристики которой зависят от параметров станка и полуфабриката (например, время металлорезки зависит от размера детали, длительность горячей штамповки – от температуры и т.д.).

Итак, для любой производственной системы в первую очередь определяется состав ее элементов, а также типы распределений длительности процессов для всех элементов и параметры законов этих распределений.

Эти абстрактные элементы называют *элементами оборудования* (станки, однотипные машины, рабочие места, элементы обработки, а также транспортировки и хранения). Могут рассматриваться устройства, связанные с загрузкой машины деталями, обработкой, диагностикой, транспортные элементы, промежуточные склады и т.п., которые выполняют производственные операции, операции обработки деталей и характеризуются задержками времени и затратами на выполнение операций.

При описании производственной системы задаются следующие основные характеристики (переменные) элементов оборудования:

- число станков;
- индивидуальные отношения (номер станка – номер операции);
- функция распределения времени обработки.

2. *Материальный поток в производственно- технологической системе.* Производственный продукт, проходя в направлении от входа к выходу, образует материальный поток. Движущие единицы материальных потоков - детали, заказы, комплекты, партии деталей, которые должны пройти соответствующую обработку. Их преобразование от начального состояния к конечному является основной функцией производственной системы.

Основная характеристика материального потока – *интенсивность потока*. В имитационной модели задаются:

- моменты поступления партии деталей в систему (случайные, детерминированные);
- атрибуты деталей (полуфабрикатов):
 - количественные: размер, вес, температура и др.,
 - качественные характеристики, признаки полуфабриката (окрашен/нет, годен/брак и др.).

Некоторые характеристики деталей могут меняться по ходу производственной системы. Материальные потоки могут быть нескольких типов (не только детали, но и оснастка, транспортные средства и др.)

Основные характеристики материальных потоков:

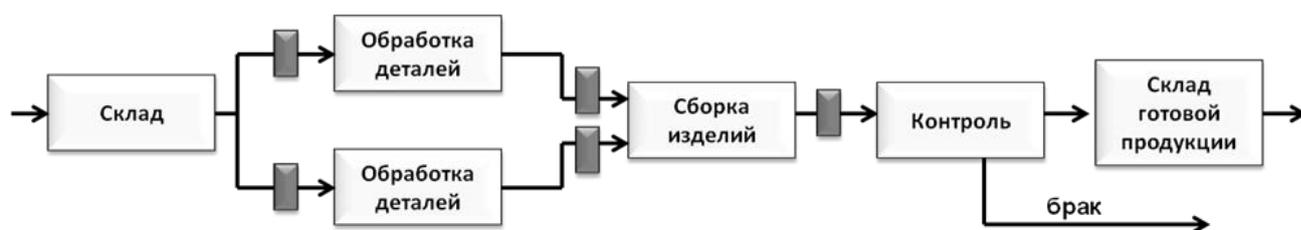
- типы деталей;
- приоритеты (в задачах диспетчирования) и другие атрибуты;
- временные характеристики материальных потоков (функция распределения времени между поступлениями партии деталей на обработку).

3. *Элементы производственной системы объединяются в ее структуру. Это объединение реализуется на основе материального потока.* Взаимодействие материальных потоков и элементов

оборудования описывается в имитационной модели на основании различных операционных правил, определяющих:

- маршрутные технологии;
- правила для последовательности обработки заказов из очереди на обработку на данной группе станков;
- порядок обработки деталей одного типа на станке (строго фиксированный - каждая очередная операция выполняется на определенном станке, свободный – на любом доступном станке из множества станков);
- способ назначения деталей из партии на очередную обработку (последовательный, параллельный, последовательно- параллельный) и другие.

Полная модель производственной системы включает все ее элементы (или производственные операции), в том числе буферные склады, материальный поток и структуру (рис. 4.1.).



где:



Рисунок 4.1. – Концептуальная схема модели производственной системы.

Существует несколько критериев, показателей эффективности работы, получаемых при изучении производственной системы посредством моделирования, а именно:

- Производительность;
- Количество выпущенных изделий, прошедших обработку; объем готовой продукции;
- Размер прибыли, стоимость незавершенного производства, материальные издержки, с учетом стоимости используемых в процессе производства ресурсов, с учетом брака, потерь от сбоев, простоя оборудования;
- Время пребывания деталей в системе или среднее время, затрачиваемое на обработку всех видов деталей (продолжительность производственного цикла);
- Время выполнения заказа, текущие затраты (или трудоемкость) выполнения заданного объема работ;

- Время межоперационного пролеживания, продолжительность пребывания деталей в очередях (время пролеживания деталей) за весь цикл производства или на отдельных фазах производственного процесса (т.е. на отдельных операциях, рабочих местах (станках), буферных складах);
- Продолжительность транспортировки;
- Своевременность доставки (например, доля задержавшихся заказов), продолжительность ожидания транспортировки;
- Объем запасов деталей в процессе производства (незавершенное производство или размеры очередей);
- Потери времени, связанные с простоем станков или их ожиданием (в совокупности и по группам) - доля времени, когда станок сломан, простаивает (в ожидании поступления деталей с предыдущей рабочей станции), заблокирован (в ожидании, когда будет убрана деталь, обработка которой завершена) или проходит профилактическое обслуживание;
- Загрузка - степень использования совокупного ресурса (или ресурса времени групп станков);
- Доля бракованных деталей (или деталей с исправимым или неисправимым браком).

Моделирование случайности в производственных системах. В общем случае, производственная система рассматривается при моделировании как *стохастическая система*.

Отклонения течения производственного процесса от нормального связано с тремя стохастическими факторами, которые обычно учитываются в имитационной модели:

Расстройство режима синхронизации (возмущения, которые приводят к потерям рабочего времени в производстве и непредвиденным простоям технологического оборудования). Особенности протекания производственных процессов могут быть связаны с различными нарушениями:

- ожидание, образование очереди деталей у занятых станков;
- простои станков из-за отсутствия деталей или задержек в поступлении деталей;
- сбои в работе транспортных средств, несвоевременная поставка заготовок, сырья, следствием является непоступление заготовок на производственный участок в срок (исчерпание заделов и запасов на складе);
- невыполнение норм: если фактические параметры операции не соответствуют нормативным, то это может привести либо к срыву производства, либо к браку продукции.

В общем случае время выполнения производственной операции является случайной величиной и задается функцией распределения.

Брак, что связано с потерями времени и сырья в производственных системах. В алгоритме имитационной модели задается, как правило, на операции контроля *вероятность выхода брака*, моделируется случайное событие – получение годного/бракованного полуфабриката.

В общем случае вероятность брака зависит от параметров полуфабриката и параметров станка (например, сколько времени прошло после переналадки).

Надежность оборудования. Важный источник случайности в производственных системах связан с поломками станков и внеплановыми простоями (отвлечение рабочих на другие задания, поломка станка, отсутствие оснастки и др.). Данный фактор приводит к расстройству нормального режима функционирования производственного процесса.

Процессы, связанные с переналадкой оборудования, также обычно моделируются. В общем виде в имитационной модели задаются законы распределения времени безотказной работы оборудования и времени восстановления и моделируются процессы выхода оборудования из строя и его восстановления.

Основные источники случайности и случайные величины в моделях производственных систем:

- Время поступления заказов, деталей или сырья;
- Время обработки, сборки или проверки;
- Время безотказной работы станка;
- Время ремонта станка;
- Время погрузки и разгрузки;
- Время наладки, необходимое, чтобы перестроить станок для обработки другого типа деталей;
- Вероятность исправления брака;
- Процент выхода годных изделий.

Специализированное программное обеспечение моделирования производственных систем.

Существует немало проблемно-ориентированных пакетов моделирования производственных систем: *Auto Mod, ProModel, Taylor Enterprise Dynamics, Witness, Arena, Quest, eM-Plant*. Основными их преимуществами является снижение сроков разработки, упрощение разработки имитационной модели. С их помощью имитационную модель может создавать специалист, занимающийся технологическим проектированием. Проблемно-ориентированные коммерческие симуляторы содержат набор конструкций и абстрактных объектов, из которых строится модель производственной системы, определяемых непосредственно в предметной области производственных систем. Для примера рассмотрим абстрактные конструкции имитационных моделей производственных систем для ряда наиболее распространенных симуляторов этого класса:

Основные моделирующие конструкции системы моделирования *Auto Mod*:

- *Нагрузки* - детали в производственной системе;
- *Ресурсы* – представляют станки и рабочих, которые обрабатывают детали;
- *Очереди* – представляют места, где расположены детали, ожидающие поступления к ресурсам или транспортировки;
- *Процессы* - представляют логику, связанную с определенным аспектом имитационной модели (например, для контроллера - отношения между очередью, ресурсом и логикой определения качества детали).
- *Транспортировка материалов и деталей* – включает в себя конвейеры (транспортеры, накопители и др.), автопогрузчики, автоматизированные транспортные системы, автоматизированные системы хранения и поиска.
- *Конструкции резервуаров и труб* для моделирования систем с непрерывным потоком (например, химическое производство).

Основные моделирующие конструкции системы моделирования *ProModel*:

- *Участки* с обозначенными границами – используются для моделирования станков, очередей, конвейеров и резервуаров;
- *Объекты* – представляют детали, сырье или информацию;
- *Поступления* - определяют, как детали поступают в систему;
- *Процессы* – определяют маршруты деталей в системе, а также указывают, какие операции выполняются с каждой деталью в определенном помещении (маршруты задаются с помощью графики);
- *Ресурсы* - используются для моделирования статичных или динамичных ресурсов, например рабочих или автопогрузчиков.

Основные моделирующие конструкции системы моделирования *Witness*:

- *Детали* – представляют детали или сырье;
- *Станки* – представляют станки или помещения, где обрабатываются детали;
- *Буфера* – представляют очереди или другие места, где хранятся детали;
- *Работа* – представляют подвижные ресурсы, например рабочих или инструменты.

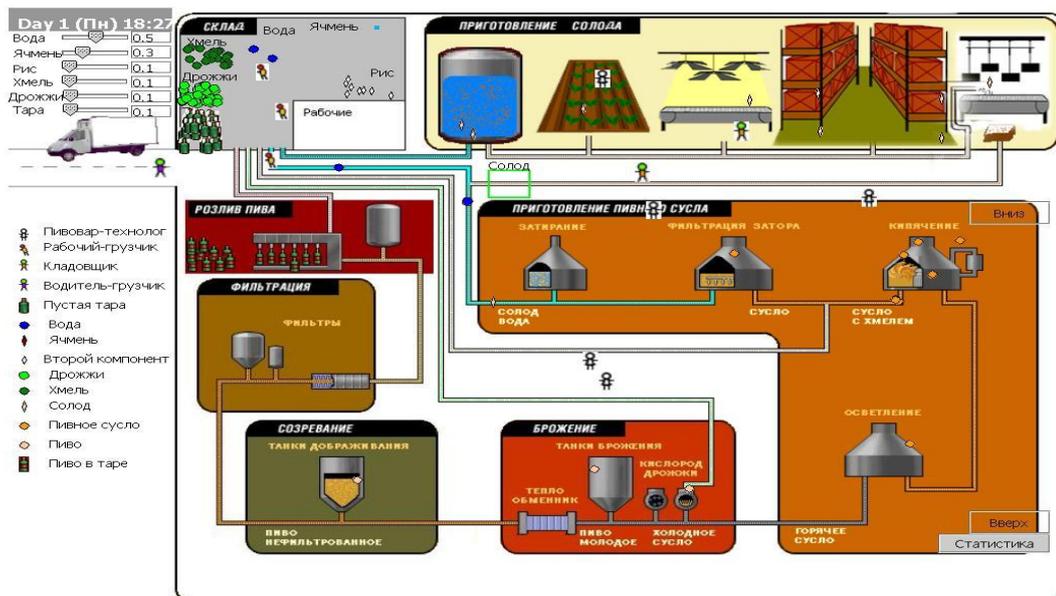


Рисунок 4.2 – Анимационное табло имитационной модели производственной системы в системе моделирования AnyLogic

Логистика складских комплексов.

Склад, как объект моделирования. Склад (буферный, сырья, готовой продукции) является специфичным элементом производственной системы и не рассматривается как система массового обслуживания (рис. 4.3.) и в общем случае характеризуется:

- объемом (вместимостью) или количеством единиц хранения (размерами хранилища), размерами страховых запасов;
- внутренним состоянием (эндогенная переменная имитационной модели) – текущий уровень запасов на складе;
- стратегией управления запаса, которая описывается переменными: критической точкой перезаказа (критический уровень запасов), или размером партии поставок и интервалами между поставками и др. в зависимости от применяемой стратегии.

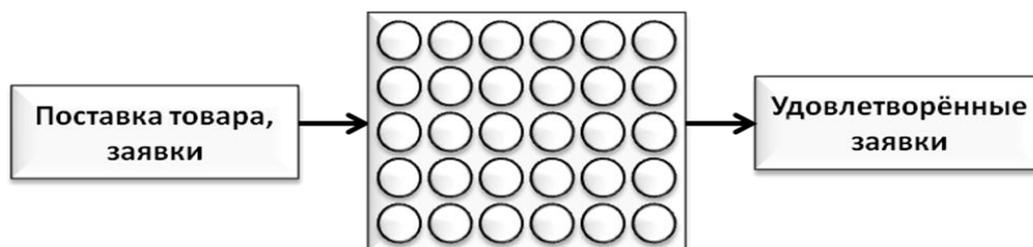


Рисунок 4.3 – Модель склада.

Управление (принятие решений) в масштабе производства предполагает выбор эффективной стратегии управления запасами, реализующей задачу синхронизации потока поставок на склад с потоком заказов на отправку при минимизации затрат на хранение, транспортировку, аренду складских комплексов и т.п.

В задачах по *управлению запасами* определяются количество складов, объем складов, размер партии поставок, рациональный размер страхового запаса, допустимое время хранения продукции на складе и т.п.

Основные решающие правила и управляющие параметры имитационной модели склада:

- стратегия поставки (регулярная, динамическая и др.),
- размер партии поставок (постоянный или зависит от текущего состояния склада, может быть ограничен вместимостью транспортного средства),
- интервалы между поставками (или отправлениями);
- критический уровень запасов (или точка перезаказа);
- размеры хранилища (например, в условиях аренды складских помещений);
- допустимое время хранения товара на складе;
- и др.

Проблемы складской логистики и их решение с помощью имитационного моделирования.

Строительство и оснащение современных складских комплексов необходимым оборудованием и техникой требует значительных инвестиций. Поэтому очень важно еще до начала строительства правильно провести проектирование склада. Проектирование склада - сложный многоступенчатый процесс. Он ведется с учетом множества параметров во взаимодействии с заказчиком и строительными проектными организациями. От того, насколько хорошо организована технология работы склада, зависит успех его работы. Этим, как правило, занимаются компании и службы логистического аудита, консалтинга, инжиниринга.

На оснащение современных складских комплексов идут значительные инвестиции, приобретается и используется оборудование, техника. Склады имеют десятки тысяч мест паллетного хранения, применяются сложные складские технологии, требующие различных человеко-машинных ресурсов. Цель проектирования склада - разработка оптимальной технологической схемы работы склада на основе планируемых грузопотоков.

Имитационная модель полезна при реконструкции или строительстве нового склада на этапе формирования проекта, как при проектировании инфраструктуры логистического центра, так и при технологическом проектировании. Имитационная модель позволяет подсказать, как оптимизировать затраты инвестора.

Проектирование инфраструктуры складского комплекса включает:

- 1) Построение складского комплекса с максимальной вместимостью и производительностью с размещением на заданном участке земли, на основе анализа топологической схемы участка, где существует множество ограничений, с учетом расположения инженерных коммуникаций;
- 2) Выбор вариантов расположения и размеров маневровых площадок с возможностями парковки автомобилей, определение количества мест парковки, КПП;
- 3) Определение необходимых площадок для зон приемки, сортировки, комплектации и хранения грузов;
- 4) Определение количества мест парковки на территории склада для транспорта, реализующего внешние грузопотоки, и рациональное количество мест парковки непосредственно к грузовой рампе;
- 5) Определение необходимого количества ворот в складском помещении;
- 6) Определение необходимых ресурсов и размеров функциональных зон и т.п.

Имитационное моделирование позволяет увидеть (с помощью двух - трехмерной анимации) и проанализировать работу будущего склада до завершения его строительства и в случае необходимости внести коррективы в проект склада (рис. 4.4). Это позволяет убедиться в оптимальности выбранной для склада технологии и заявленных ресурсов до закупки оборудования. Более того, «проиграв» на модели несколько различных вариантов технологии, можно выбрать наилучший из них и, тем самым, уменьшить бюджет проекта и сократить эксплуатационные затраты.

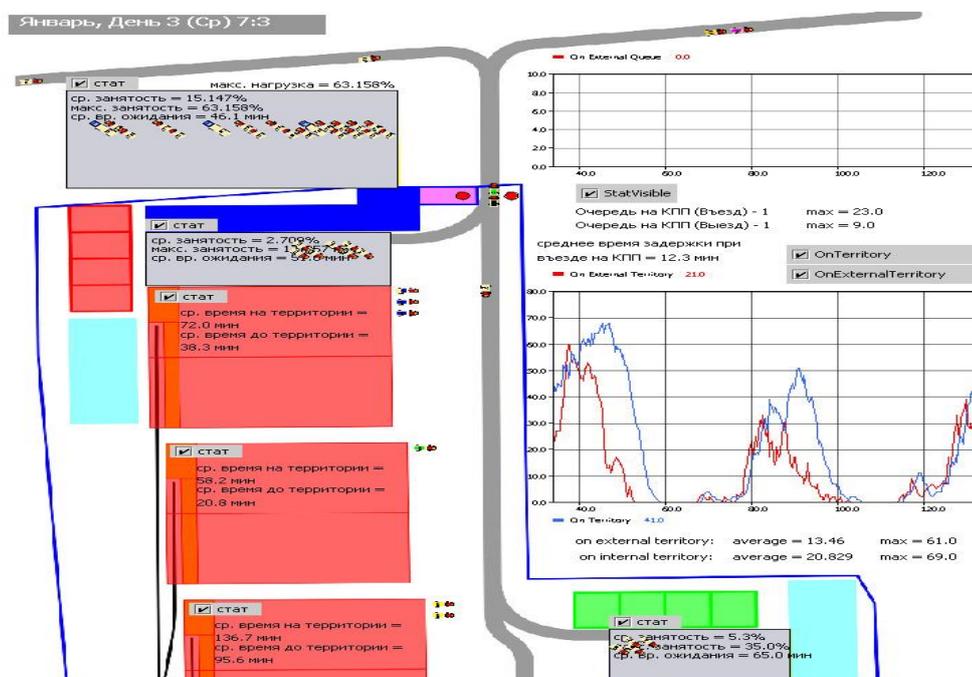


Рисунок 4.4 – Анимационное табло имитационной модели проектирования инфраструктуры логистического центра.

Также имитационная модель может быть полезна и во время эксплуатации склада.

Основные цели технологического проектирования:

- повысить эффективность использования складских площадей;
- сократить время обслуживания клиентов;
- сократить инвестиции в строительство и оснащение склада.

Общая постановка задачи по проектированию и инжинирингу складских комплексов: Какие нужно заложить в проект размеры склада и его технологических зон и какое количество погрузчиков и рабочих требуется на складе для того, чтобы принять и отгрузить заданное количество товаров.

Задачи, решаемые с помощью имитационного моделирования:

- определение количества человеко-машинных ресурсов (погрузочной техники и рабочей силы), обеспечивающих переработку внешних и внутренних грузопотоков (при оптимальном уровне их загрузки, при заданных временных порогах обслуживания клиентов);
- определение необходимой площади для зон приемки, сортировки, хранения грузов;
- проверка эффективности использования различных вариантов компоновочных решений для хранения груза и сборки заказов;
- выбрать наиболее эффективную во всех смыслах технологию обработки грузопотоков: поиск эффективных алгоритмов управления грузопотоком, разработка технологии грузопереработки, разработка специальных алгоритмов для склада многономенклатурных грузов (организация паллетного, коробочного и штучного отбора);
- планирование процедур и графиков выполнения операций прихода и расхода на складе;
- составление эффективных расписаний по выполнению работ;
- определение уровня складских запасов системы (в т.ч. иерархически организованной) с учетом параметров поставок и возможного спроса;
- подсчет затрат на эксплуатацию склада и оптимизация их.

Имитационное моделирование позволяет учесть сезонность, пиковые периоды, проиграть движущиеся потоки во времени, вероятностные характеристики процесса на достаточно большом периоде времени, оценить влияние стохастических факторов и факторов неопределенности, проиграть сложные технологии и алгоритмы в обработке грузопотоков и организации хранения на модели, провести выбор оптимального решения.

Цифровое производство.

Имитационные и графические VR-модели в рамках концепции e-Manufacturing Классические подходы к имитационному моделированию производственных и логистических процессов нашли свое наиболее полное воплощение в реализации современного цифрового производства. В конце

90-х годов практически все автомобилестроительные концерны Германии (DaimlerChrysler, Mercedes-Benz Pkw, Opel, BMW, Audi) пришли к выводу о том, что возникли условия для реализации качественно нового уровня автоматизации процессов на всех этапах жизненного цикла изделия: начиная с эскизного проектирования и заканчивая утилизацией отслужившей свой срок техники. Эти условия были обеспечены, с одной стороны, уровнем развития базовых информационных технологий, а с другой – большим положительным опытом применения этих технологий на самих предприятиях. Для производства, существующего в условиях «тотальной информатизации», было предложено несколько различных названий, из которых наиболее прочные позиции завоевал термин *Digitale Fabrik* (цифровая фабрика), но чаще сущность *Digitale Fabrik* сегодня выражают с помощью «интернационального» термина *e-Manufacturing*.

Основным содержанием идеи *e-Manufacturing* является непрерывное (если переводить буквально используемую при этом немецкую терминологию, то – сплошное) применение цифровых моделей в процессе проектирования и эксплуатации производственных систем. При этом в виде цифровых моделей отображаются не только сами изделия (например, в виде двумерных или трёхмерных CAD-чертежей), но и все средства производства, а также производственные и логистические процессы.

Специальные способы хранения всех относящихся к сфере *e-Manufacturing* данных и средства управления этими данными создают условия для информационной интеграции всех видов деятельности, которые связаны с подготовкой и реализацией процесса производства. Сами люди, участвующие в этой деятельности, получают возможность наблюдать статические объекты или динамические процессы, как правило, в виде трёхмерных изображений, создаваемых с помощью методов VR (виртуальной реальности). Ставится цель, достичь с помощью *e-Manufacturing* такого уровня моделирования объектов и процессов, при котором реальный процесс производства начнётся только тогда, когда абсолютно все его элементы будут изучены и оптимизированы с помощью моделей. Для специалистов на производстве главным должен стать принцип: «Буду делать только то, что я уже наблюдал на экране компьютера».

Для реализации концепции *e-Manufacturing* необходимо иметь три группы программных продуктов:

- средства для «интеллектуального» хранения разнообразных текстовых и графических данных, первоначально представленных в самых различных форматах;
- средства для компьютерного моделирования объектов и процессов;
- средства для визуализации результатов моделирования методами VR.

Иногда всю суть концепции *e-Manufacturing* с точки зрения моделирования описывают формулой: «Simulation + Virtual Reality».

На предприятии, внедрившем концепцию *e-Manufacturing*, можно встретить очень разные виды имитационных моделей, как, например:

- модели систем транспортировки грузов по территории предприятия с помощью мобильных средств (погрузчиков, трейлеров и т. п.);
- сборочные конвейеры;
- модели складских процессов (приём грузов, перемещение грузов в зоны хранения и обратно, отбор, комплектация, упаковка и отправка грузов);
- и др., в т.ч. внешняя логистика предприятия (цепи поставок).

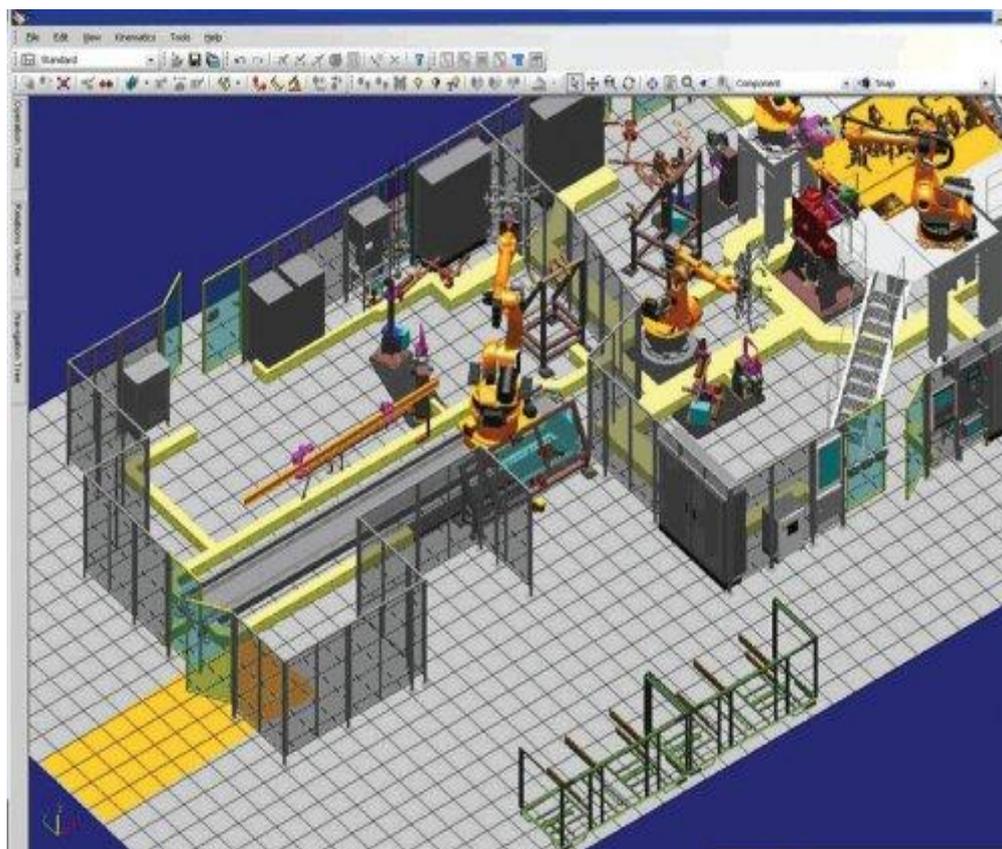


Рисунок 4.5а – Цифровое производство (решения Siemens Technomatix)



Рисунок – 4.5б – Цифровое производство (решения Siemens Technomatix)

Реализация таких моделей осуществляется с помощью коммерческих симуляторов для процессов с дискретными событиями: *GPSS, Simula, Arena, AutoMod, eM-Plant, Extend, ProModel, QUEST, SIMFACTORY II.5, Taylor ED* и *WITNESS*. Суть моделируемых процессов в таких моделях - перемещение во времени и в пространстве, как правило, большого количества объектов, образующих в совокупности некие «потoki». Такие модели в пределах *e-Manufacturing* часто называют *Material Flow Models (Materialfluss-Modelle)*.

VR-модели могут создаваться как в среде самих пакетов моделирования, так и с помощью таких универсальных средств, как язык *VRML*, который, фактически, стал стандартным средством представления трёхмерных графических моделей в промышленных приложениях.

На европейском рынке программных продуктов две фирмы заявили, что готовы предложить полные наборы взаимно совместимых продуктов для поддержки внедрения концепции *e-Manufacturing*. Таковыми являются фирмы Tecnomatix (www.tecnomatix.com) и DELMIA (www.delmia.com). Ядром каждой системы является специальный банк данных, в котором представлены три базовые структуры данных производственного назначения, называемые «Product, Process and Resources» (сокращенно – PPR). У Tecnomatix этот банк данных называется eManufacturing Server (eMS), а у DELMIA – PPR Hub. В качестве инструмента для решения задач моделирования материальных потоков Tecnomatix предлагает симулятор *eM-Plant*, а DELMIA – симулятор *QUEST*. С другими программными продуктами можно ознакомиться, посетив страницы этих фирм в Интернете.

Имитационное моделирование в сетях поставок.

Известно большое количество решений на основе Simulation Software в области операционного, тактического и стратегического планирования и развития цепочек поставок.

Модули планирования реализуются в контуре ERP, SCM, APS, BPM-систем управления предприятия. Без этого невозможна реализация базовых технологий «точно в срок». Часто метод имитационного моделирования применяют при проектировании и реинжиниринге логистической сети как существующей, так и новой системы, например, в рамках консалтинга или логистического аудита.

Логистика предполагает системный подход к интегрированному и динамическому управлению материальными, финансовыми, информационными потоками в организации.

Управление всей логистической сети на современном глобальном рынке является ключевым фактором успеха бизнеса. Организации мирового масштаба признают, что неинтегрированные производственные процессы, неинтегрированные процессы распределения, а также неразвитые отношения с поставщиками и клиентами не отвечают требованиям достижения успеха. Они осознают влияние организационного плана на звенья логистической цепи поставок, производства и сбыта продукции. Однако до непосредственного исполнения организационного плана его влияние на всю логистическую цепочку непредсказуемо. Неадекватный план приводит к чрезмерному накоплению запасов и крупных резервов, ошибочному прогнозированию спроса на продукт, несбалансированной загрузке мощностей, низкому качеству обслуживания клиентов, некорректным производственным планам, высоким затратам на содержание резерва, а иногда и к потере продаж.

Развитие технологии имитационного моделирования и ее практическое применение для управления логистической сети сегодня стало необходимостью и реальностью. Имитационное моделирование позволяет рассмотреть динамику процесса до исполнения плана и реализации проекта, а также дает для сложных, многообразных, зачастую уникальных процессов визуализацию и способствует комплексному пониманию логистических процессов, что делает его незаменимым в логистическом аудите. Имитационная модель позволяет продемонстрировать материальные потоки и их сложное взаимодействие с финансовыми, транспортными, информационными потоками.

С помощью имитационной модели удастся автоматизировать процедуры исследования альтернативных вариантов организации и выбора оптимального решения на основе продвинутых эвристических генетических алгоритмов оптимизации, которые применяются при реинжиниринге логистических сетей.

Имитационное моделирование позволяет не только описывать и измерять показатели функционирования по всем ключевым и операционным характеристикам цепи поставок, но и предоставляет инструменты выбора оптимальных источников материалов и инфраструктуры производственных и логистических мощностей, характеристик процессов и потоков в масштабах всей цепи с учетом оценок будущего спроса, затрат, мощностей и других внешних и внутренних факторов. Руководствуясь полной и достоверной информацией применительно к широкому

диапазону вероятных в будущем операционных условий деятельности, менеджеры могут принимать обоснованные решения по управлению цепочкой поставок.

Имитационное моделирование позволяет оценить последствия отдельных операций до момента их внедрения в систему и позволяет компаниям проводить всесторонний анализ возможного развития событий, способствующий принятию оптимальных управленческих решений. Оно также делает возможным сравнение различных альтернативных решений без прерывания работы реальных систем и сокращает длительность процесса принятия решений. Правильное применение таких моделей позволяет точно оценивать риски и выгоды в различных вероятных в будущем операционных условиях деятельности. Руководствуясь полной и достоверной информацией, менеджеры могут принимать обоснованные решения, связанные с управлением цепочкой поставок.

Преимущества применения имитационного моделирования для логистических систем:

- комплексное понимание процессов и характеристик логистической цепи с помощью графиков и развитой анимации;
- задачи управления в логистической системе являются достаточно объемными и сложными для формализации, поэтому практическая реализация математической модели принятия решений в общем виде является проблематичной, так как часто имеет значительное число внутренних связей и обладает большой размерностью;
- возможность учитывать стохастическую природу и динамику многих факторов внешней и внутренней среды; пользователь получает возможность моделировать случайные события в конкретных областях и выявлять их влияния на логистическую цепь, используя распределения вероятностей;
- возможность воспроизводить динамику системы, отражать динамический характер логистических процессов, обилие временных и причинно-следственных связей (требования потребителей, как правило, имеют вероятностный и динамический характер, текущий уровень запаса на складе является динамическим параметром и т.п.);
- применение многошаговой процедуры проектирования позволяет учитывать сложность принятия решений, большое количество решающих правил и критериев оптимизации;
- в большинстве случаев в распоряжении лица, принимающего решения, в логистической системе имеется несколько альтернатив (допустимых решений), имитационная модель позволяет их оценивать и сравнивать;
- обеспечение минимизации риска изменения плана путем предварительного анализа и моделирования возможных сценариев развития событий в цепи поставок.

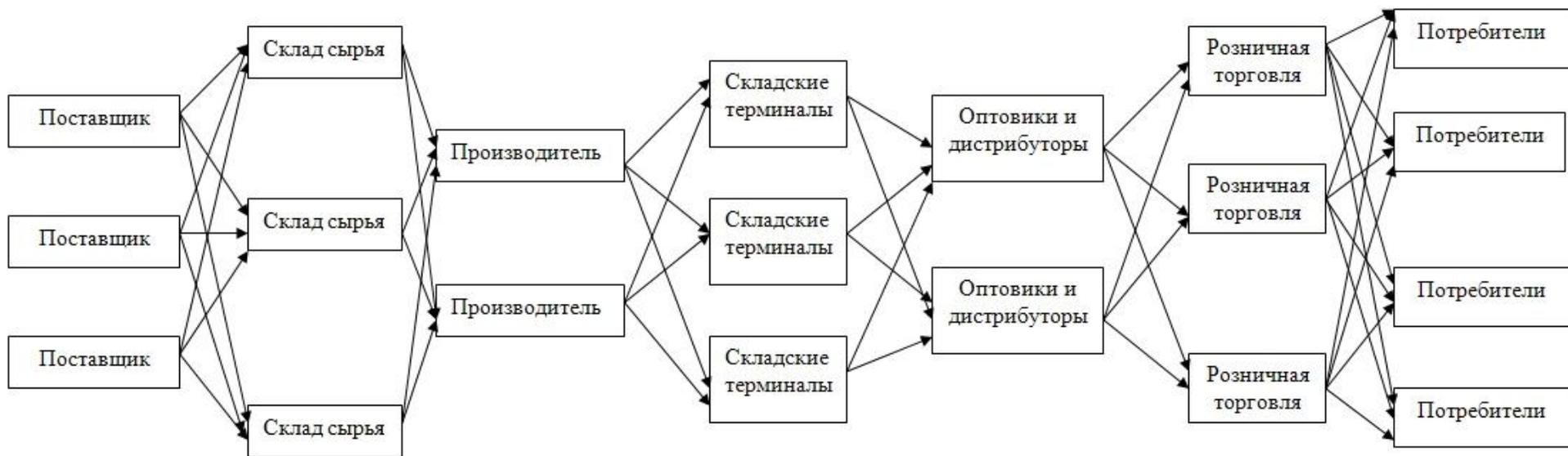


Рисунок 4.6. – Типичная структура логистической цепи.

На рисунке 4.6. представлена типичная структура логистической цепи. Она состоит из ряда организаций: поставщики снабжают материалами производителей, производители производят продукцию и хранят ее на складах, затем реализуют продукцию через дистрибутивные центры и розничную торговлю. Потребители приобретают товар в розничной сети. Структуры логистических цепей могут варьироваться в различных отраслях производства.

Управление логистической цепью заключается в процессе интеграции поставщиков, производителей и складов, розничной торговли таким образом, чтобы продукция изготавливалась и доставлялась в нужном количестве, в нужное время при одновременной минимизации затрат по всей логистической цепи, а также максимальном удовлетворении потребностей клиентов. Основной фактор успеха – максимально интегрировать производственные процессы и процессы распределения, координировать производственные планы с планами поставщиков и потребителей. В этом суть интегральной и маркетинговой концепций в логистике.

Производители стремятся выявить узкие места, синхронизировать материальные потоки, а также сократить производственный цикл, время выполнения заказа и количество запасов в масштабе всей цепи. Целью управления логистической цепью является удовлетворение потребительского спроса путем предоставления высококачественной продукции по приемлемым ценам и с минимальными затратами в максимально короткие сроки в условиях динамично изменяющейся внешней среды.

Основные задачи проектирования логистической сети:

- максимальная интеграция логистических функций по всей логистической сети;
- планирование мощностей;
- синхронизация материальных потоков;
- координация материалов и мощностей;
- увеличение производительности;
- предотвращение потерь от простоев;
- анализ узких мест;
- сокращение затрат на производство, хранение и транспортировку;
- оценка и планирование потребительского спроса;
- повышение уровня выполняемости заказов;
- выбор рационального варианта организации бизнеса;
- оптимизация цепи поставок;

Оптимизация цепи поставок позволяет осуществить:

- эффективное удовлетворение потребительского спроса;

- реализацию стратегии «точно в срок»;
- минимизацию затрат по всей логистической цепочке;
- интеграцию (стратегический план – поставщики и потребители);
- повышение эффективности использования мощностей компании;
- инвестиционное планирование и развитие.

Суть цепи поставок – перенос во времени и пространстве некоторого объема материала. Имитационная модель позволяет описать и продемонстрировать материальные потоки, их сложное взаимодействие с информационными и финансовыми потоками.

Логистическую сеть можно представить в виде ориентированного графа (стохастической сети), ребра которого представляют различные потоки, а вершины — звенья сети (рис. 4.7). За элемент потока принимают активность (транзакт) - аналог подвижной материальной сущности, некоторую абстрактную неделимую единицу, обладающую определенным количеством сохраняемых характеристик, таких как объем поставки. Звенья логистической сети могут производить различные действия с активностями.

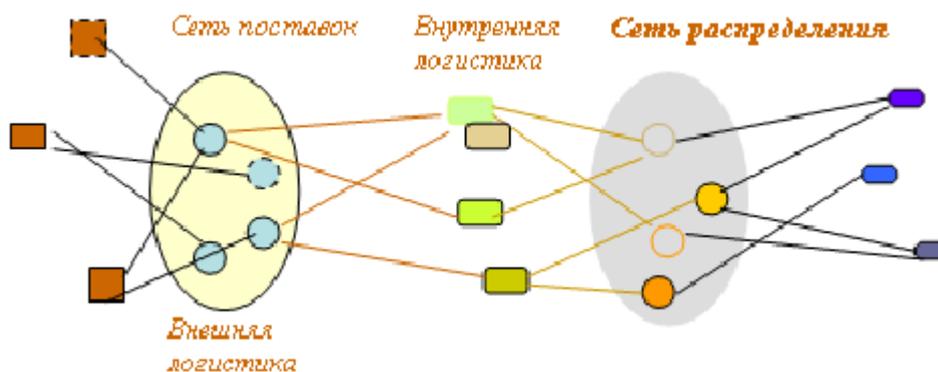


Рис. 4.7 – Стохастическая сеть логистической цепи.

Особенностью логистических систем является то, что многие виды ресурсов являются в них мобильными объектами (средства транспортировки и перемещения грузов). В построенной таким образом имитационной модели описываются процессы передвижения и накопления грузов и товаров в сети, задаются параметры, которые определяют ее состояние и меняются во времени по заданным операционным правилам.

Для построения имитационной модели логистической сети модель необходимо наполнить следующими данными:

Производственный процесс и его временные интервалы:

- Производственный процесс: время исполнения процесса, очередность выполнения операций и временные рамки, количество оборудования в каждом процессе;

- Календарное планирование: данные о сменах, выходных днях, данные о плановых профилактических работах.
- Оборудование: количество оборудования, среднее время отказа, среднее время ремонта, данные об альтернативных ресурсах, данные о плановых ремонтно-профилактических работах, стоимость использования оборудования;
- Перечень материалов и характеристики материальных потоков.

Политика управления запасами:

- гарантированный уровень запаса, уровень пополнения, уровень запасов сырья и материалов.

Информация о поставках:

- время выполнения поставки, размер серии поставок, возможности поставщика, горизонт поставки, время поставок.

Спрос:

- срок оплаты, приоритеты, начальные и конечные сроки выполнения заказа, структура и динамика спроса.

Политика и стратегии:

- альтернативные решения и сценарии;
- политика управления запасами;
- политика сбыта.

Моделирование деятельности цепи поставок на стратегическом, тактическом и операционном уровне - это классическая область, где применяются инструменты имитационного моделирования.

Значительное число компаний успешно ввели модели оптимизации сетей в детальное *операционное планирование*. Основное назначение этих моделей — определение оптимального варианта повседневного использования ресурсов и процессов, а также более глубокий анализ затрат на содержание или получение запаса, мощностей предприятия, процессов и ресурсов, транспортных издержек и т.д.. Модель можно использовать для имитации в обобщенном виде всех потоков и процессов, проходящих и применяемых по всей цепи поставок компании, при сохранении точности их параметров на операционном уровне. Это касается закупок, внутрифирменной транспортировки, производства/обработки, потоков внутри предприятия и потоков до конечных рынков. Учитывая мощности, затраты и объем спроса, модель позволяет выбрать лучший вариант источников поставок и мест расположения мощностей для реализации процессов и видов деятельности, позволяющий минимизировать затраты и при этом удовлетворять

спрос (или в случае ограниченных ресурсов или материалов — добиваться максимальной прибыли при меняющихся кривых спроса).

Многие модели позволяют учитывать масштабы экономии и изменяющиеся ступенчато затраты при различных производственных уровнях. Результаты, показанные этими моделями, передаются в другие компоненты операционного планирования, применяемые для разработки производственных графиков, формулирования требований к сырью и доставке готовой продукции, чтобы в конечном счете выйти на минимальный уровень затрат.

Операционные модели предназначены в основном для решения операционных вопросов на уровне цепи поставок, но не для принятия тактических или стратегических инвестиционных решений. Расширение функциональности *ERP*, *SCM*, *BPM* - решений происходит за счет богатых аналитических возможностей, включая моделирование разного уровня, *стратегическую и тактическую оптимизацию цепей поставок*. Многие компании предлагают аналитические решения по управлению цепями поставок (например, i2 Supply Chain Strategist Tactician) для организации мониторинга их эффективности и поддержки процесса принятия стратегических и тактических решений. *Аналитические решения для планирования стратегического и тактического развития цепочки поставок* позволяет моделировать сценарии развития, приводящие к снижению оборотного капитала, постоянных и операционных издержек и увеличению эффективности использования производственных, складских и транспортных мощностей компании. Руководителям компаний постоянно приходится принимать решения такие как: слияние и поглощение компаний, конкуренция на региональных рынках, изменения цен на производственное сырье и материалы, своевременная транспортировка, изменение структуры и географии спроса в регионах, необходимость инвестиций в бизнес.

Комплексное стратегическое моделирование взаимосвязей между производственной, транспортной и дистрибуционной цепочкой позволяет составлять компаниям оптимальные, устойчивые к колебаниям рынка, стратегические модели транспортных цепочек, определять стратегию развития цепочек, поддерживающую планы компании по расширению бизнеса.

При этом решаются следующие задачи:

- выявление слабых мест в существующей дистрибуционной сети компании и разработка рекомендаций по их устранению;
- максимально рациональное использование существующих объектов сети, с учетом накладываемых бизнес-ограничений;
- проведение сценарного анализа «что-если»;
- снижение постоянных и переменных издержек существующей дистрибуционной сети компании с помощью сценарного анализа «что-если» и сравнения результатов до и после ее оптимизации;

- улучшение сервиса и качества обслуживания клиентов и др.

Наиболее часто на практике с помощью имитационной модели решаются следующие задачи:

- понимание принципов функционирования существующей цепочки поставок;
- определение областей (узких мест), ограничивающих пропускные возможности цепи поставок;
- определение запаса прочности цепи на случаи резкого увеличения спроса или возникновения сбоев в работе поставщиков;
- оценка предполагаемых конфигураций цепи поставок (проектирование цепи поставок);
- анализ сценариев «что если?»;
- анализ рисков;
- выбор наилучших политик и параметров управления цепями поставок;
- планирование бюджета и временных характеристик.

Моделирующая система стратегической оптимизации используется для анализа приобретенных ресурсов и других стратегических решений, таких как создание новых производственных сооружений, расчет безубыточных цен для приобретения ресурсов или построение цепи поставок для нового продукта. Ее цель — увеличить чистый доход или прибыль на инвестированный капитал.

Моделирующая система тактической оптимизации определяет интегрированный план снабжения/производства/распределения запасов для всей системы снабжения компании на следующие 12 месяцев. Ее цель — уменьшить общие логистические издержки удовлетворения фиксированного спроса или увеличить чистый доход.

Использование имитационного моделирования может стать важным инструментом принятия управленческих решений и дает ряд преимуществ, а именно:

Системность в решении сложной управленческой ситуации по проектированию цепи поставок, с большим количеством решающих правил (схемы и каналы поставок, стратегии управления запасами, планируемые мощности производства, структура и параметры дистрибуционной сети в условиях неопределенности внешней среды и спроса) на множестве показателей эффективности (затраты, прибыль, время и качество обслуживания клиентов).

Обеспечение учета неопределенности. К неопределенным переменным относятся будущий спрос, цены конкурентов, сроки поставки, интенсивность потока покупателей и изменение процентных ставок. Сложная модель может включать в себя разнообразные переменные такого рода.

Сравнение альтернативных вариантов. Неоднократное использование полученной модели при анализе альтернативных стратегий и анализ воздействия различных политик.

Отслеживание множественных исходов. Сложные имитационные модели можно использовать для отслеживания динамики различных показателей, в частности прибыли, объема продаж, расходов и уровня клиентского обслуживания.

Устранение рисков. Использование моделей не несет в себе каких-либо существенных рисков. Если бы не было модели, то различные стратегии пришлось бы проверять в реальной ситуации. Так, можно увеличить цену на товар и понаблюдать, как это скажется на объеме продаж или спросе, или сократить численность персонала и посмотреть, как это скажется на уровне обслуживания клиентов. Такой процесс связан с рисками потерь доходов или клиентов. Применение моделирования позволяет устранить такие риски.

Экономия средств. Имитационные модели цепей поставок относительно дешевы. Когда создана подходящая модель, можно отработать различные ситуации практически даром и за относительно короткий отрезок времени.

Стратегическое управление цепочкой поставок. Рассмотрим пример комплексного подхода к постановке и решению задачи оптимизации цепи поставок.

Возможные сценарные параметры:

- конфигурация сети поставок и дистрибутивной сети;
- выбор поставщиков и схем поставок;
- стратегии управления запасами и наращивания производственных мощностей;
- виды транспортировки и затраты на транспортировку;
- ценовая политика в регионах на основе анализа динамики и структуры потребительского спроса и др.

Критерии оптимизации:

- минимизация затрат по всей логистической цепи;
- максимизация прибыли в целом по цепи поставок на инвестированный капитал;
- временные параметры логистических процессов;
- максимальная синхронизация логистических сущностей для реализации стратегии «точно в срок»;
- максимальное удовлетворение потребностей клиентов на основе анализа динамики спроса.

Имитационное моделирование используется для решения широкого круга задач *управления цепями поставок в различных срезах* и применяется на предприятиях как крупного, так и среднего бизнеса.

В управлении закупками возможно создание имитационной модели, обеспечивающей автоматизированное формирование заказов на поставки товаров и учитывающей множество параметров: цену, надежность поставок, качество товара, минимизирование суммарных расходов и т.д. С помощью имитационного моделирования возможно проанализировать конкретную политику размещения заказов и определить, есть ли вероятность возникновения дефицита. Дефицит — это такое положение вещей, когда спрос на товар превышает текущий уровень запасов. Дефицит может стать серьезной головной болью для поставщиков, так как неудовлетворенный спрос означает не только снижение немедленных продаж, но и уход покупателей в долгосрочной перспективе, а также увеличение расходов, ухудшение отношений с клиентами и уменьшение доходов.

В области дистрибуции использование имитационного моделирования возможно как на стадии построения распределительной сети так и на стадии эксплуатации, в том числе для задач определения оптимальной дислокации распределительных центров, планирования транспортных потоков, складов, анализа логистических издержек и многих других.

В области транспортировки имитационное моделирование можно применять для выбора видов транспортных средств и маршрутов, перевозчиков и логистических партнеров.

В области управления запасами имитационное моделирование возможно использовать для оценки качества обслуживания, определения объемов страховых и операционных запасов, причем практически в режиме реального времени.

В области складирования имитационное моделирование целесообразно применять для определения параметров складских систем, оценки и выбора вариантов реализации терминалов и складских комплексов, оценки тех или иных технологических решений и много другого.

Приведенные варианты использования имитации в повседневной деятельности, конечно же, не отличаются полнотой и на практике возможны десятки подобных задач. Наиболее эффективно использование имитационных моделей на стадии предпроектных работ и проектирования новых или модернизации существующих предприятий. В этот момент наиболее высоки риски принятия неправильного решения, причем цена каждого решения высока.

4.2 Наиболее существенные приложения системной динамики.

Динамика предприятия.

Идея системной динамики появилась у Джея Форрестера еще в то время, когда он работал над проектами министерства обороны США, занимаясь разработкой систем управления с обратной связью, - для него было очевидным, что системная динамика может успешно применяться и в менеджменте. Это было время создания Слоановской школы управления при Массачусетском технологическом институте (МТИ). Из воспоминаний Дж Форрестера [47]: «Мне однажды случилось разговориться с людьми из Дженерал Электрик. Они были озадачены тем, почему на их заводах по производству бытовых приборов в Кентукки, иногда работающих в три и четыре смены, затем, несколько лет спустя, половину людей приходится увольнять. Это можно было легко объяснить деловыми циклами, вызвавшими колеблющийся спрос, но такое объяснение не выглядело достаточно убедительно, как и все доказательства. После разговора с ними о том, как у них принимаются решения о найме и как ведется учет запасов, я начал делать некое подобие имитационной модели. Это было моделированием с помощью карандаша и листка бумаги из записной книжки. Я начал с колонок сверху для материальных запасов, резервов, рабочих, заказов и норм производства. Учитывая эти начальные условия и политику найма, которой придерживались на предприятии, можно было вычислить, сколько людей будет нанято на следующей неделе. Это давало новые значения занятости, уровня материальных запасов и производства. Каждое последующее состояние могло быть вычислено от предыдущего - стало очевидно, что это потенциал для колебательной или непостоянной системы, поведение которой было внутренне полностью определено. Даже с постоянно поступающими заказами можно было получить неустойчивую занятость как следствие обычно используемой политики принятия решения в пределах канала поставок. Та первая система контроля состояния запасов с карандашом и бумажным моделированием дала начало системной динамике. Ранние модели сетей поставок увековечены сегодня в виде "пивной игры", которая доступна на сайте Общества системной динамики. ...в 1958 году я писал статью «Динамика предприятия - важнейший прорыв для лиц, принимающих решения» для Гарвардского делового обозрения. Та статья была второй главой книги «Основы кибернетики предприятия».

В 1961 году вышла первая книга Джея Форрестера, посвященная системной динамике, «Индустриальная динамика» (Industrial Dynamics), в русском переводе известная как «Основы кибернетики предприятия» [46].

Книга посвящена применению метода системно-динамического моделирования для комплексного описания и исследования предприятия как целостной системы, осуществляющей многообразные взаимосвязанные функции, находящейся в определенных взаимосвязях с внешней экономической средой. Моделирование предприятия как экономической динамической системы позволяет рассматривать меняющееся во времени поведение промышленных предприятий с целью выработки усовершенствованных форм их организации и механизмов управления. В этом динамическом моделировании интегрируются в единой структурной схеме все функциональные отрасли управления как своеобразной системы с обратными связями. В своей модели предприятия Форрестер использует шесть взаимосвязанных потоков, которые отражают деятельность промышленного предприятия: пять из них – *потоки материалов, заказов, денежных средств, оборудования и рабочей силы*, шестой – *информационный*, является соединительной тканью, связующей пять других.

Структура динамической модели предприятия. Базовая структура модели, отображающая деятельность промышленного предприятия включает несколько взаимосвязанных потоков (рис 4.8.):

- *Сеть материалов* (включает потоки и запасы товаров, сырья, незавершенное производство или готовую продукцию);
- *Сеть заказов* (сюда входят заказы на товары, рабочую силу и контракты на новую производственную площадь);
- *Сеть денежных средств* (отражает фактическое движение платежей, банковская наличность отражает денежный уровень);
- *Сеть рабочей силы* (отражает процессы найма, обучения и увольнения рабочих на предприятии);
- *Сеть оборудования* (или производственные фонды).

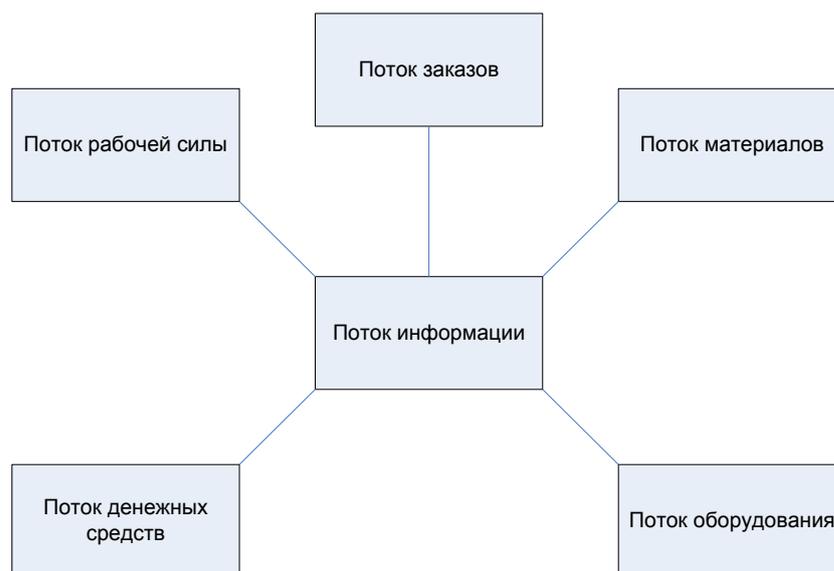


Рисунок 4.8 – Базовые потоки предприятия.

Связующая *сеть информации* позволяет переносить информацию к точкам принятия решения в других сетях. Информация представляет основу для принятия решений – является соединяющей сетью, заставляет взаимодействовать остальные 5 сетей. В работе обсуждается взаимодействие потоков информации, денежных средств, заказов, товаров, оборудования, рабочей силы на предприятии, в результате с помощью системно-динамической модели создается единая структурная схема, в которой интегрируются различные функциональные отрасли управления – производство, сбыт, бухгалтерский учет, исследования и технические усовершенствования, капиталовложения и др.

Системная динамика предлагает количественный, экспериментальный подход к решению задач приведения организационной структуры и методов руководства предприятием в соответствии с требованиями промышленного развития и устойчивости; является основой для проектирования эффективных промышленных и экономических систем. Динамическая модель используется для изучения влияния правил принятия решений на поведение системы. Перестройка в рамках системно-динамической модели организационных взаимоотношений и правил принятия решений, которые могут быть изменены в реальной системе, позволяет проверить, насколько это может улучшить поведение системы.

Модель производственно-сбытовой системы. В работе общее описание и исследование динамической модели предприятия дано на простом примере производственно-сбытовой системы. Под промышленным предприятием понимается производственное предприятие, включающее розничные и оптовые торговые организации.

Проблема состояла в том, что случайное изменение количества заказов на 5% вызывает периодические колебания уровней запасов на 15%, а объема выработки продукции и численности

рабочей силы - более чем на 25%. Требовалось показать, каким образом организационные формы и правила принятия решений являются источником нежелательных явлений в поведении промышленных предприятий в целом и ответить на ряд практических вопросов:

1. каким образом незначительные изменения объема розничных продаж могут вызвать значительные колебания производства продукции предприятия?
2. почему ускорение выполнения конторских работ не оказывает существенного влияния на улучшение управленческих решений?
3. почему руководство предприятия не в состоянии выполнить заказы, хотя его производственные возможности неизменно превышают объем продаж.

Решающим звеном в деятельности любого предприятия являются производство и сбыт продукции. Важнейшая проблема этого звена – приведение темпа производства и темпа продаж продукции в соответствие с требованиями конечного потребителя. Практика показывала, что темпы производства колеблются в больших пределах, чем фактические темпы потребительских покупок. Сбытовая система, с цепью взаимосвязанных товарных запасов и определенным порядком выдачи заказов на их пополнение, имеет тенденцию усиливать небольшие колебания, возникающие в розничном звене. Для рассматриваемого примера характерна структура многоступенчатой сбытовой системы. Рассмотрев основы внутреннего поведения сбытовой системы, Форрестер увидел, что незначительные, случайные колебания продаж могут превратиться в годовые или сезонные производственные циклы. Несмотря на постоянное превышение производственной мощностью предприятия объема его розничного оборота, может возникнуть представление о недостаточном уровне располагаемых мощностей, и они могут быть расширены.

Цель построения модели производственно-сбытовой системы заключалась в том, чтобы исследовать возможные колебания или неустойчивости поведения системы, возникающие из-за организационных отношений и правил управления предприятием, оптовой и розничной торговлей, а также проанализировать как влияют основные запаздывания в потоках заказов и материалов на нестабильность системы. Как будет реагировать система на изменения розничных продаж? Какие изменения в методах управления могут воздействовать на внутренние колебания системы? Как влияют запаздывания и усиления в круговом потоке информации на деятельность предприятия ?

Построение модели потребовало введения в нее информации по следующим характеристикам: об организационной структуре (взаимосвязи частей), о запаздываниях (при принятии решений и действиях), о правилах, регулирующих закупки и товарные запасы (регулирующие решения), а в ходе исследования требовалось изучить – как все эти характеристики сказываются на поведении системы.

На рисунке 4.9. приведена типовая *организационная структура* предприятия для функций производства и сбыта: она включает розничное звено, оптовое, склад готовой продукции, завод (производство). В простейшей модели рассматриваются только *Поток заказов* и *Поток продукции* (потоки оборудования, рабочей силы и денежных средств не рассматриваются, т.к. этого не требуют поставленные задачи). Таким образом, в системе рассматриваются запасы: на заводе, в оптовом и розничном звеньях.

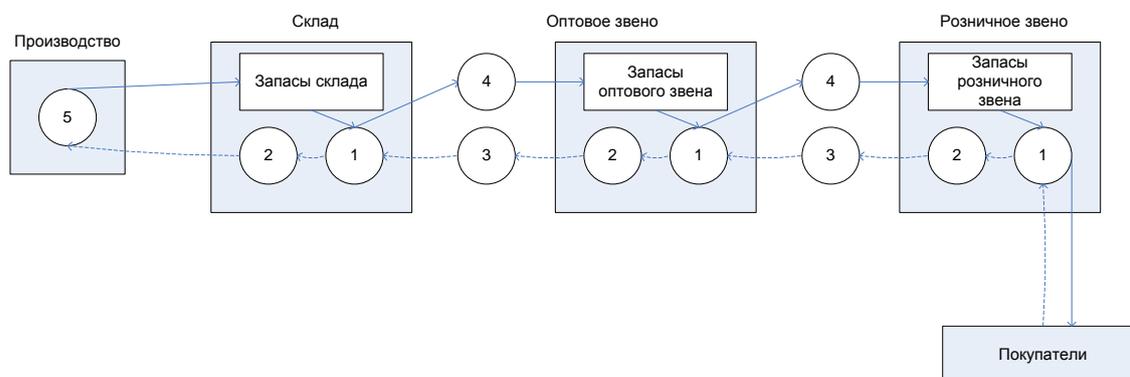


Рисунок 4.9 – *Организационная структура производственно-сбытовой системы.*

- 1 – задержки выполнения заказов;
- 2 – задержки принятия решения о заказе;
- 3 – почтовые задержки;
- 4 – транспортные задержки;
- 5 – задержки изготовления продукции.

Различные *запаздывания* в потоках товаров и заказов – это сроки поставок, оформления бухгалтерских проводок, закупки, почтовые задержки, оформление заказов, перестройка производства и т.п..

Увеличение темпа продаж приводит к увеличению заказов, чтобы сохранить установленный уровень запасов на предприятии применяется специальная политика регулирования запасов. Существующие на предприятии операционные *Правила выдачи заказов и регулирования запасов* потребовали введения в модель специальных математических зависимостей.

Потоковая диаграмма модели, укрупнено отражающая логику модели приведена на рисунке 4.10. Для построения модели проведен отбор существенных факторов, описаны основные переменные модели: уровни, темпы, запаздывания, дополнительные переменные.

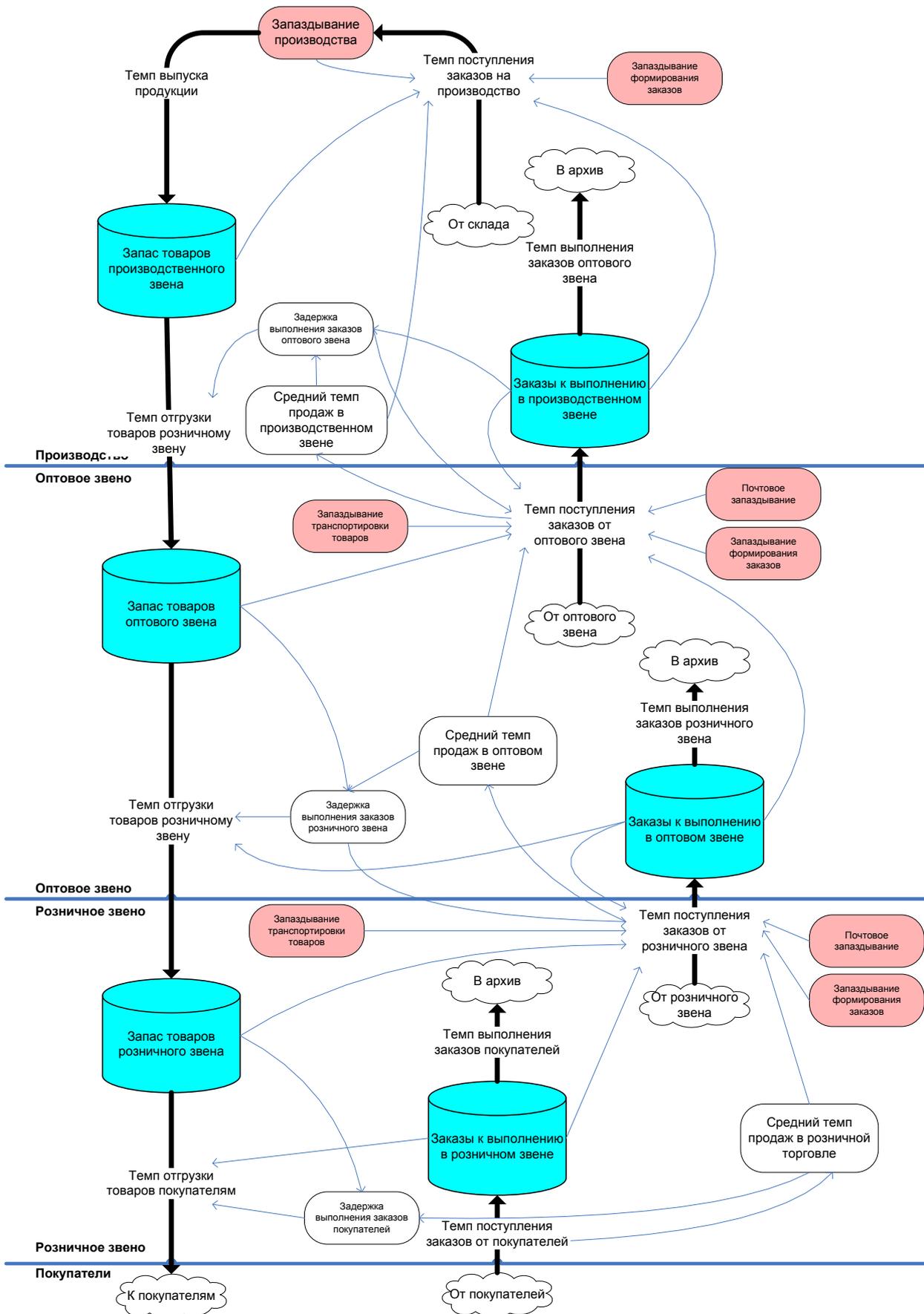


Рисунок 4.10 а – Укрупненная потоковая диаграмма модели производственно-сбытовой системы.

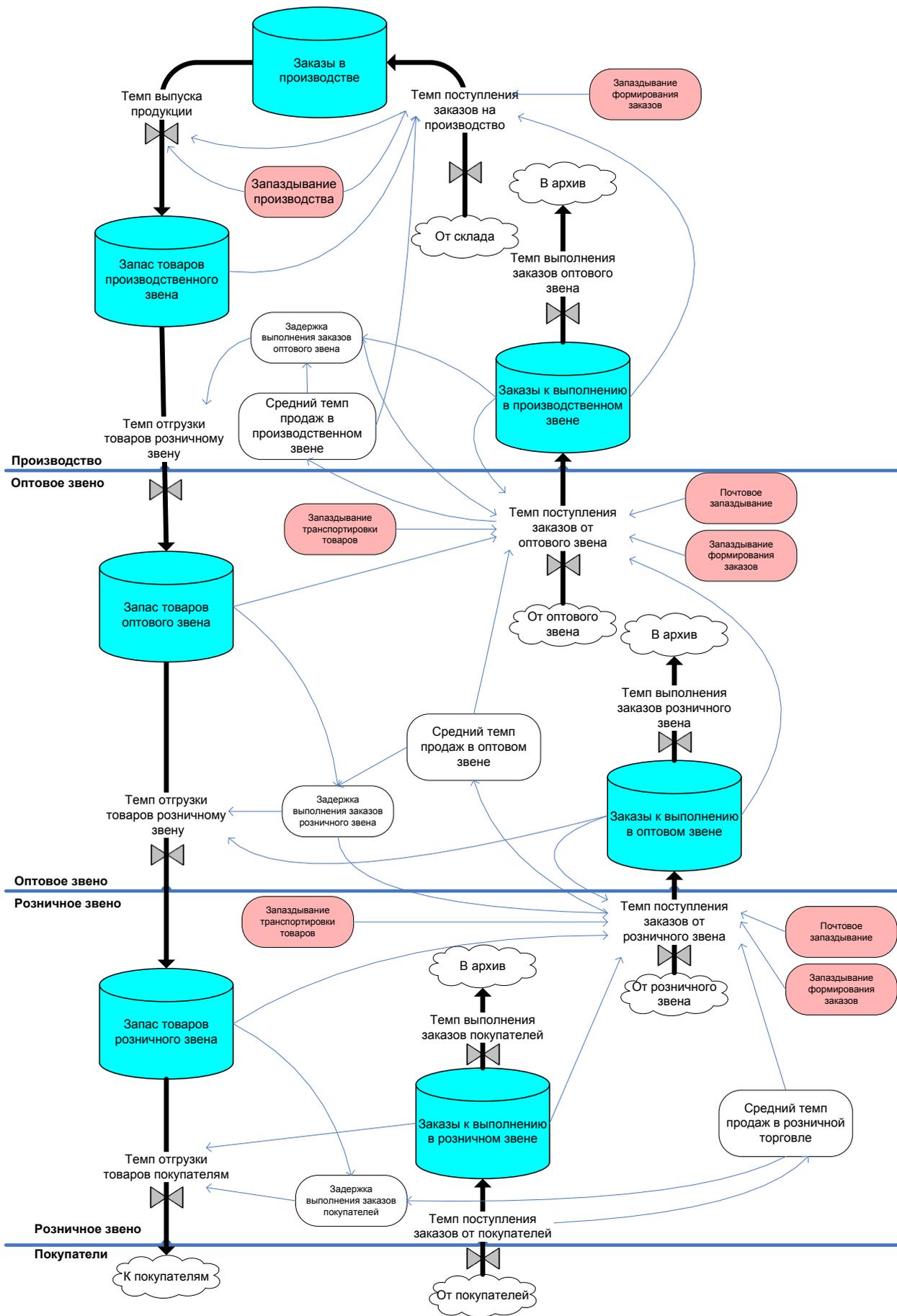


Рисунок 4.10 б – Укрупненная потоковая диаграмма модели производственно-сбытовой системы.

На разработанной модели проводились следующие экспериментальные исследования (рис 4.11(а.б.в.):

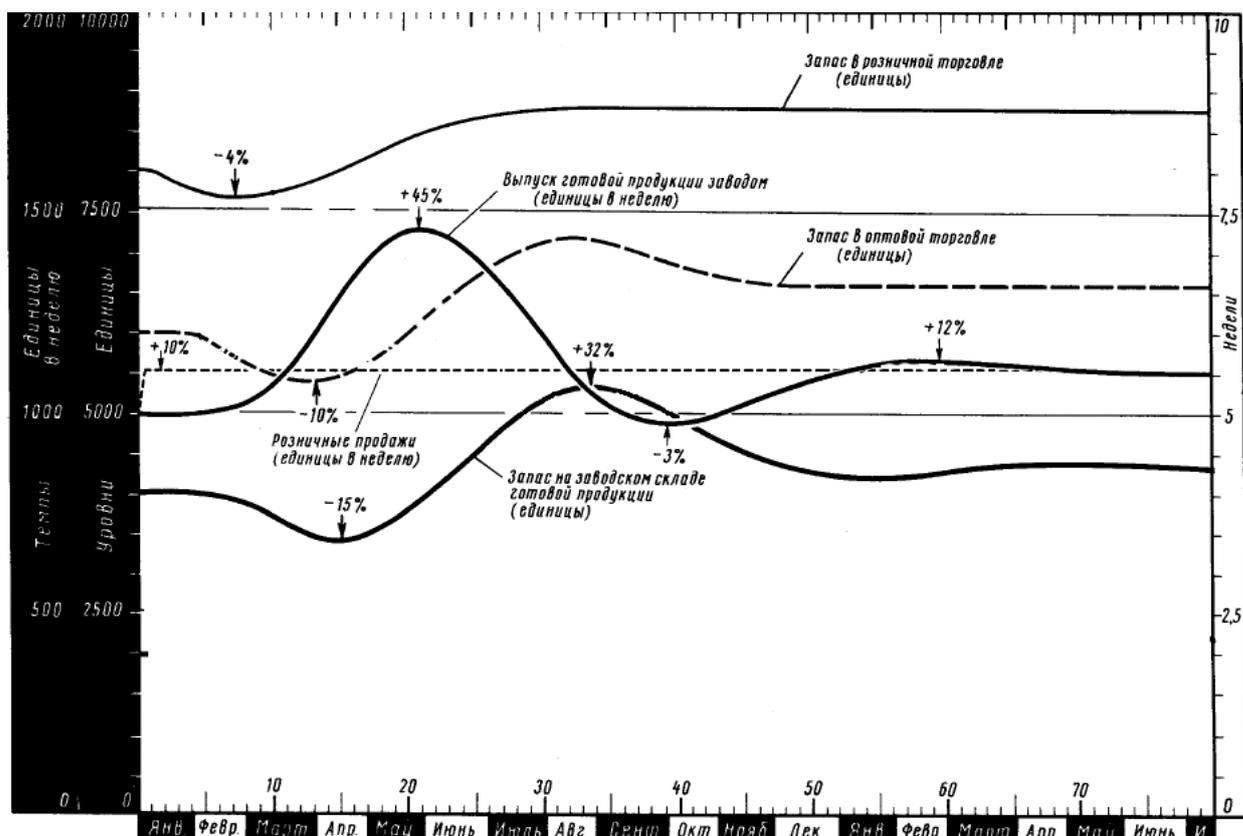


Рисунок 4.11 а – Реакция производственно-сбытовой системы на 10% увеличение объема розничных продаж.

- исследовалась реакция производственно-сбытовой системы на 10% увеличение объема розничных продаж (рисунок 4.11 а). Результаты эксперимента показали, что система испытывает колебания: наблюдаются спады в производстве продукции до значений, меньших темпа розничных продаж, с последующим возникновением несколько преувеличенных, по-сравнению с продажами, темпов размещения заказов на производство продукции и выпуска готовых товаров. Для затухания в системе необходимо полтора года;
- исследовалась реакция производственно-сбытовой системы на случайные отклонения в розничных продажах, - удалось проследить как изменение руководящих правил может сделать систему менее чувствительной к случайным возмущениям;

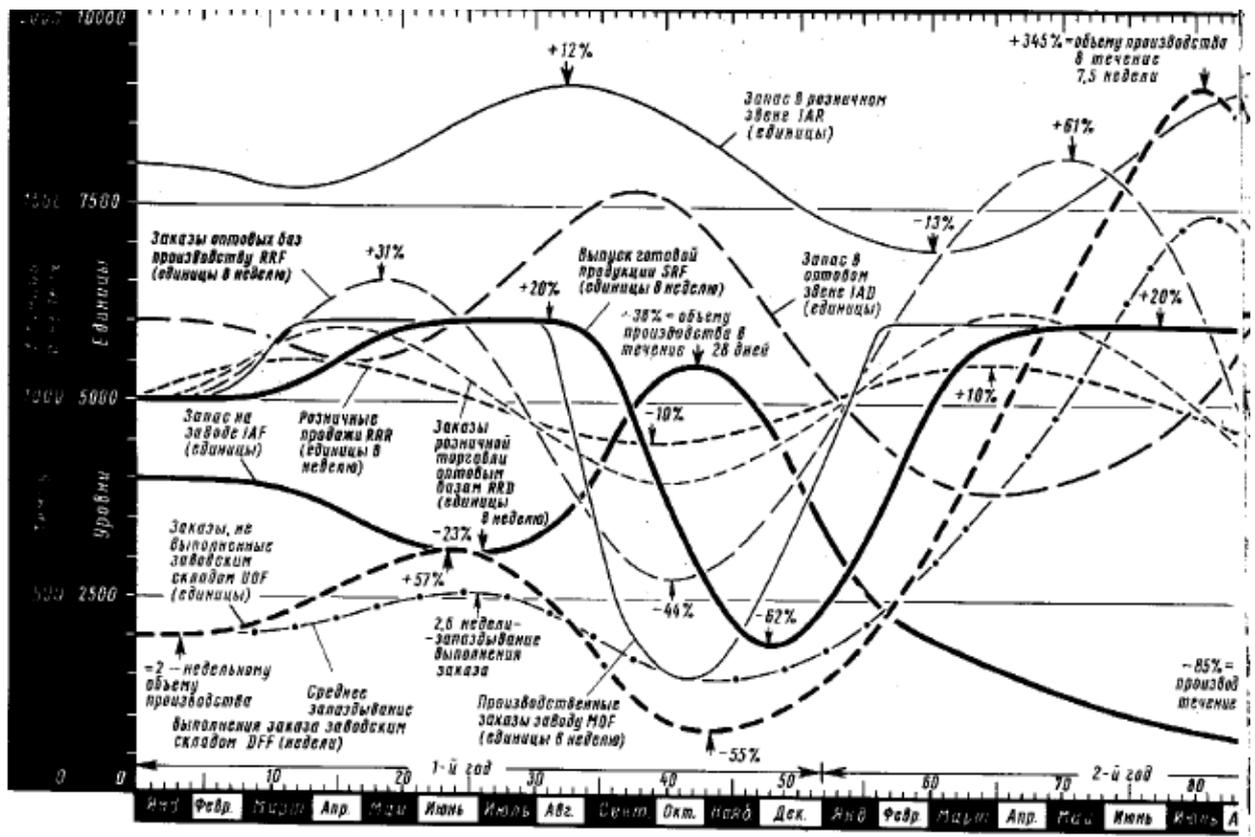


Рисунок 4.11.б – Влияние колебаний розничных продаж на производство при максимальной мощности завода, на 20% превышающей средние продажи.

- предельная производственная мощность завода, периодические колебания розничных продаж (рисунок 4.11 б). Производство не в состоянии удовлетворить требования, связанные с регулированием запасов, на производстве скапливаются невыполненные заказы;
- сокращение запаздывания оформления документов; - не имеет существенного влияния на стабильность системы;

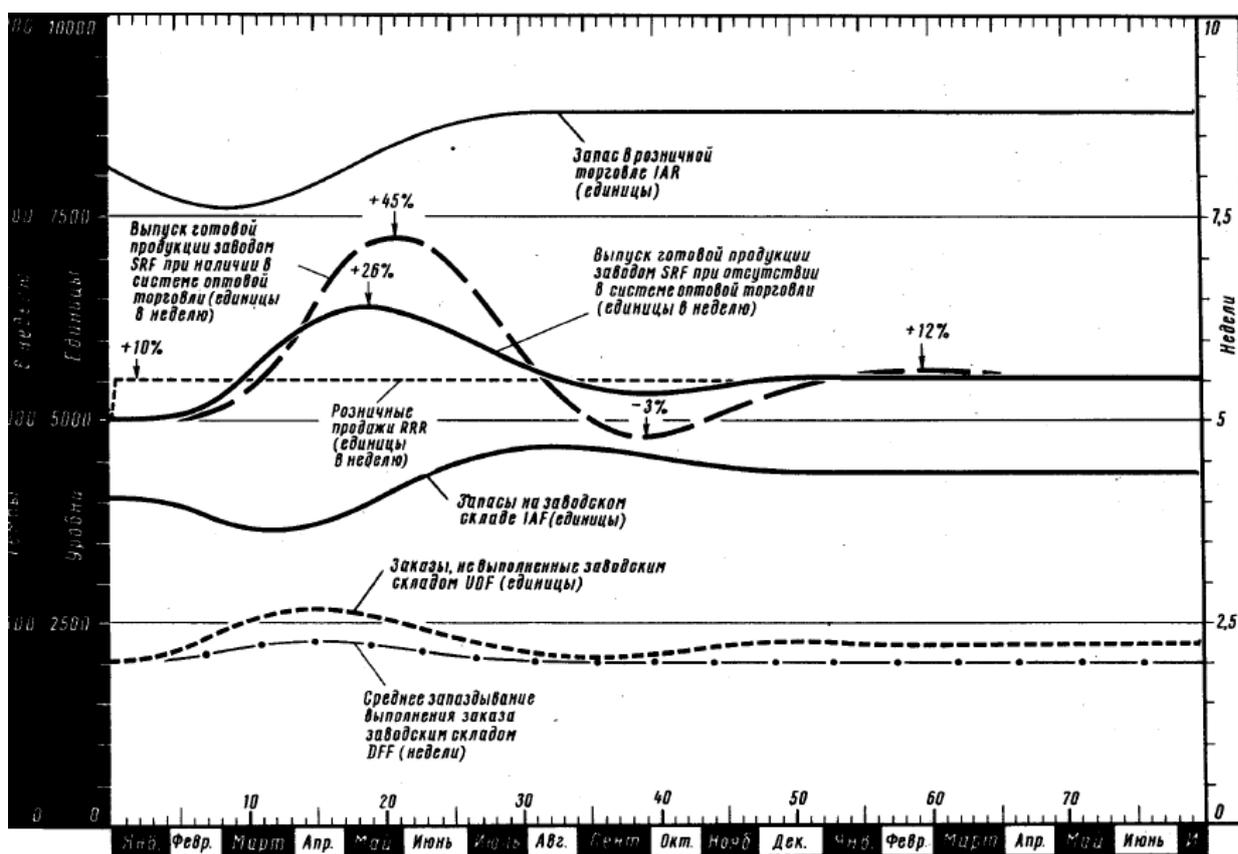


Рисунок 4.11.в – Исключение из системы звена оптовой торговли.

- ликвидация оптового звена, изменение правил регулирования запасов (рисунок 4.11 в). Показано, как решения организационного характера могут улучшать деятельность производственной системы.

Проведенное исследование помогло понять, каким образом регулирующие решения и запаздывания во времени во взаимосвязанных звеньях могут привести к неустойчивым колебаниям, а изменение в правилах руководства и организационной структуре приводят к существенному улучшению промышленной и экономической деятельности предприятия.

Расширение области применения динамических моделей в корпоративном управлении.

«Примерно в то время, когда начиналась системная динамика, меня (из воспоминаний Дж. Форрестера) попросили выступить на заседании правления одной высокотехнологичной компьютерной компании. Я не понимал природу роста высокотехнологичных компаний, но хотел бы и создал системно-динамическую модель, чтобы на основе нее сформировать свое мнение. Моделирование дало много предположений о том, почему высокотехнологичные компании часто растут до определенного уровня, а затем приходят в стагнацию или прекращают существование. Такое моделирование развития предприятия перемещало системную динамику из сферы таких физических переменных как запасы в намного более тонкие материи. Более 90 процентов переменных той модели касались структуры влияния высшего исполнительного руководства,

лидерских качеств, характера основателей, того, как создаются цели организации и как прошлые традиции организации влияют на принятие решений и определяют ее будущее. Модель также оперировала взаимодействиями между производительностью, ценой, качеством и задержкой поставки. Эта модель развития предприятия была одним из наиболее ранних проектов по моделированию с применением системной динамики» [47].

Джей Форрестер не останавливается на разработанной им модели и предлагает различные пути ее развития, а также расширение области применения системной динамики в корпоративном управлении в таких областях, как:

- Исследование динамики рынка (цена, покупатели, спрос, реклама, конкуренция и т.п.);
- Модель расширяющегося производства, в модели дополнительно рассматривается поток оборудования.
- Использование рабочей силы и обучение персонала. Вводится поток рабочей силы и правила регулирования численности рабочих.
- Денежные средства и бухгалтерский учет. Капиталовложения. Детализируются финансовые потоки предприятия.
- Управление исследованиями и техническими усовершенствованиями,
- Эффективная структура высшего руководства,
- Долгосрочное планирование деятельности предприятия
- Модели промышленных отраслей
- И др.

Исследования в области стратегического управления с применением системной динамики были продолжены работами коллег и учеников Джея Форрестера: наиболее известные из них - Джон Стерман, руководитель группы системной динамики, профессор Слоановская школа бизнеса Массачусетского Технологического института, Уоррен, получивший престижную премию Дж. Форрестера за вклад в развитие и популяризацию системной динамики, Дж. Моректрофт, Лондонская Школа Бизнеса.

В настоящее время применение системной динамики в сфере управленческого консалтинга и стратегического менеджмента очень широко: от моделирование поведение организации во время роста на рынке или преодоление «барьеров роста» (growth management), - до стратегического менеджмента и принятия оптимальных управленческих решений, от логистики и управления цепями поставок, управления проектами - до трансформации компании в «обучающую организацию» и управление знаниями.

Анализ литературы и практика применения имитационного моделирования в корпоративном управлении [6,7,22,25,27] позволяет обозначить следующий спектр корпоративных приложений системно-динамического моделирования и шаблонов решений, который на практике приводит к созданию моделей для конкретных организаций и предприятий:

- *Стратегическая архитектура и динамика предприятия:*

Комплексный динамический анализ взаимосвязей и формирование стратегии предприятия на основе обобщенной системно-динамической модели, анализ причин корпоративного роста и угроз с помощью когнитивных карт менеджеров. Разработка и принятие стратегических решений в целом по предприятию (фирме, холдингу). Разработка комплексных стратегических планов и сценариев развития, устойчивых к колебаниям рынка, наращивания экономической мощи предприятия, расширения и диверсификации бизнеса, определения приоритетов.

На основе обобщенной системно-динамической модели предприятия, отражающей стратегическую архитектуру предприятия, в дальнейшем осуществляется разработка детализированных имитационных моделей, с помощью которых ведется подготовка стратегических и тактических решений по различным направлениям деятельности предприятия и функциональным составляющим бизнеса:

- *Бюджетинг и управление финансовыми потоками:*

Моделирование финансовых потоков. Финансовое планирование (среднесрочное) на основе динамической модели: механизмы распределения и управления финансовыми потоками, комплексное управление издержками, налоговое планирование, обслуживание кредитной задолженности, дивидендная политика, социальная политика и т.п. .

Управление рисками. Анализ ликвидности и финансовой устойчивости банка в условиях рыночного риска.

- *Инвестиционное планирование и управление проектами:*

Разработка инвестиционных планов и проектов и их организационно-финансовое обеспечение; формирование перспективных заделов – новых производств и видов бизнеса, обновление производственных фондов и продуктового ряда, ввод запланированных мощностей для выполнения производственно-сбытовой программы фирмы и др., диверсификация направлений бизнеса. Управление инновациями.

- *Управление производственной программой. Комплексное управление логистическими процессами на предприятии:*

Производственный менеджмент: структура и темп производства, объем производства, оценка реальных производственных возможностей, развитие и обновление парка оборудования.

Управление активами, определение потребности в ремонтной мощности и др.

Управление цепью поставок (синхронизация логистических сущностей при реализации стратегии «точно в срок», минимизация затрат по всей логистической цепи), материально-техническое обеспечение (планы поставок, производственно-сбытовые планы).

Детализированные, близкие к «физическим», имитационные модели технологических процессов, промышленных и хозяйственных систем; календарное и оперативное планирование на основе дискретных имитационных моделей.

Логистический аудит предприятия с применением имитационного моделирования.

Управление запасами, складская и транспортная логистика, проектирование инфраструктуры логистических и складских комплексов.

Управление качеством на основе процессного подхода.

- *Управление общефирменной сбытовой сетью. Формирование маркетинговой стратегии. Анализ динамики рынка:*

Координация производственно-сбытовых цепочек. Формирование дистрибутивной сети. Формирование маркетинговой стратегии и исследование ее влияния на прибыльность компании: реклама, PR, процессы ценообразования на основе динамики спроса и предложения. Анализ и управление спросом. Разработка стратегии привлечения и удержания клиентуры, максимальное удовлетворение потребностей клиентов на основе анализа динамики потребительского спроса, ценовая политика в регионах и др.

Анализ динамики рынка и конкурентной среды промышленной корпорации. Многоагентные модели фондового и других рынков. Анализ деятельности компании в условиях воздействия факторов внешней среды, конкурентного окружения, турбулентности рынка, с учетом рыночных и кризисных рисков. Разработка стратегии и общего сценария антикризисного управления.

- *Моделирование и анализ поведения бизнес-процессов. Реинжиниринг. Управление персоналом:*

Анализ нетривиальных управленческих ситуаций, анализ взаимовлияния различных видов деятельности предприятия на основе системно-динамической модели на ранних, преинвестиционных фазах реализации проектов реинжиниринга.

Аудит. Поиск оптимальных корпоративных схем и организационных структур.

Моделирование, анализ, реинжиниринг и оптимизация бизнес-процессов организации на основе процессного подхода с применением CASE-средств и имитационного моделирования.

Управление персоналом: стратегия обучения, формирования кадрового резерва.

- *Отраслевые и межотраслевые проекты:*

Управленческое моделирование топливно-энергетического комплекса, промышленных предприятий металлургии и др. отраслей с непрерывным производственным циклом (разработка

полезных ископаемых, добыча (шахты и скважины), переработка и транспортировка); госзаказы и экспорт, социально-экономическое развитие регионов.

Управленческий консалтинг и системное мышление менеджеров. Существуют научные, бизнес школы, наиболее известные Слоановская школа бизнеса Массачусетского Технологического института (руководитель группы системной динамики, профессор Джон Стерман), Лондонская Школа Бизнеса (Дж. Моректрофт, Англия), Манхеймский Университет (П. Миллинг, Германия) и др университеты Австралии, Канады, Германии, Италии, Японии, Норвегии, Испании, Швейцарии, Нидерландов, Англии, США в которых методология системной динамики развивается применительно к управленческому консалтингу .

Наиболее продвинутое достижение в этой области, возникшей на основе "мягкого системного анализа" и получившей название "системное мышление" ("System Thinking")[60] в последнее время были достигнуты в таких странах как США, Англия, Норвегия, Израиль, Тайвань культивированием системного мышления у менеджеров тех организаций, для которых строятся указанные модели. Работа в данном направлении осуществляется как в направлении построения различного рода причинно-следственных диаграмм, так и в направлении усовершенствования понятийного аппарата, ментальных моделей, на которые люди опираются в процессе принятия решений. В настоящее время для исследования когнитивных структур и механизмов, вырабатывающих такие ментальные модели используются современные достижения в области когнитивной психологии. Яркий представитель этого направления – Д. Стерман.

При этом в бизнес-школах используются такие активные средства обучения, как тренинги (например, проведение деловых игр), позволяющие формировать ментальные модели менеджеров.

Термин "системный подход" и «системное мышление» сегодня стал очень популярным. Термин подразумевает наблюдение, изучение, обсуждение систем, понимание их важности. Но в общем случае он не является видом количественного и использующего имитационное моделирование динамического анализа, который приводит к пониманию поведения. Дж.Форрестер [47]: «Системный подход и «системное мышление» может быть ключом к системной динамике. Опасность исходит от людей, полагающих, что на системном подходе все и заканчивается. Системный подход только делает ум более "чувствительным", обращая наше внимание на жизнь систем. Некоторые люди убеждены, что они многое узнали именно на стадии системного подхода. Но они прошли, быть может, только 5 процентов пути к пониманию системы. Остальные 95 процентов - это структурирование системно-динамических моделей и проведение на этих моделях вычислительных экспериментов. Только вычислительный эксперимент может обнаружить существующую несогласованность в наших умственных моделях.»

Крупнейшие консалтинговые компании в мире, такие как McKinsey&Company, Arthur Andersen, Cooper&Lybrand и другие, применяют методы системной динамики в сфере инвестиционного и управленческого консалтинга, Консалтинговые организации разрабатывают системно-динамические модели организации, строят с помощью моделей стратегические прогнозы, выдают рекомендации на основе экспериментов с моделями по совершенствованию деятельности компании, культивируют «системное мышление» менеджеров, формируют их ментальные модели, проводят различные тренинги, деловые игры в компаниях-заказчика, чтобы научить их пользоваться моделями.. Такая практика зарекомендовала себя для анализа деятельности и динамики развития крупных отраслевых компаний, например топливно-энергетического комплекса, электронной промышленности и др.,

Деловые и имитационные игры. Взаимодействие системно-динамической методологии с другими подходами оказалось довольно плодотворным в области развития активных методов обучения.

Так, на основе "кейс-стадиз" (метод ситуационного обучения) созданы системно-динамические модели, преодолевающие многие недостатки указанного метода "кейсов", т.к. помимо описательной информации позволяет использовать практический опыт менеджеров и показать многообразие динамических режимов поведения реальных процессов, которые следуют из различных выборов стратегий

К системному подходу можно отнести и деловые игры [15,16]. Весьма плодотворным в плане унификации ментальных моделей и обмена знаниями явилось взаимодействие системной динамики с другой областью, связанной с имитационными (деловыми) играми (Simulation and Gaming). Так, на базе системно-динамических моделей и методологии было создано большое количество имитационных игр, называемых в зарубежной литературе "имитаторами полетов" (Flight Simulators): Популярны в бизнес-среде: *"Игра по распределению пива"* (Beer Distribution Game) [66] - популярная в США игра, в которой участники играют роль распределителей пива, испытывая на себе функционирование сложной рыночной системы с характерными запаздываниями и обратными связями; *"Всемирное рыболовство"* (Fish Banks Ltd.) - игра, в которой участники должны избежать общественной трагедии, связанной с исчерпанием рыбных запасов, *«Производственная игра»* (Manufacturing game) и др.

Деловые игры демонстрируют существующую в системах сложность. Они показывают людям, что они не могут получить лучшие результаты, используя лишь опыт и эмпирические правила. Но деловые игры обычно не раскрывают перед участником внутренней работы игры и не позволяют понять, почему возникает та или иная динамика поведения. Они сосредоточены на принятии решения, тогда как системная динамика акцентирует внимание на формировании линии поведения, определяющей решения.

Широкое распространение в процессе образования системно-динамическая методология получила с середины 80-х годов, когда в рамках проекта K-12 (Kindergarten-12), возглавляемого Дж. Форрестером при содействии Б. Ричмонда системную динамику ввели в образовательный процесс уже на уровне средних школ (до этого системная динамика преподавалась только на университетском уровне).

Механизмы корпоративного роста в работах Стермана. Джон Стерман, руководитель системно-динамической группы, профессор Слоановской школы бизнеса при Массачусетском технологическом институте (MIT) в своей книге «*Business Dynamics: System thinking and modeling for the complex world*» [60] описывает механизм корпоративного роста компании. По мнению Стермана бурный рост многих новых компаний связан с умелой эксплуатацией самоусиливающихся обратных связей. Используемые в анализе причинно-следственные диаграммы представляют упрощенную картину позитивных кругов обратной связи. Совокупность петель обратной связи называют циклом роста компании и исследуются эффекты от действий циклов позитивной обратной связи. Управлять ростом организации возможно на базе эффектов позитивной обратной связи. Стерман в процессе исследования причин корпоративного роста выделил и описал с помощью инструментария причинно-следственных диаграмм петли обратной связи, влияющие на процессы роста компании.

Среди них рассмотрены такие эффекты как:

- Осведомленность о продукте и объем продаж.
- Экономия на масштабе. С ростом производства сокращаются издержки на единицу продукции. Это приводит к росту дохода и дальнейшему наращиванию производства.
- Экономия от совмещения. Эффект возникает когда компания может использовать наработанные ноу-хау, технологии работы или производства, разнообразные ресурсы применительно к нескольким продуктовым линейкам, в разных отделах или подразделениях корпорации.
- Кривые обучения. По мере развития компании специалисты набирают опыт, что снижает издержки и приводит в итоге к росту объема продаж, что позволяет дальше совершенствовать персонал.
- Затраты на R&D. Чем крупнее компания тем больше она может потратить на научные исследования и совершенствование своей продукции. Это приводит к увеличению продаж и в итоге к дальнейшему росту затрат на R&D.
- Развитие комплиментарных товаров. Корпоративный рост компании создает благоприятные условия для появления на рынке дополняющих товаров других производителей. Развитие таких товаров положительно сказывается на популярности фирмы и в итоге только увеличивает ее объем продаж. В случае, если процесс

формирования комплиментарных товаров будет продолжаться значительный период времени, есть вероятность, что дополняющие товары станут серьезным входным барьером для новых игроков на рынке и обеспечат фирме лидерство на рынке в долгосрочной перспективе.

- Разработка новых уникальных продуктов. С ростом компании у нее появляется больше возможностей для разработки новых продуктов, что позволяет получать больше ценовой премии за продукты и увеличивает отраслевой спрос. Все это в итоге ведет к дальнейшему росту объема продаж и доходов компании.

Всего в процессе исследования причин корпоративного роста Джоном Стерманом было выявлено более тридцати петель обратной связи, влияющих на процессы роста компании. Некоторые причинно-следственные диаграммы представлены на рисунке 4.12. Системная динамика призвана помочь менеджерам компании наиболее эффективно использовать позитивные обратные связи, акселераторы роста компании с целью получения преимущества на рынке по сравнению с другими игроками.

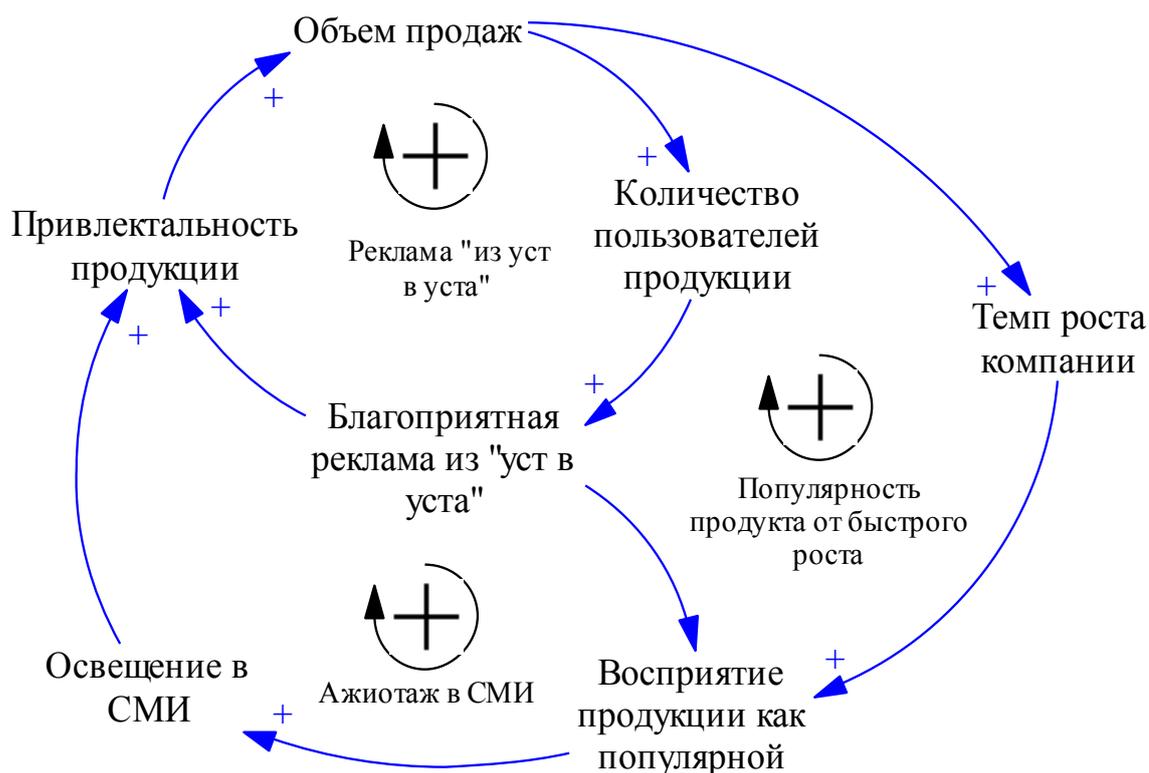


Рисунок 4.12a – Причинно-следственная диаграмма: акселератор осведомленности о продукции, реклама из «уст в уста» и благоприятное освещение в СМИ

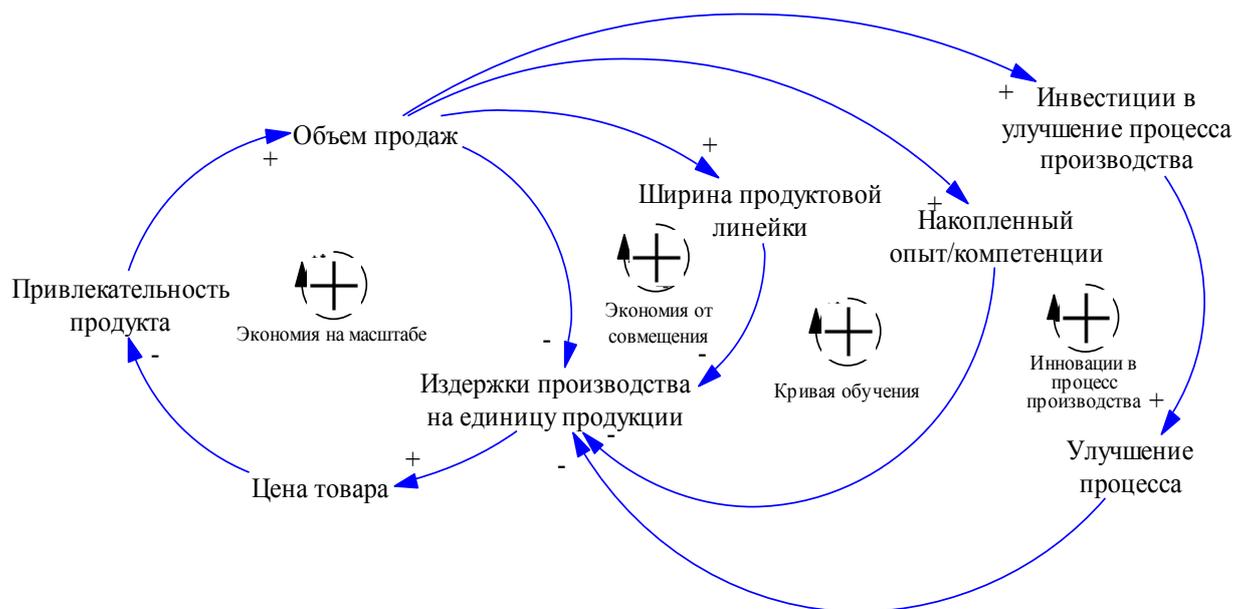


Рисунок 4.12 б – Причинно-следственная диаграмма: акселераторы экономии на масштабе производства, экономии от совмещения, кривой обучения и производственных инноваций.

Формируемые таким образом причинно-следственные диаграммы являются инструментарием для построения ментальных моделей менеджеров, позволяют организациям формировать механизмы учета качественной информации, которые в дальнейшем могут составлять информационную основу для создания системно-динамических моделей, позволяющих изучать деятельность организаций и формировать ее стратегию на долгосрочный период. Общая структура модели организации, формирующей свою конкурентноспособную стратегию, в работах Дж. Стермана [60] представлена в следующем виде (рисунок 4.13), и учитывает такие важные составляющие стратегии организации как маркетинговая, инвестиционная, инновационная деятельность.

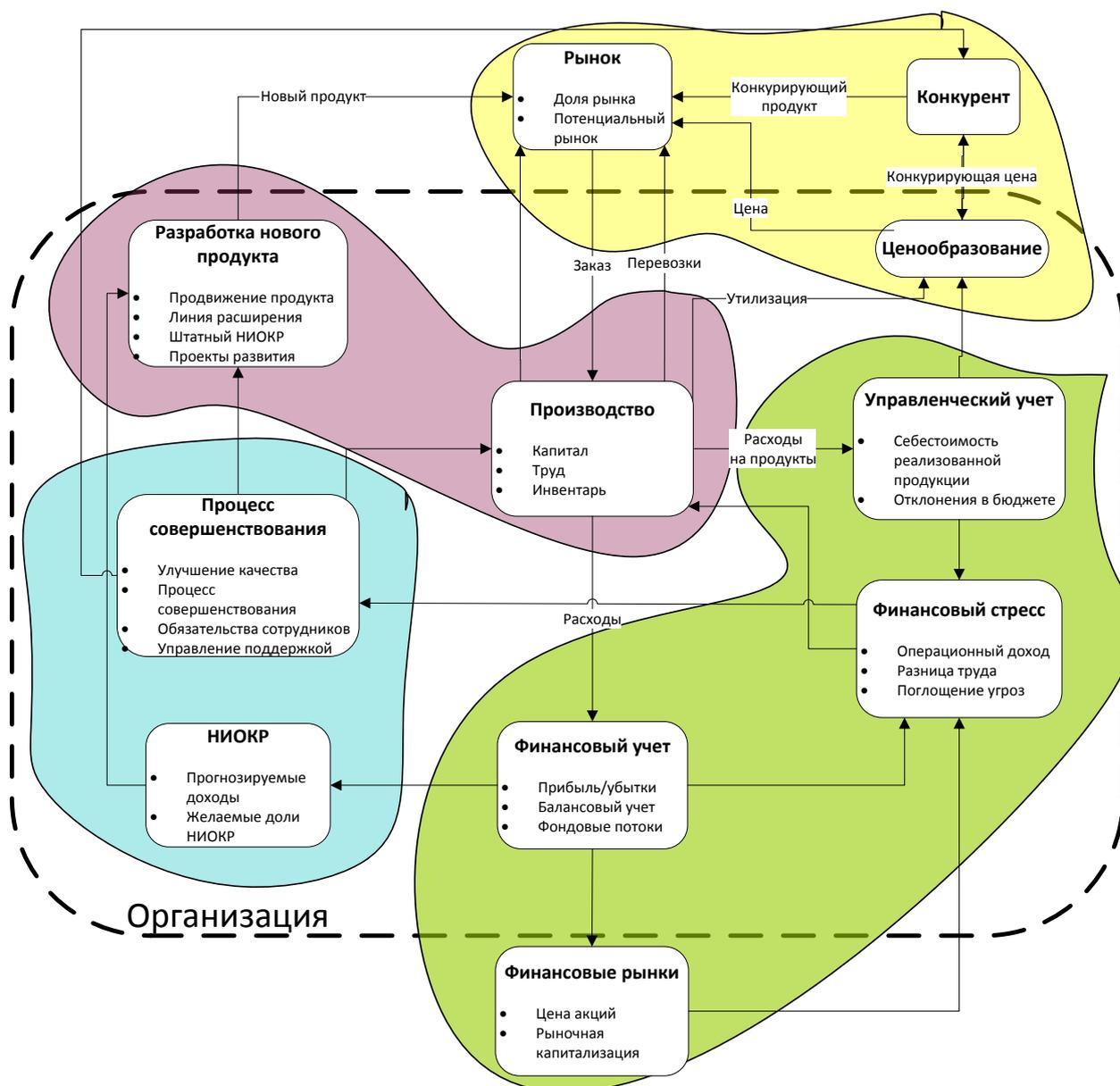


Рисунок 4.13 – Структура организации и ее динамической модели в работах Дж. Стермана.

Стратегическая архитектура по Уоррену. Ким Уоррен (Kim Warren), профессор Лондонской школы бизнеса, сумел эффективно объединить постулаты ресурсного подхода в стратегическом управлении вместе с ключевыми положениями системной динамики, основав новое направление – теорию динамической стратегии - dynamic strategy resource view (DSRV). Свои взгляды он изложил в книгах *Competitive Strategy Dynamics* и *Strategic Management Dynamics* [62,63].

Согласно Киму Уоррену, организация представляет собой систему динамически взаимодействующих (взаимосвязанных) между собой ресурсов, функционирование которых основывается на взаимоусилении и ослаблении ключевых ресурсов.

Ресурсы организации – все доступные организации ресурсы, ее способности, организационные процессы, информация, знание и т.п., которые контролируются организацией и позволяют ей на их базе разрабатывать и реализовывать стратегии, повышающие ее эффективность и результативность, т.е. фактически – это сильные стороны организации, на основе которых строится ее стратегическое преимущество. Заметим, что имеются в виду не только материальные активы, но и нематериальные, например, такие как знания, компетенция и профессионализм персонала, репутация компании на рынке, качество продукции, ноу-хау и технологии и многое другое может являться ценным ресурсом для компании.

В основе построения потоковой диаграммы системно-динамической модели лежит представление ресурсов в виде «потоков и накопителей», изменяющихся во времени. Взаимодействие ресурсов на практике и представляет деятельность организации в любой момент времени. Понимание важности взаимозависимости разнообразных ресурсов в организации вносит важный вклад в представление организации как интегрированной системы.

Уоррен предлагает метод изображения ключевых ресурсов и взаимосвязей между ними – «стратегическую архитектуру». *Стратегическая архитектура* по Уоррену представляет собой набор стратегически важных ресурсов для получения конкурентного преимущества и успешной деятельности организации, это «ментальная модель» того, как менеджеры организации воспринимают собственную организацию и ее ресурсы. Стратегическая архитектура состоит из накопителей ресурсов (стоков), потоков, их изменяющих, и переменных сети причинно-следственных связей. Сеть причинно-следственных связей является основой стратегической архитектуры, представляет комбинацию самовоспроизводящихся кругов обратной связи, объединяет между собой структуру ресурсов организации и управляет процессами аккумуляции ресурсов.

Формирование и анализ стратегической архитектуры позволяет проследить влияние управленческих решений на развитие организации, найти специфические точки приложения управленческого решения, которые позволяют влиять на эффективное функционирование организации. В качестве иллюстрации своего подхода Ким Уоррен приводит пример возможной стратегической архитектуры вывода новой торговой марки (бренда) на рынок.

В своих работах [62] Уоррен рассматривает также совмещение и отображение базовых проекций (финансы, бизнес-процессы, клиенты, обучение и рост) и системы сбалансированных показателей с подсистемами и индикаторами системно-динамической модели предприятия.

Теория динамической стратегии, предложенная Уорреном, основанная на ресурсном подходе стратегического менеджмента, позволяет формировать системно-динамическую модель

организации на основе ее «стратегической архитектуры», отражающей структуру организации через сложные динамические взаимодействия ее материальных и нематериальных ресурсов, активно взаимодействующей с внешней средой.

Преимущества использования системной динамики в стратегическом управлении.

Стратегическое управление направлено на достижение долгосрочных целей организации путем адаптации к изменениям внешней среды. Задачи стратегического анализа сложны и требуют учета большого числа факторов, интересов, угроз и последствий. На стратегическом уровне управления присутствует высокая степень неопределенности в оценке внешней среды, слабая формализация методов управления и широкое использование экспертных оценок и знаний, многокритериальность при оценке принимаемых решений. Стратегический план редко включает цифровые показатели, осуществленный выбор формируется преимущественно в качественных показателях и не дает очень точных прогнозов, по крайней мере, в долгосрочном периоде, более важными является определение тенденций, вероятного изменения основных параметров хозяйственной системы, отражающих долгосрочные результаты деятельности при принятии стратегических решений. Сложность выбора стратегической альтернативы в динамически развивающейся ситуации, в условиях внешней и внутренней неопределенности заключается в необходимости удовлетворения большого числа противоречивых требований по различным направлениям деятельности компании: финансово-производственная, рынок и отношения с клиентами, кадровые ресурсы компании, внутренние бизнес-процессы, отношения с государственными органами и др., а также в большой доле субъективности при оценке ситуации и неточном понимании своих целей со стороны ЛПР и руководителей.

Этим обусловлено использование в качестве основного инструмента моделей и методов системной динамики. Использование моделей системной динамики для стратегического управления имеет следующие преимущества:

- возможность использования многоцелевых критериев оценки эффективности деятельности предприятия при построении и исследовании моделей;
- проведение исследований на основе неполной информации с применением знаний экспертов;
- имитационная модель является наиболее подходящей для исследования динамической ситуации, когда параметры системы и внешней среды меняются во времени;
- исследование поведения системы посредством выявления причинно-следственных отношений и взаимодействий контуров обратной связи, проявляющегося в особенностях ее структурной организации;

- хорошая интерпретируемость системных потоковых диаграмм, что дает возможность проведения совместных экспертных ревизий при обсуждении проблем, формировании ментальной модели и выработки согласованных решений;
- имитационная модель выступает как удобный инструмент сценарного планирования и экспериментального проигрывания большого множества сценариев типа «что-если»;
- технология проведения сценарного исследования на имитационной модели предполагает активное участие эксперта в процессе формирования ментальной модели и принятии решения, - он детализирует проблему и модель, осуществляет генерацию альтернатив и сценариев, проводит сценарные исследования на имитационной модели, выбор и ранжирование критериев, а также анализ и интерпретацию результатов сценарных расчетов, что позволяет учитывать субъективные предпочтения эксперта и его опыт в процессе принятия решения. Компьютер только упрощает, помогает эксперту в выработке решения, а не заменяет его опыт и знания.

Динамика города.

В 1968 году Дж. Форрестер переместил системную динамику из области корпоративного моделирования в область более открытых социальных систем. «Динамика города» [44] создавалась с целью поиска закономерностей в структуре и развитии города, которые бы объяснили его стагнацию и безработицу, и позволила объединить усилия и опыт в моделировании Дж. Форрестера и опыт управления городом Джон Ф. Коллинза, который был мэром Бостона в течение 8 лет, и в то время читал лекции по городскому хозяйству в МТИ, а также результаты продолжительных собеседований с политиками и бизнесменами. «Динамика развития города» поначалу встретила сильное, эмоциональное неприятие в среде чиновников и политиков городского управления, а позже признана логически обоснованной и верной.

Модель Дж. Форрестера является первой, в которой предпринята попытка динамического описания городской системы. В книге исследуется жизненный цикл урбанизированной территории с использованием методов системной динамики.

Предложенная Дж. Форрестером теория городских взаимодействий рассматривает город как сложную социальную систему, жизнедеятельность которой, функционирование и развитие определяются взаимодействием подсистем, отношения между элементами которой существенно не линейны. Сложные городские системы характеризуются наличием огромного количества цепей обратной связи — положительных и отрицательных — между взаимообусловленными, влияющими друг на друга элементами систем. Каждое данное состояние какого-либо элемента определяется практически всей историей существования системы, всем множеством взаимных связей других элементов, влияющих на состояние этого элемента.

Работа посвящена исследованию процессов роста, стагнации и возрождения урбанизированных территорий (городов). Урбанизированная территория—это система, в которой взаимодействуют различные виды предпринимательства, жилой фонд и люди. При благоприятных условиях взаимодействие указанных компонентов на вновь осваиваемой территории стимулирует ее развитие. Но по мере эволюции территории и застройки земельных площадей внутри нее процессы старения приводят к стагнации. Пока урбанизированная территория проходит через стадию роста к стадии равновесия, состав ее населения и экономическая активность внутри нее претерпевают изменения. При отсутствии постоянного обновления полное освоение земель приводит урбанизированную территорию, некогда процветавшую, к упадку, характеризующемуся высоким процентом ветшающего жилья и испытывающего застой предпринимательства. Урбанизированная территория, прошедшая фазу роста населения и внутреннего развития, достигает состояния равновесия, характеризующегося рядом признаков, или «условиями стагнации».

Урбанизированная территория — сложная, саморегулирующаяся система, внутри которой создаются напряжения, изменяющие экономическую деятельность и обуславливающие сдвиги в использовании земельных участков, строений и миграции населения. Эти изменения проявляются главным образом в сооружении, последующем одряхлении и, наконец, разрушении производственных и жилых помещений на фоне движения населения.

Задача состояла в том, чтобы с помощью имитационной модели проанализировать жизненный цикл урбанизированной территории, отразить различные аспекты ее развития, понять динамику и исследовать влияние административных мер в стадии стагнации, которые способны возродить город и вернуть ему здоровую экономику.

Обобщенная модель города отражает узловые процессы, общие для всех урбанизированных территорий, включает в себя наиболее важные компоненты с точки зрения эволюции городской системы в целом, которые всегда взаимодействуют в процессах роста и стагнации города.

Исходя из принципа замкнутости, в модели определяются *границы городской системы в неограниченной окружающей среде*. Город контактирует с внешней окружающей средой, но не изменяет ее. Город рассматривается как самоуправляемая система, которая регулирует взаимодействующие с ней миграции людей из и во внешнюю среду. Безграничность же окружающей среды выражается в том, что всегда существует поток людей, мигрирующих в город извне, если этот город кажется более притягательным по сравнению с прежним местожительством этих людей. Окружающая среда в то же время способна принимать в себя тех людей, для которых город представляется менее притягательным.

Притягательность, генерируемая внутри системы и прогнозируемая внутренней ситуацией в городе, является существенным фактором. В модели притягательность города

определяется такими переменными, как социальная мобильность, наличие жилья, размер общественных затрат, наличие мест работы, программы государственной помощи городам. Если для какой-либо категории населения город оказывается более притягательным, то население этой категории будет мигрировать в город. В обратном случае начнется миграция из города во внешнее окружение. При этом существенно только различие в притягательности города и внешней среды.

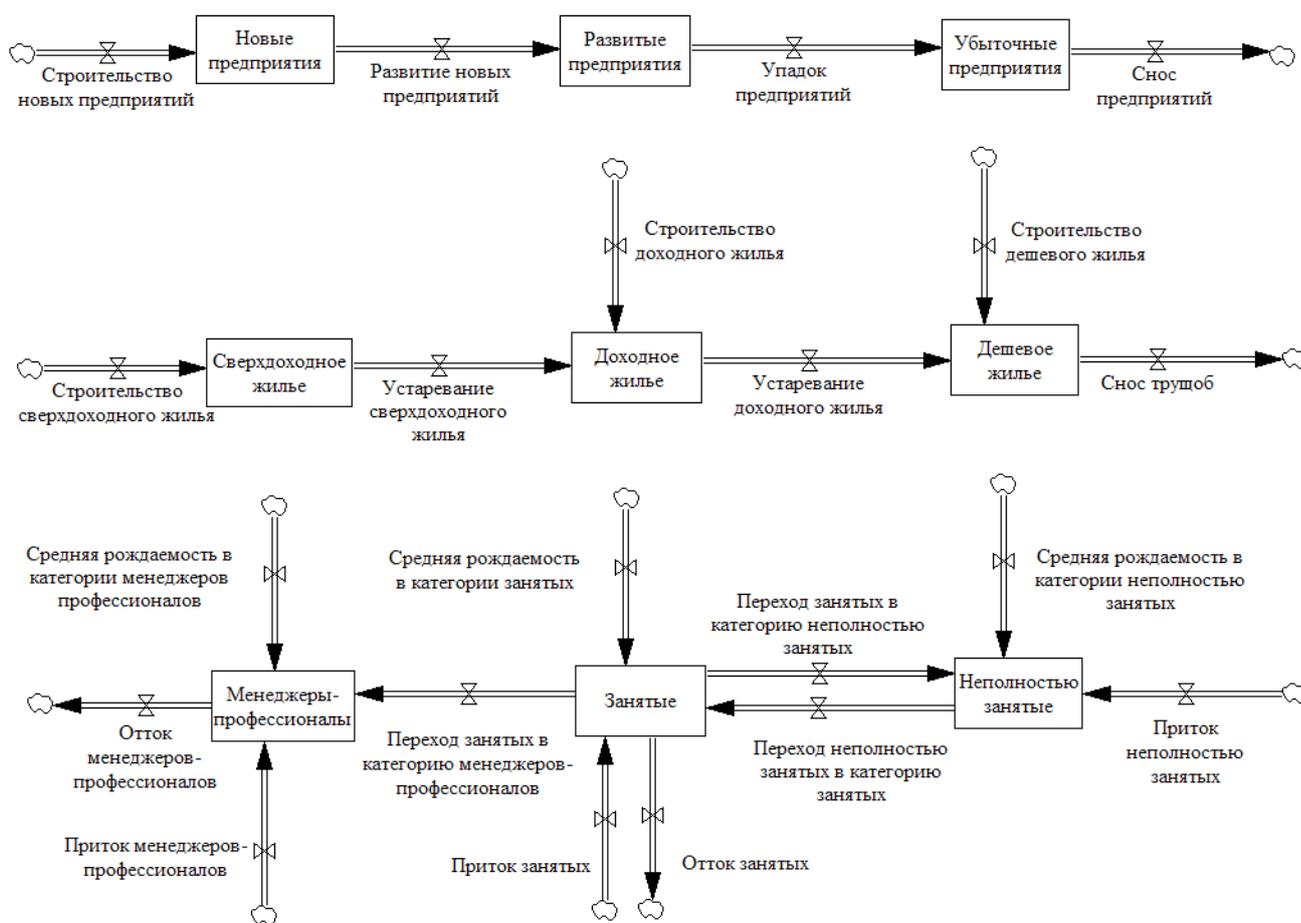


Рис.4.14 – Общая структура модели городской системы.

Внутреннюю структуру модели городской системы (рис. 4.14) составляют три подсистемы: **деловая (предпринимательская) сфера, жилой фонд и население**, именно они составляют динамический каркас структуры города. Изменения в пропорциях жилого фонда, населения и предпринимательской деятельности являются главными регуляторами процессов роста и стагнации города. Каждая из указанных выше трех подсистем, входящих в эту модель, разделена на три блока, которые характеризуют основные этапы в развитии подсистемы.

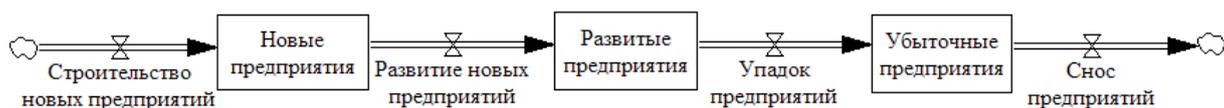


Рисунок 4.15 а – Подсистема «Предпринимательская активность».

Потоковая диаграмма подсистемы «Предпринимательская активность» приведена на рис. 4.15а, содержит три уровня и четыре темпа потока. Первый уровень этого сегмента модели означает количество создаваемых в городе новых предприятий. Вновь возникшее предприятие рассматривается здесь вместе с определенным участком земли и строениями на нем. Вновь возникшее предприятие обычно со временем и возрастом перемещается в категорию развитых предприятий. По истечении следующего ряда лет это предприятие переходит в третью категорию, включающую предприятия, пришедшие в упадок, а еще позднее его сносят и оно перестает существовать. Темп потока от одной категории предприятий к следующей, от одного прямоугольника к другому определяется не только временем, но и состоянием всей системы в целом.

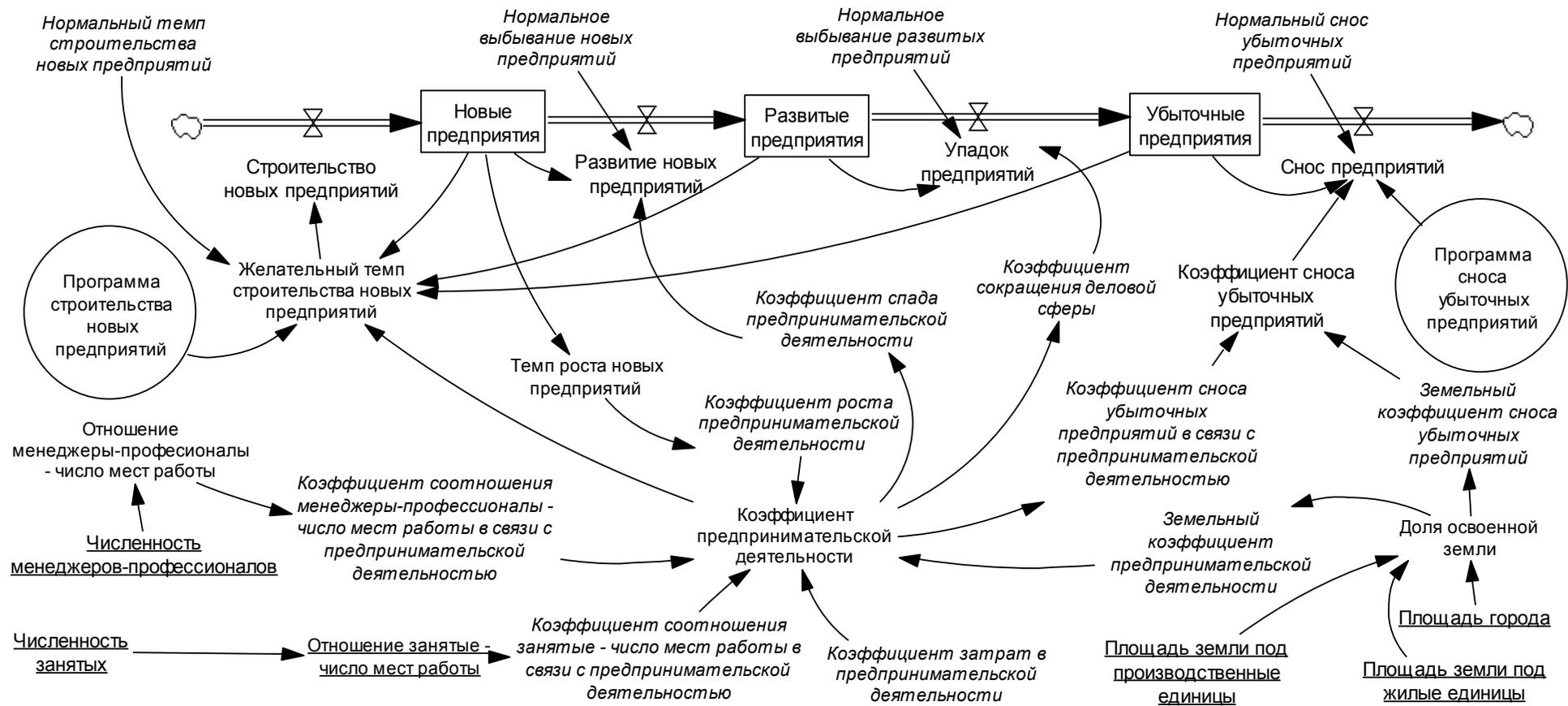


Рисунок 4.15 б – Поточковая диаграмма подсистемы «Предпринимательская активность».

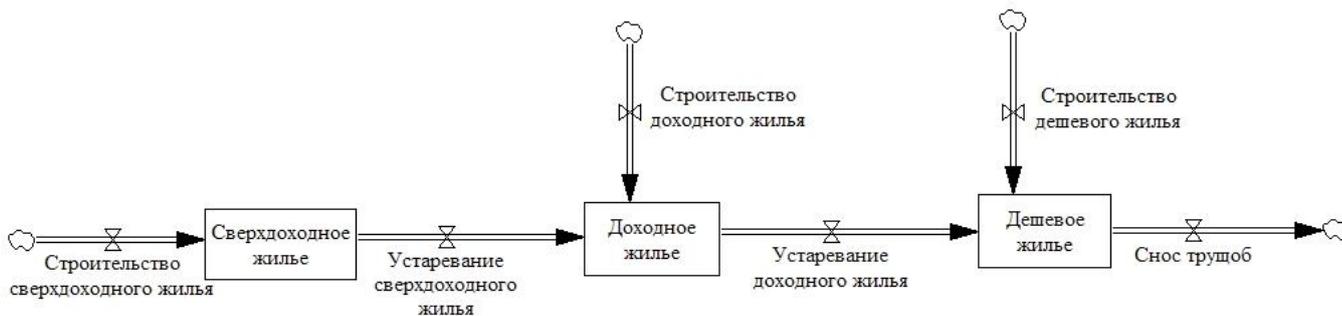


Рисунок 4.16 а – Подсистема «Жилой фонд».

Вторая подсистема (рис. 4.16 а), входящая в рассматриваемую модель, - «жилой фонд», отражает процесс строительства, старения и сноса жилых зданий в городе. Поточковая диаграмма подсистемы «Жилой фонд» (рис. 4.16 б.), содержит три уровня и шесть темпов соответствующего потока. Строительство сверхдоходного жилого фонда высшей категории, заселяемого менеджерами-профессионалами, отражает первое состояние потокового сегмента. По мере старения и в зависимости от спроса эти жилые здания переходят в категорию доходного жилого фонда, фонда средней категории, заселяемого квалифицированными кадрами, занятыми. Доходный жилой фонд со временем стареет и переходит в следующую категорию, категорию дешевого (убыточного) жилого фонда, заселяемого людьми из категории неполностью занятых. Темп, характеризующий устаревание и переход доходного жилого фонда в категорию убыточного, является функцией времени и спроса на жилье со стороны занятых. Устранение убыточного жилого фонда показано темпом сноса трущобного жилья, величина которого является функцией возраста жилых единиц этой категории и коэффициента занятости в городе. Кроме того, в городе может осуществляться непосредственное строительство, сооружение новых жилых домов в каждой из трех групп, что отмечено на потоковой диаграмме соответствующими потоками и темпами.

Кроме того, в городе осуществляется непосредственное строительство доходного жилого фонда, фонда средней категории, заселяемого квалифицированными кадрами, занятыми (темп потока, входящего в среднее состояние потокового сегмента сверху). При осуществлении программы строительства заведомо дешевого жилья создается жилой фонд, предназначенный непосредственно для неполностью занятых (темп потока, входящего сверху в крайнее правое состояние рассматриваемой подсистемы).

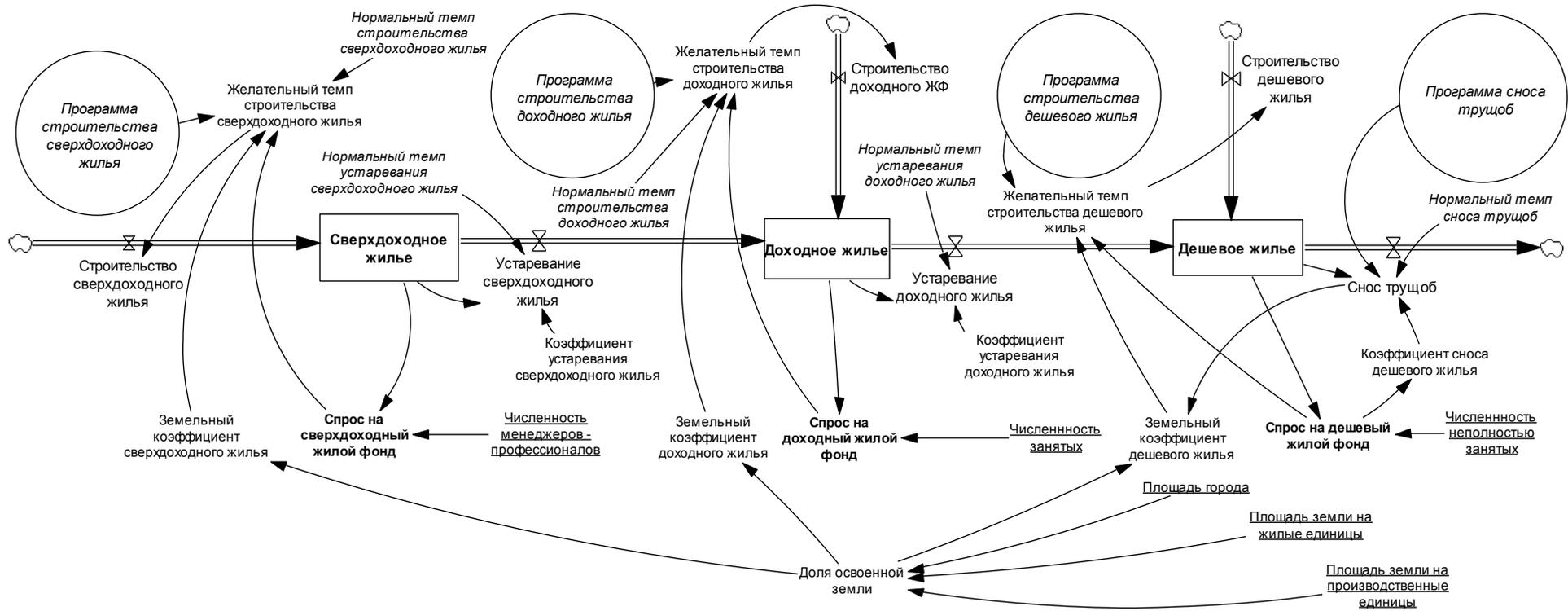


Рисунок 4.16 б – Поточковая диаграмма подсистемы «Жилой фонд».

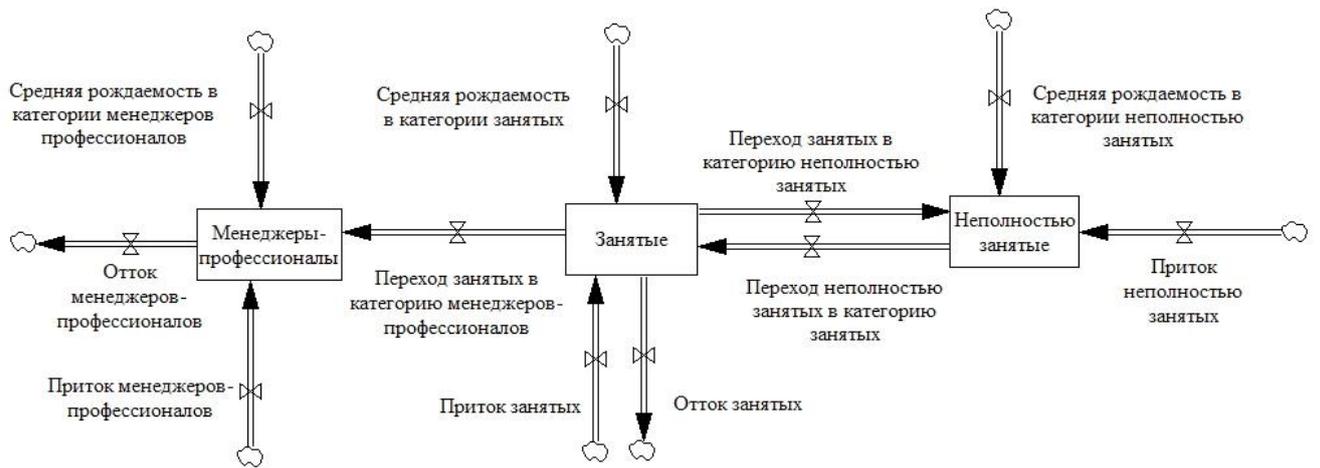


Рисунок 4.17а –Подсистема «Население».

Третья подсистема — «население», основным показателем состояния этой подсистемы является трудовая занятость. В подсистеме «население» рассматриваются три социальные группы, а под развитием понимаются переходы между ними. Если в первых двух рассмотренных подсистемах процесс развития рассматривается как однонаправленный, то в данной он имеет более сложный вид. Так, рабочие могут со временем переходить в группу безработных или в группу управляющих. Поточковая диаграмма подсистема на рис. 4.17 б, содержит три уровня и 12 темпов потока. Эта подсистема охватывает три категории населения: категорию менеджеров-профессионалов, категорию занятых и категорию неполностью занятых. К категории занятых относятся здесь квалифицированные кадры, полностью занятые в экономике города. Категория неполностью занятых включает безработных и потенциально безработных. Каждая категория населения может пополняться из внешней среды или же обедняться при переезде людей из города (показано темпами потока, входящими и исходящими от уровней снизу). Каждая категория населения характеризуется своим темпом рождаемости. Кроме того, подсистема, характеризующая население города, содержит понятие мобильности (качественной изменчивости) категорий населения, подразумевающее переход из категории неполностью занятых в категорию занятых и из категории занятых в категорию менеджеров-профессионалов и, наоборот, из категории занятых в категорию неполностью занятых (темпы потока между уровнями этой подсистемы). Величина темпов потока этой подсистемы зависит от пропорций населения в городе, наличного жилого фонда и от возможности получить работу.

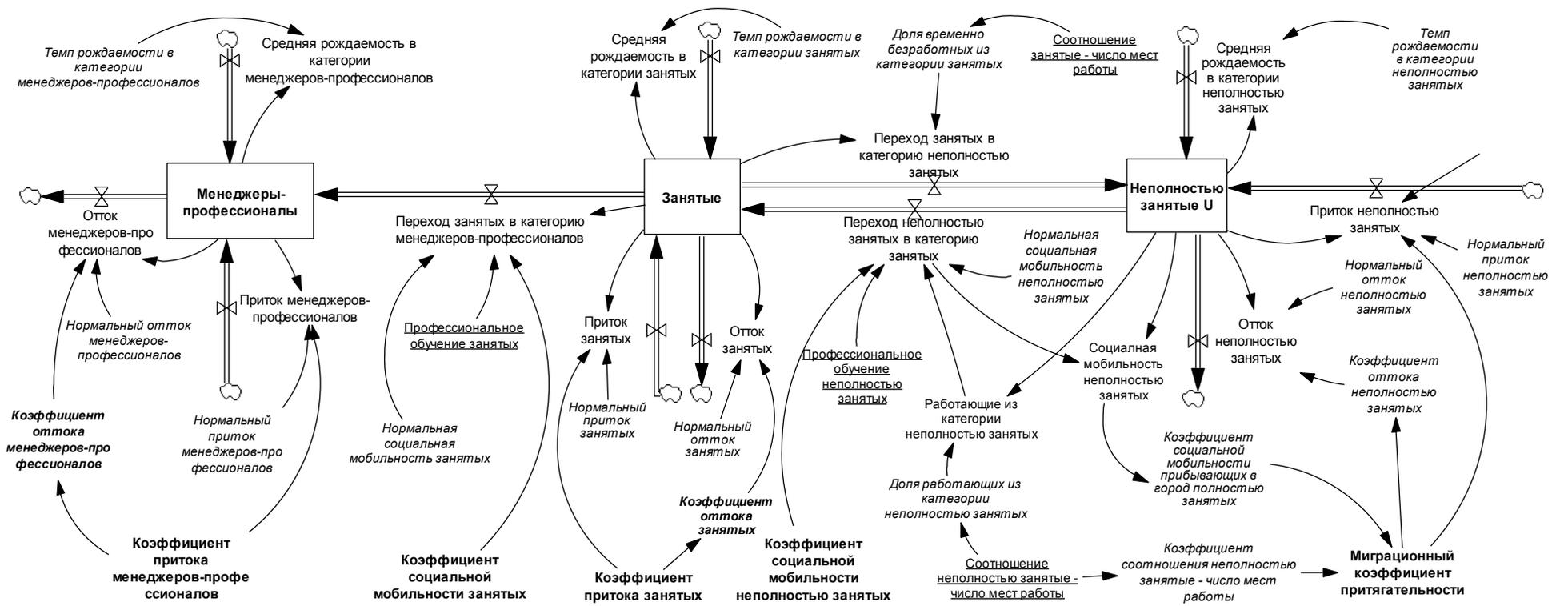


Рис.4.176 – Поточковая диаграмма подсистемы «Население».

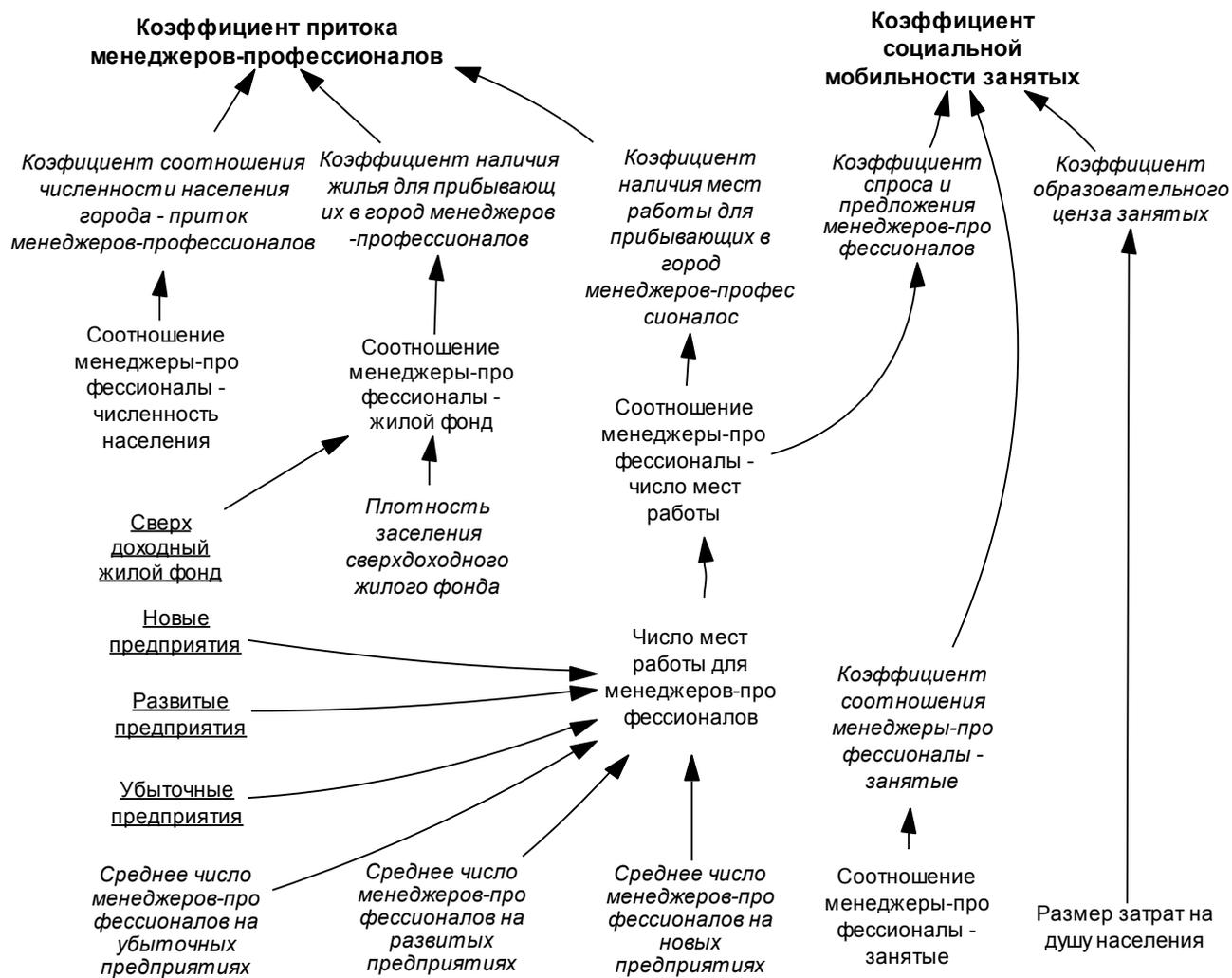


Рис.4.17б – Поточковая диаграмма подсистемы «Население»(продолжение).

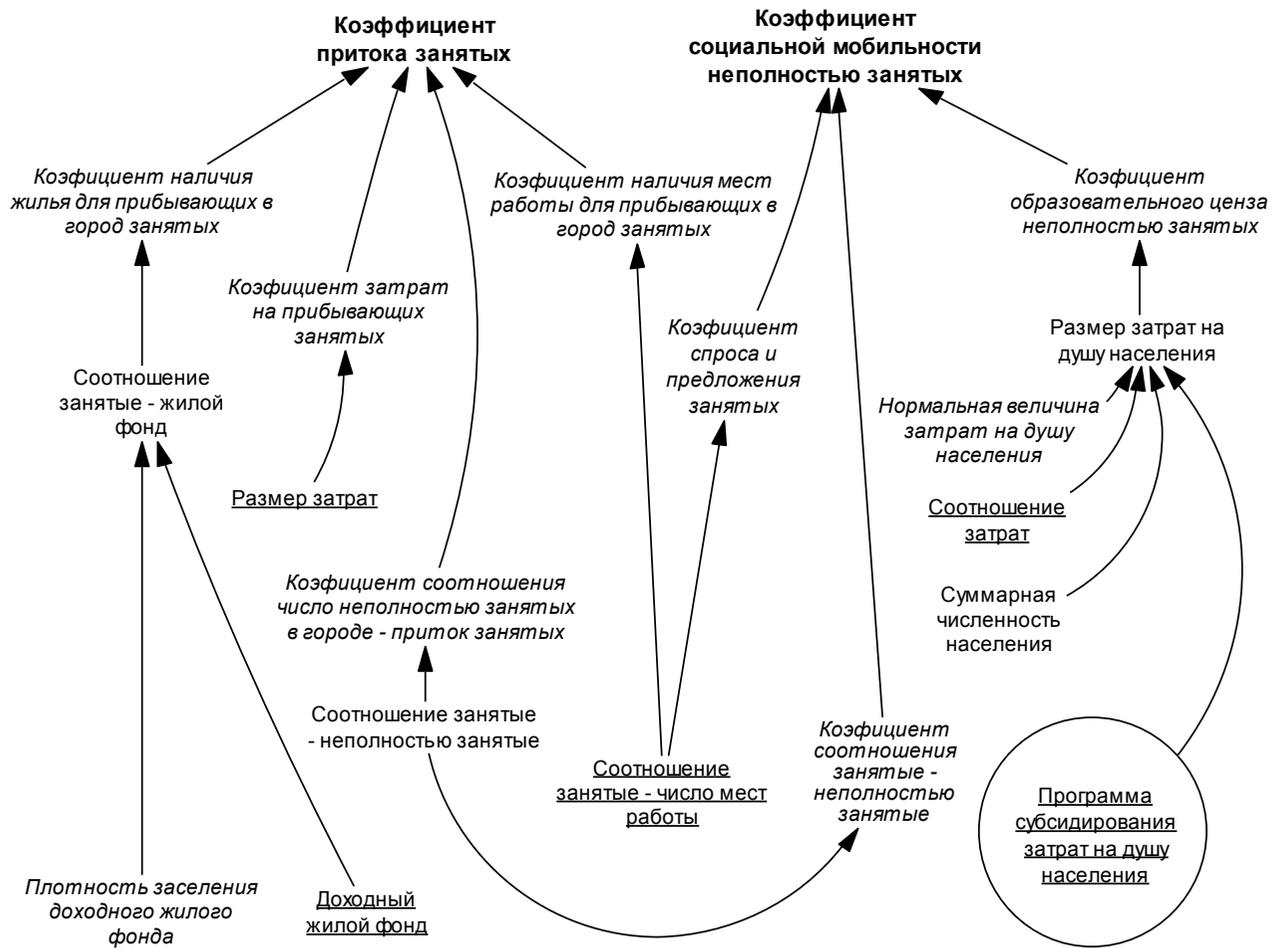


Рис.4.176 – Поточковая диаграмма подсистемы «Население» (продолжение).

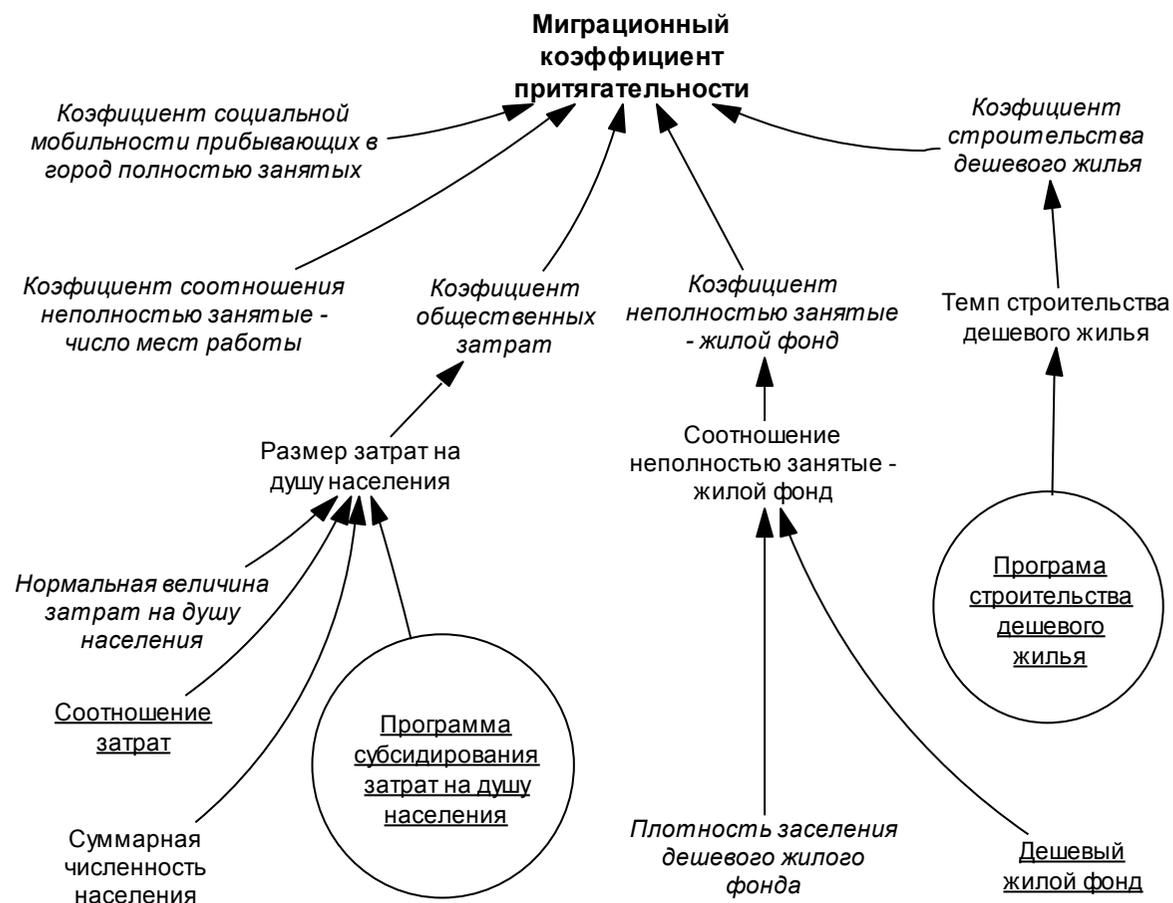


Рис.4.17в – Потоквая диаграмма подсистемы «Население»(продолжение).

В рассматриваемой системе непосредственно соотносятся три категории жилого фонда с тремя категориями населения. Это определяет, что именно подразумевается под категориями жилого фонда. Предполагается, что менеджеры-профессионалы занимают только сверхдоходные дома высшей категории, занятые (квалифицированные кадры) заселяют исключительно доходный жилой фонд и, наконец, неполностью занятые — убыточный (дешевый) жилой фонд. Такое соотношение позволяет увязать жилищное строительство как с его стоимостью, так и с экономической градацией населения. Три категории жилых зданий имеют различные плотности их заселения.

В то же время между предприятиями города и категориями населения подобного соответствия не существует. На любых предприятиях заняты люди из всех категорий населения города. На вновь возникших (новых) предприятиях занято больше людей, чем на развитых (зрелых) предприятиях; последние в свою очередь нанимают больше людей, чем предприятия, пришедшие в упадок.

Каждая из рассмотренных подсистем характеризует развитие во времени процессов в этих подсистемах. Все три подсистемы связаны между собой, эта связь описывается различными линейными или нелинейными алгебраическими уравнениями. В книге приводится детальное построение имитационной модели, показывающей динамику развития города. Каждый темп потока в любой данный момент времени, динамика процессов в каждом сегменте модели, определяется значениями нескольких уровней системы из всех подсистем модели, или информацией о нескольких уровнях. Информационная сеть имитационной модели отражает сеть связей, идущих от переменных уровней к темпам потока и приведена на рисунках. В качестве типичного примера взаимосвязи всех уровней системы со всеми темпами потока мы рассмотрим информационную сеть, связывающую все уровни системы с притоком в город неполностью занятых. Так, например как видно из рис. 4.17в, коэффициент миграции как функция притягательности, или миграционный коэффициент притягательности, определяется пятью факторами. Этими факторами являются: коэффициент социальной мобильности прибывающих (мигрирующих) в город неполностью занятых, определяющий переход неполностью занятых в категорию занятых; коэффициент соотношения неполностью занятые — жилой фонд, определяющий наличие жилого фонда в городе для этой категории населения; коэффициент общественных затрат, определяющий стоимость коммунальных, культурно-бытовых услуг в городе; коэффициент соотношения неполностью занятые — число мест работы, как возможность получить работу; и коэффициент, характеризующий программу строительства дешевого жилого фонда для неполностью занятых. То или иное сочетание этих факторов определяет динамику миграционных потоков в город в модели.

Таким образом, сложная городская система характеризуется наличием огромного количества цепей обратной связи — положительных и отрицательных — между влияющими друг на друга элементами систем. Каждое данное состояние какого-либо элемента определяется практически всей историей существования системы, всем множеством взаимных связей других элементов, влияющих на состояние этого элемента. Изменение состояний происходит не непосредственно под влиянием одного или нескольких процессов, не тотчас же, а с некоторой отсрочкой и только в том случае, когда целый ряд воздействий на протяжении значительного интервала времени как бы накопится в системе, аккумулируется, и тогда «созреют» необходимые и достаточные условия для изменения состояния элемента системы. Это, по-мнению Дж. Форреста, не позволяет провести анализ развития городской системы, разработать стратегию градостроительного решения на основе интуитивных представлений о ней. Такие системы контринтуитивны, проявляют сопротивляемость к административным решениям, которые могут привести к сдвигу, нарушению баланса в системе, существует также конфликт между краткосрочными и долгосрочными решениями.

Недостатки административных программ оздоровления города и возрождение города.

На разработанной имитационной модели была проведена серия экспериментальных исследований следующего содержания:

- исследовался 250-летний жизненный цикл урбанизированной территории,
- на имитационной модели проигрывались и анализировались последствия введения в стадии стагнации различных административных программ, направленных на улучшение городского климата;
- исследование административных программ, направленных на возрождение города.

Исследование жизненного цикла урбанизированной территории позволило выявить общие закономерности в развитии городских систем, и в определенном смысле подтверждало валидность разработанной модели и верность заложенных в нее логических построений. Проведенная имитация 250-летнего цикла развития города в соответствии с описанной в модели теорией городских взаимодействий, выявила следующие закономерности, выделив фазы роста, зрелости и стагнации города.

- Анализ жизненного цикла города показал, что период роста города укладывается в 100-летний промежуток времени. К этому моменту кривые, соответствующие новым предприятиям и сверхдоходному жилому фонду, достигают пика (максимума), а кривые численности менеджеров-профессионалов, занятых и доходного жилого фонда приближаются к максимуму. К 100-му году бум, связанный со строительством доходного жилого фонда, спал. Объем строительства сверхдоходного жилого фонда

существенно снизился по сравнению с его пиковым значением. 100-летний рубеж — это конец первой фазы развития урбанизированной территории. К этому времени территория города оказывается уже почти полностью использованной.

- Сразу же после 100-летнего периода роста город начинает стареть. Его земельные участки застроены. Новое строительство тормозится отсутствием свободной земли в пределах ограниченной и полностью занятой территории. Новые предприятия переходят в следующую возрастную категорию, в категорию развитых предприятий, которые в свою очередь эволюционируют в категорию пришедших в упадок предприятий. Сверхдоходный и доходный жилые фонды, достигшие пика к 100-му году, устаревают и постепенно пополняют дешевый жилой фонд, используемый неполностью занятыми. Роль последнего повышается и достигает пикового значения к 130-му году развития города.
- Минимум многих кривых наблюдается при времени, равном 150 годам. Первоначальный быстрый рост города до 100-летнего рубежа привел к некоторому количественному повышению объемов строительства. В период депрессии и уныния, наступающих между 100-м и 140-м годами развития города, объемы строительства оказываются ниже нормальных, соответствующих условиям равновесия. Лишь к 200-му году система надолго стабилизируется.

На протяжении примерно 100 лет наблюдалось возникновение города и его развитие. В фазе роста функционирование предприятий характеризуется высокой интенсивностью, и занятость на единицу площади торговой, промышленной и прочей нежилой застройки также высока. На этой стадии для занятых во всех сферах развивающегося городского хозяйства строится жилой фонд, и, так как население экономически преуспевает, плотность его на единицу площади жилых кварталов мала. Тип застройки определяет и стандартизирует соотношение между жилыми и производственными помещениями. Затем, по мере старения структур, предпринимательская деятельность в целом снижается, новые сферы бизнеса возникают вне города и занятость на единицу площади под нежилыми помещениями падает. Иная зависимость возникает при старении жилого фонда. Квартирная плата за ветшающий жилой фонд снижается, и степень заселенности повышается за счет тех людей, которых экономические обстоятельства вынуждают жить более скученно. Плотность заселения на единицу площади жилых кварталов увеличивается. Таким образом, к концу фазы роста достигается равновесие между предпринимательской деятельностью и плотностью заселения. Начиная с этого момента степень занятости уменьшается, в то время как население растет, пока не достигается новое состояние равновесия, при котором

экономические условия в городе ухудшаются настолько, что ограничивают дальнейший рост населения.

При переходе к фазе стагнации вся городская территория осваивается, строительство новых объектов сокращается и городская система останавливается в развитии. На этой стадии город характеризуется высоким процентом жилого фонда низшей категории и пришедших в упадок предприятий. Экономическая конъюнктура становится неблагоприятной из-за слишком высокого процента неполностью занятых по отношению к занятым. Эти изменения при переходе из фазы роста в фазу стагнации являются следствием старения структур городской системы и изменения характера деятельности внутри них.

Далее в книге анализировались различные виды административных программ оздоровления городов, традиционно применяемых для города, находящегося в фазе стагнации, т.к. программы занятости и обеспечения работой, профессиональное обучение неполностью занятых, финансовая помощь городам извне и строительство дешевого жилья. Проведенные эксперименты и анализ результатов моделирования показали, что ни одна из них не способна привести к существенному улучшению, а некоторые даже ухудшают существующее положение в городе. Так финансовая помощь городу извне не в состоянии улучшить определяющие условия жизни города и в конечном счете может даже ухудшить ситуацию вследствие неблагоприятных сдвигов в пропорциях населения, жилого фонда и предпринимательской деятельности «Из книги следовало, что все основные положения городской политики, которой придерживались США, были чем-то средним между нейтральными и очень вредными, если рассматривать город как учреждение или смотреть с позиции жителей с низким доходом и безработных. Было показано, что самой разрушительной политикой было строительство жилья для малоимущих. Такое строительство расходовало место, где могли быть созданы дополнительные рабочие места для безработных, если бы на том же месте было построено предприятие. Строительство жилья для малоимущих только усиленно воспроизводило бедность, а не уменьшало ее».

В ходе дальнейшего исследования рассматривались административные мероприятия по предотвращению упадка города. Они были направлены не на выявление симптомов, а на ликвидацию самих причин этого упадка. Исследование ряда административных программ позволило сделать вывод, что для возрождения города необходимо осуществить снос трущоб и застроить освободившиеся земельные участки новыми предприятиями. Только это способно оздоровить внутреннюю ситуацию в городе. Снос трущоб и ограничение строительства доходного жилого фонда приводят в течение первых десяти лет к уменьшению доли застроенной земли в городе. Это стимулирует увеличение объема строительства новых предприятий, которое обеспечивается возросшей численностью занятых. Число занятых

увеличивается вследствие расширения сферы торговли и производства и изменения соотношения занятые — неполностью занятые. Улучшение темпа потока, характеризующего затраты, стимулирует еще больший объем строительства новых предприятий и увеличивает число менеджеров-профессионалов и занятых, проживающих в городе. Программа стимулирования предпринимательской деятельности сочетала снос трущоб и стимулирование строительства новых предприятий. В течение первых 10 лет практически не наблюдается изменения ни в интенсивности притока не полностью занятых в город, ни в их оттоке. Город становится значительно притягательнее для неполностью занятых, так как экономический климат в нем улучшился, что способствует росту положительной социальной мобильности неполностью занятых, то есть их переходу в категорию занятых. Благодаря сносу трущоб и ограничениям строительства доходного жилого фонда скорость роста города несколько замедлилась. Зато город непосредственно приходит к более обнадеживающему состоянию равновесия, минуя условия, характеризующиеся повышенной безработицей и высоким процентом неполностью занятых по сравнению с занятыми.

С помощью имитационной модели удалось продемонстрировать эффективную разработку градостроительных мероприятий. Эксперимент подтверждал, что самовозрождение города, его оздоровление путем регулирования внутренних стимулов обещает более положительные результаты, чем оздоровление с помощью целевых государственных программ.

«Динамика развития города» и «Мировая динамика» явились исследованиями социально-экономических систем, положившими начало применения системной динамики в широком спектре прикладных применений системной динамики от моделирования территориальных, региональных систем, социальных проблем до моделей национальной экономики.

Имитационное моделирование социально-экономических систем.

Системное моделирование региональных процессов [23]. Методологической основой моделирования социально-экономического развития региона является системный анализ, центральной процедурой которого, как известно, является построение обобщенной (единой) модели региона, отражающей все факторы и взаимосвязи реальной системы.

Регион, как объект моделирования характеризуется:

- слабостью теоретических знаний, качественным характером знаний о системе, отсутствием теории развития города;

- высоким уровнем неопределенности исходной информации. Различают внутреннюю и внешнюю неопределенность. Внутренняя неопределенность – это совокупность тех факторов, которые не контролируются лицом, принимающим решение полностью, но он может оказывать на них влияние (например, внутренняя социально-экономическая обстановка, факторы риска и др.). Внешняя неопределенность определяется характером взаимодействия с внешней средой – это те факторы, которые находятся под слабым контролем лица принимающего решение (экологическая, демографическая, внешнеполитическая ситуация, поставка ресурсов в регион извне и т.п.);
- следствие этого является то, что результаты решения часто носят качественный характер и не позволяют судить о направлениях развития динамических процессов, выполнять анализ устойчивости динамических процессов.

Анализ и моделирование социально-экономических, региональных процессов необходимо выполнять с учетом следующих характерных особенностей:

- регион рассматривается как сложная слабоструктурированная система, системное моделирование которой предполагает выявление большого количества сложных взаимосвязанных причинно-следственных связей между факторами, рассматриваемыми в описании сложной системы, результат действия которых не всегда очевиден при принятии решений (территориальные системы контринтуитивны, как говорил Форрестер), в описании, структуризации объекта моделирования присутствует большая доля экспертных знаний;
- региональные системы – стохастические, исследование которых необходимо выполнять в условиях неопределенности и неоднозначности;
- регион – социальная система, поэтому в ней доминируют и учитываются природные и психологические (связанные с интересами людей и др.) факторы. При принятии решений необходимо учитывать долгосрочные интересы общества. Уровень развития региона призван, в первую очередь, обеспечивать условия воспроизводства человеческой жизни;
- регион – динамическая система. Исследование процессов воспроизводства требует изучения динамики развития системы, анализа процессов роста, с учетом общего жизненного цикла региона и его частей (население, предприятия, жилой фонд и др.), адаптивной эволюции. Последнее связано с тем, что
- регион является саморегулирующей системой. Управление идет через внутриорганизационные процессы саморегулирования и основано на изменении законов и методов внутреннего управления. На слабость административных мер, неэффективность целевого финансирования и других административных программ, не связанных с приведением в действие экономических регуляторов, указывал еще Форрестер. Социальные программы приводят к сдвигам, нарушениям баланса;

- существует конфликт между целями долгосрочного планирования и краткосрочными решениями, поэтому необходима координация при принятии решений;
- условием нормального развития в системе является поддержание экономического равновесия (достижения баланса использования ресурсов в системе).

Основными факторами, действующими в рассматриваемой системе являются: собственный ресурсный потенциал региона (трудовые, природные, производственные, финансовые ресурсы) и привлекаемые в регион ресурсы (как правило, в виде инвестиций и централизованных капитальных вложений), и реальные процессы общественного производства.

В задачах принятия решений целенаправленный выбор управляющих решений и экономических методов управления должен определять такие пропорции общественного воспроизводства (достижение баланса использования ресурсов в системе), которые в максимальной степени способствуют удовлетворению потребностей населения в регионе и повышению его жизненного уровня. Это основная *целевая задача регионального управления*.

Исследуемая социально-экономическая система имеет сложную внутреннюю структуру (рис.4.18), в составе которой могут быть декомпозированы подсистемы: население, производство, непроизводственная сфера, экология, пространство, финансы, внешняя экономическая сфера, характеризуется иерархичностью управления и активностью отдельных ее подсистем, взаимодействие элементов в рамках которой рассматривается с учетом характера воздействий внешней среды на внутреннюю структуру.

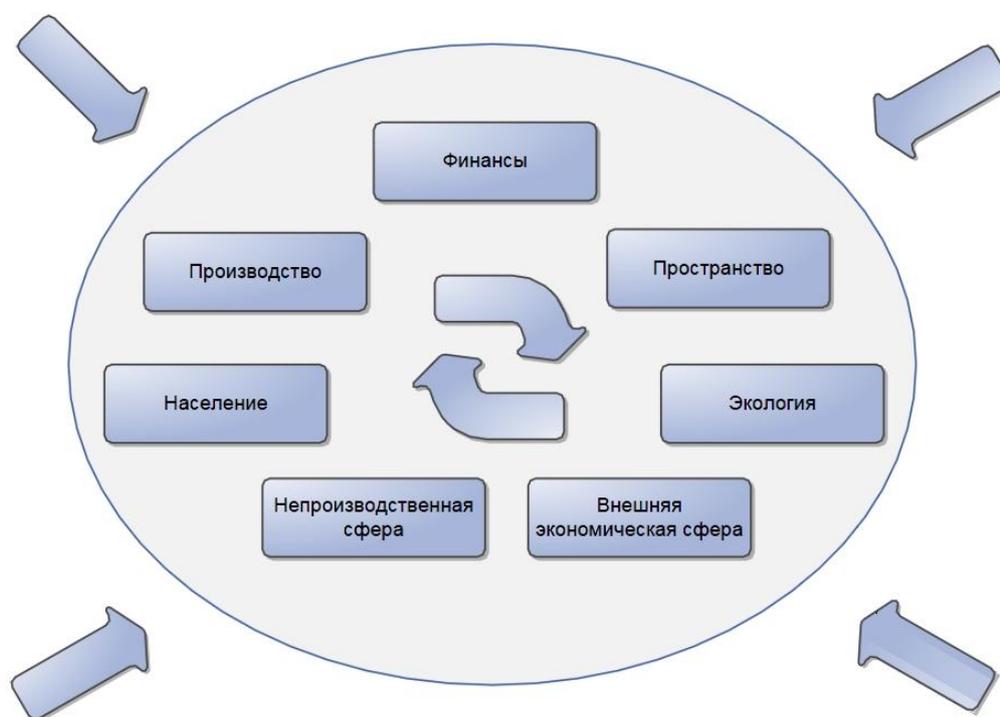


Рисунок 4.18 – Структура социально-экономической системы.

Регион представляется как целенаправленная и многоцелевая система, имеющая неоднородные внутренние и внешние цели, самостоятельные подцели отдельных подсистем, систему показателей измерения целей, многообразные стратегии их достижения и т.д.

Общая цель системы может быть формализована в виде ряда слабоформализованных взаимосвязанных подцелей. При выборе тот или иного варианта развития приходится формировать согласованное решение, позволяющее находить компромисс между региональными целями и общегосударственными целями, с одной стороны, и целями отдельных предприятий и хозяйственных субъектов, с другой стороны.

Рассмотрим систему показателей социально-экономического развития региона. Социально-экономическая составляющая уровня развития региона выполняет двоякую роль: всестороннего развития личности, с одной стороны, определенного способа удовлетворения потребностей населения района в услугах социальной инфраструктуры - с другой.

Если исходить из всестороннего развития личности, то неизменными условиями выступают достижение определенного уровня жизни (материальный аспект), совокупность форм и видов жизнедеятельности людей. Нормальные условия жизнедеятельности в немалой степени обеспечиваются путем удовлетворения суммы материальных, социальных и культурных потребностей в процессе пользования благами и услугами предприятий социальной инфраструктуры региона. Степень удовлетворения этих потребностей должна отражаться соответствующей системой показателей.

Обобщенный подход к оценке уровня развития позволяет сформировать иерархическую структуру показателей (рис.4.19), все социально-экономические показатели которой находятся между собой в сложной взаимосвязи, и выполнить построение агрегированных показателей, характеризующий социально-экономический уровень развития региона. Система показателей социально-экономического развития региона представляет собой сложную иерархическую структуру с множеством частных показателей, в которую в зависимости от задачи управления могут включаться критерии, отражающие социальный, экономический, градостроительный и другие эффекты варианта развития.

В общем случае система показателей включает интегрированный критерий, отражающий уровень жизни населения в регионе (например, национальный доход на душу населения). На верхнем уровне этой иерархической структуры выделяют 3 группы агрегированных критериев, включающих:

- обобщающую оценку социальных параметров региона;
- показатели, характеризующие объективные экономические (производственные) условия региона,

- переменные, отражающие социальные характеристики внепроизводственной сферы, зависящие от развития производства.

В свою очередь агрегированные показатели дают общую оценку состояния социально-экономической структуры и включают демографические, социально-профессиональные, трудовые и общественно-политические параметры, а также параметры, отражающие условия жизни, труда и быта населения региона.



Рисунок 4.19 – Схема показателей социально-экономического развития региона.

В модели заложены основные виды регуляторов для территориальных систем:

- административные;
- нормативные;
- земельные;
- бюджетно-налоговые;
- организационно-правовые;
- договорные.

С позиций системного подхода сформировано стратифицированное описание модельного комплекса социально-экономического развития региона, в общем виде приведенное на рис. 4.20, в котором выделены основные уровни:

- анализ и прогнозирование ресурсного потенциала региона;
- собственно выработка вариантов управленческих решений.



Рисунок 4.20 – Обобщенная модель социально-экономического развития региона

На первом уровне по виду ресурсного потенциала выделены блоки: природные ресурсы, производственные фонды, демография, финансы, внешние хозяйственные связи, и некоторые другие.

Кратко обозначим основной спектр задач, решаемых в рамках выделенных блоков. В блоке «Природные ресурсы» исследуется состав, оценивается потребление природных ресурсов, рассматриваются вопросы ресурсосбережения, оценивается общее экологическое состояние региона. Прогнозирование и эколого-экономическое регулирование осуществляется на основе концепции устойчивого развития. На уровне общего анализа ресурсного потенциала региона в модели природные ресурсы детализируются как возобновимые и невозобновимые. На более высоких уровнях детализации созданы модели по основным видам природных ресурсов: земельные (отдельно сельскохозяйственные земли и земли урбанизированных территорий),

водные, лесные и др., отражающие специфику использования и воспроизводства каждого вида ресурсов.

В аналитическом блоке «Производственные фонды региона» исследуется структура и эффективность использования производственных фондов региона с учетом развития научно-технического прогресса, применения инновационных технологий и других факторов.

В блоке «Демография» осуществляется анализ демографической ситуации в целом по региону и по отдельным возрастным группам, прогнозирование состояния трудовых ресурсов, оценка занятости с учетом миграционных процессов.

Моделирование бюджетного процесса, анализ кредитной, инвестиционной деятельности, поведение банковской системы отражают общее состояние финансовых ресурсов региона.

Аналитический блок «Внешние хозяйственные связи» отражает основные экзогенные отношения региональной системы с внешней средой: внешняя торговля и экспортно-импортные операции, структура госзаказов, кредиты-займы и т.п..

Выработка реальных стратегических вариантов развития региона на практике ведется по трем основным направлениям:

- производства регионального подчинения (в зависимости от специфики региона может быть отдельно выделен блок производства нерегionalного подчинения);
- производственная инфраструктура региона;
- социальная инфраструктура региона.

Средствами аналитического блока «Производство» разрабатывается общая стратегия развития промышленности и предпринимательства в регионе, размещения предприятий, комплексный анализ экономического равновесия на региональных рынках и выделение диспропорций в развитии, управление собственностью, внедрение и оценка эффективности внедрения инновационных проектов и др..

В аналитическом блоке «Производственная инфраструктура региона» осуществляется поддержка принятия решений, связанных с развитием энергетической, строительной, транспортной систем, являющихся обеспечивающими для развития производства и социальной сферы.

По направлению «Социальная инфраструктура региона» осуществляется развитие сферы услуг в соответствии с выявленными тенденциями потребления, - жилищно-коммунального хозяйства, медицинского обслуживания, образования, разработка эффективной социальной политики и т.п..

Частные задачи и модели социально-экономических систем, реализуемые в рамках единой модели могут отражать различные типы отношений или аспекты функционирования объекта: балансовые отношения, технологические, поведенческие, структурные, экологические,

демографические, экзогенные и др. Системный характер исследования предполагает динамически формируемые, развитые информационные взаимосвязи между моделями всех стратов в процессе выработки и принятия решений. Например, решения по развитию производства связаны с анализом состояния трудовых ресурсов в регионе, возможности обеспечения ресурсами производственной инфраструктуры, прежде всего, энергетическими, транспортными, и решением целого ряда других проблем. Обратные связи здесь просматриваются с экологической подсистемой, анализом финансовых отчислений (прежде всего налогов в рамках местного налогообложения) в бюджет. На выходе необходимо выполнить анализ на предмет поддержки социальной сферы, т.к. главный вопрос территориального управления: - способен ли город себя обеспечивать?

На практике, реализация обобщенной модели связана с созданием комплекса взаимосвязанных математических и имитационных моделей со сложными информационными и развитыми динамическими связями между моделями всех уровней. Упрощает эту реализацию стратифицированное описание модельного комплекса, которое может быть выполнено формальными методами или с применением CASE-средств и других средств интеграции моделей (вложенные, иерархические структуры), поддерживаемых современными системами моделирования. Стратификация является общим принципом системного моделирования и используется при анализе и синтезе сложных систем на основе методов компьютерного моделирования. Говоря о стратификации сложных систем, понимают конструирование баз данных и знаний, над которыми определены вычислительные процессы решения локальных задач системного анализа.

Основным системообразующим методом моделирования в задачах социально-экономического развития региона является метод имитационного моделирования, который:

- реализует итерационный характер разработки модели, поэтапный характер детализации моделируемых подсистем, что позволяет постепенно увеличивать полноту оценки принимаемых решений по мере выявления новых проблем и получения новой информации;
- предлагает новую методологическую основа научного исследования – эксперимент на имитационной модели (что позволяет оценивать последствия принимаемых решений не на живых людях, а на компьютерных моделях). Главным преимуществом имитационного моделирования является то, что эксперт может ответить на вопрос «Что будет, если ?», т.е. с помощью эксперимента на модели вырабатывать стратегию развития;
- широко применяется в системах принятия решений, так как позволяет анализировать большое число альтернатив, стратегий, проводить сценарные расчеты, исследовать стохастические системы в условиях неопределенности и т.д.,
- позволяет изучать динамику развития социальных систем.

На макро-уровне модельного комплекса используются модели и методы системной динамики. Концепция системной динамики позволяет моделировать динамические процессы на высоком уровне агрегирования, в основе нее лежит представление о функционировании динамической системы, как совокупности потоков (денежных, продукции, людских и т.п.). В общей структурной схеме моделей системной динамики выделены две части: сеть потоков и сеть информации.

Рассмотрим кратко общее содержание технологического подхода к построению моделей. Модели регионов – это модели ресурсного типа: ресурсы (трудовые, финансовые, природные и др.) исчерпываются, ресурсы пополняются, и могут быть описаны как сеть разнородных потоков. Состояние региональной экономической системы описывается переменными (количество населения различных категорий, производственные фонды, расходуемые ресурсы). Внешние воздействия и управленческие решения определяют темп (динамику) моделируемой системы (скорость подачи и изъятия ресурсов).

На основании обработки знаний экспертов выявляются все факторы, действующие в рассматриваемой системе, и причинно-следственные соотношения между ними. С помощью современных систем моделирования (таких, например, как *Ithink*, *Vensim*, *AnyLogic* и других) модель формируется на идеографическом уровне. Визуальный конструктор моделей делает их легко интерпретируемыми для совместных экспертных ревью. Получаемые системные потоковые диаграммы являются формой структуризации знаний эксперта, в информационной сети которых вырабатывается рассогласование (дисбаланс) по различным видам потребностей и потребления ресурсов.

В блоках принятия решений на основе этой информации выдаются управляющие воздействия на различные виды объектов. Современные системы моделирования имеют развитые средства для проведения сценарных расчетов и анализа результатов моделирования.

Модели системной динамики, в зависимости от решаемых задач, применяются совместно с дифференциальными уравнениями балансового типа, возможно применение компьютерного моделирования в сочетании с другими методами принятия решений, интеллектуальными технологиями, экспертными процедурами, реализация имитационно-оптимизационных вычислительных процедур на основе компенсационных подходов. Отметим в заключение, что на некоторых стратах обобщенной модели региона и уровнях принятия решения, там где это возможно, могут использоваться традиционные методы моделирования – аналитические, методы прогнозирования, групповые методы экспертного оценивания и др.

Мировая динамика.

В начале 70-х годов была выдвинута концепция, согласно которой конечность размеров нашей планеты и ограниченность ее природных ресурсов предполагают существование предела экспоненциального роста народонаселения и промышленного производства. Эта концепция возникла в рамках компьютерного моделирования глобального развития. Впервые она была сформулирована в работе Дж. Форрестера "Мировая динамика" (1971) [45]. Научные дискуссии вокруг проблемы предела роста развернулись после публикации доклада Римскому клубу "Пределы роста" (1972).

Римский клуб является международной общественной организацией, объединяющей представителей мировой политической, финансовой, культурной и научной элиты. Организация внесла значительный вклад в изучение перспектив развития биосферы и пропаганду идеи гармонизации отношений человека и природы. Одной из главных своих задач Римский клуб изначально считал привлечение внимания мировой общественности к глобальным проблемам посредством своих докладов. Римский клуб положил начало исследовательским работам по проблемам, названным «Глобальной проблематикой». Для ответа на поставленные клубом вопросы ряд выдающихся ученых создали серию «Докладов Римскому клубу» под общим названием «Трудности человечества». Прогнозы перспектив развития мира прогнозировались по компьютерным моделям, а полученные результаты были опубликованы и обсуждались во всем мире.

По предложению Клуба Джей Форрестер применил разработанную им методику моделирования на ЭВМ к мировой проблематике. Результаты исследования были опубликованы в книге «Мировая динамика» (1971), в ней говорилось, что дальнейшее развитие человечества на физически ограниченной планете Земля приведет к экологической катастрофе в 20-х годах следующего столетия. Дж. Форрестер в работах по системной динамике обращал внимание исследователей на значение имитационного моделирования поведения исследуемых объектов с использованием компьютерной техники. Имитационная модель в понимании Дж. Форрестера - это не просто средство визуализации закономерностей, закладываемых в модель, быстрого исследования динамики ее поведения, но, главное, инструмент, позволяющий ответить на вопрос, каким станет поведение системы при тех или иных вариациях начальных условий. Проигрывание различных вариантов с учетом изменений и взаимодействия таких факторов, как население земного шара, производство продуктов питания, природные ресурсы, промышленное производство и окружающая среда, вскрыли перспективу глобальной катастрофы, если человечество не изменит тенденции своего развития.

Одним из наиболее ярких выражений напряженности в мировой системе является рост населения, возрастающее загрязнение и увеличивающийся разрыв в уровнях жизни передовых и слаборазвитых стран. Дж. Форрестер ввел в рассмотрение понятие *мировая система*, под которой понимается человек в его социальном окружении, совокупность технологий, образ жизни, естественная окружающая среда. Модель строится на основании ряда утверждений, наблюдений и предположений относительно мировой системы. Дж. Форрестер очертил рамки модели и ввел основные гипотезы, разработанные в дальнейшем более подробно группой Д. Медоуза. В своей модели он рассматривает мир как единое целое, как единую систему различных взаимодействующих процессов: демографических, промышленных, процессов истощения природных ресурсов и загрязнения окружающей среды, процесса производства продуктов питания.

Растущее население вызывает рост индустриализации, рост потребностей в продуктах питания и распространение населения по все большей территории. Но рост производства продуктов питания, промышленных товаров и занимаемой территории способствует не только поддержанию, но и увеличению количества населения. Рост населения с сопровождающими его индустриализацией и загрязнением является следствием процессов, в которых каждый сектор мировой системы способствует росту других секторов и обеспечивает свое развитие за их счет. Когда население растет, увеличивается скорость использования природных ресурсов и запас ресурсов сокращается, не удовлетворяя возрастающий спрос. Рост индустриализации вызывает увеличение уровня загрязнения, а само загрязнение может нарушать и процессы самоочистки в природе. Так что увеличение загрязнения сталкивается с уменьшающейся способностью среды к самоочищению. Но со временем рост наталкивается на пределы, налагаемые природой. Почва и природные ресурсы истощаются, а способность биосферы Земли разлагать загрязнения не беспредельна.

В модели мировой системы изучаются некоторые из причин, которые в дальнейшем могут стать барьерами на пути чрезмерно интенсивного роста, анализируются те изменения в системе, которые могут остановить экспоненциальный рост населения, загрязнения. Это предпринимается для изучения последствий перехода от состояния роста к мировому равновесию.

Противоречие между концепцией роста и природными ограничениями может быть разрешено несколькими способами. Мировая система допускает много альтернативных вариантов поведения в зависимости от того, как мы регулируем рост населения, распределение капиталовложений, производство сельскохозяйственной продукции, использование природных ресурсов и осуществляем контроль за загрязнением. Человек, если он достаточно хорошо это понимает и действует разумно, может выбрать путь развития, который должен приводить к стабилизации

мировой системы. И задача состоит в том, чтобы выбрать наилучший из возможных вариантов перехода от динамического роста к состоянию мирового равновесия.

В докладе «Пределы роста» содержался вывод, что при сохранении существующих тенденций к росту народонаселения, промышленного и сельскохозяйственного производства истощение природных ресурсов и загрязнение окружающей среды достигнут критических пределов, чреватых глобальной катастрофой уже в начале XXI века. Предотвращение катастрофы возможно лишь в том случае, если будут приняты соответствующие меры по достижению "глобального равновесия" в мире. Концепция пределы роста развенчала технократический миф о беспредельном экономическом росте как средстве решения всех проблем и способствовала привлечению внимания людей к кризисным процессам, связанным с политикой расточительного отношения к природным ресурсам.

Общая структура модели мировой системы. Модель описывает мировую систему, в которой взаимосвязаны *население, капиталовложения (фонды), географическое пространство, природные ресурсы, загрязнения, производство продуктов питания*. Этими основными компонентами и их взаимодействиями, по мнению автора модели, обуславливается динамика изменений в мировой системе. Структура системы мировой динамики представлена на рис. 4.21. Подсистемы (население, капиталовложения, природные ресурсы, инвестиции в сельское хозяйство, загрязнение) изображаются прямоугольниками. Основные индикаторы модели мировой системы (вспомогательные переменные) – представлены на рисунке в виде кружков.

Основные переменные информационной сети модели:

- Относительный уровень питания,
- Эффективность фондов,
- Материальный уровень жизни,
- Качество жизни.

Стрелками показаны основные связи между подсистемами. Сформулировав предположения о том, каким образом различные части сложной системы взаимодействуют друг с другом, с помощью имитационной модели можно проследить функционирование всей системы во времени.

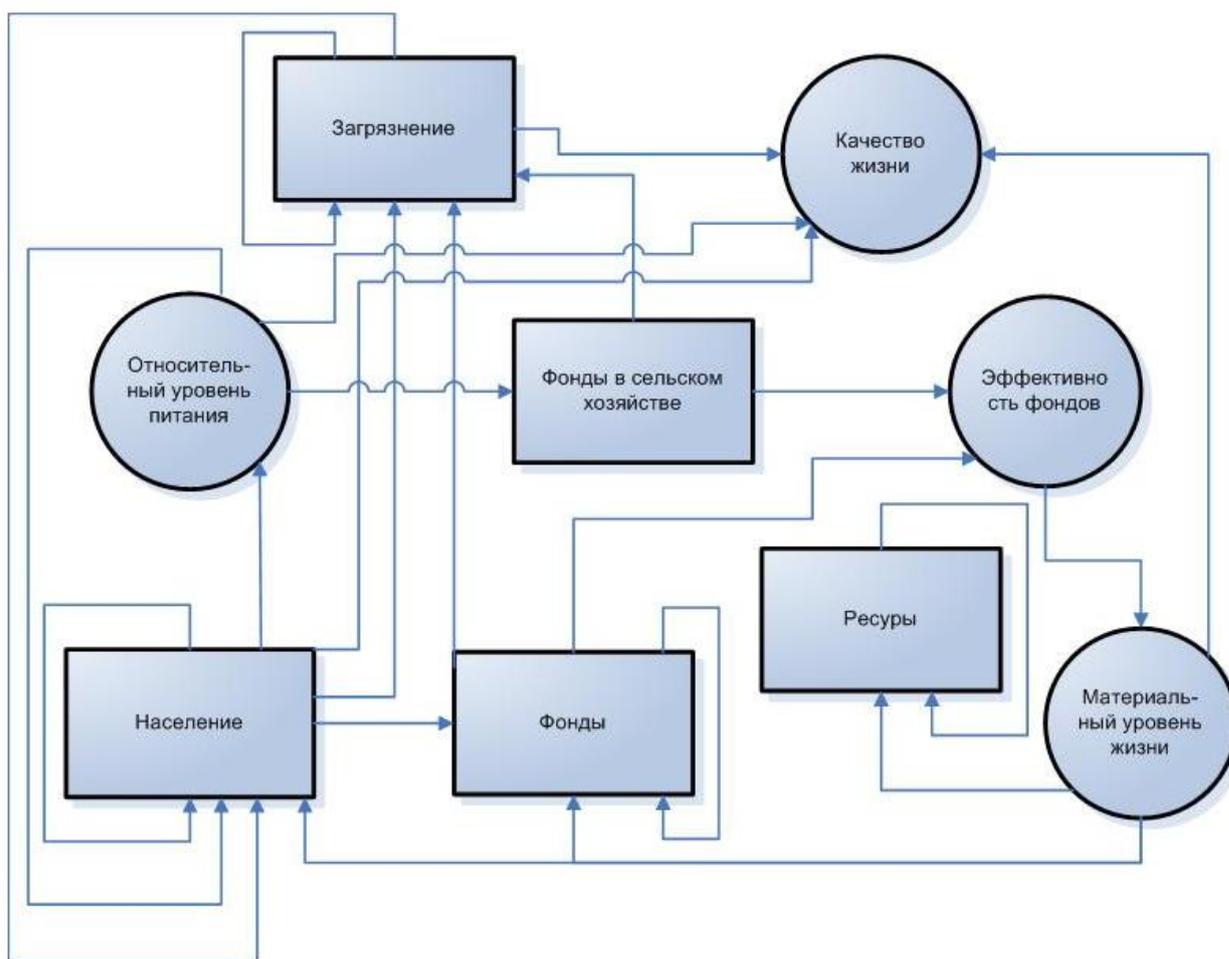


Рисунок 4.21 – Структура мировой системы.

Системная потоковая диаграмма. В качестве основных уровней (состояний) выделенных подсистем, на которых строится структура модели системы, было выбрано пять:

- население;
- капиталовложения (фонды);
- природные ресурсы;
- часть фондов, вкладываемых в сельское хозяйство;
- загрязнение (уровень загрязнения).

Каждый из этих уровней является основной переменной в потоковых сегментах, - основных подсистемах мировой модели. Перечисленные уровни по-разному взаимодействуют друг с другом. Диаграмма модели мировой системы в целом приведена на рис. 4.22.

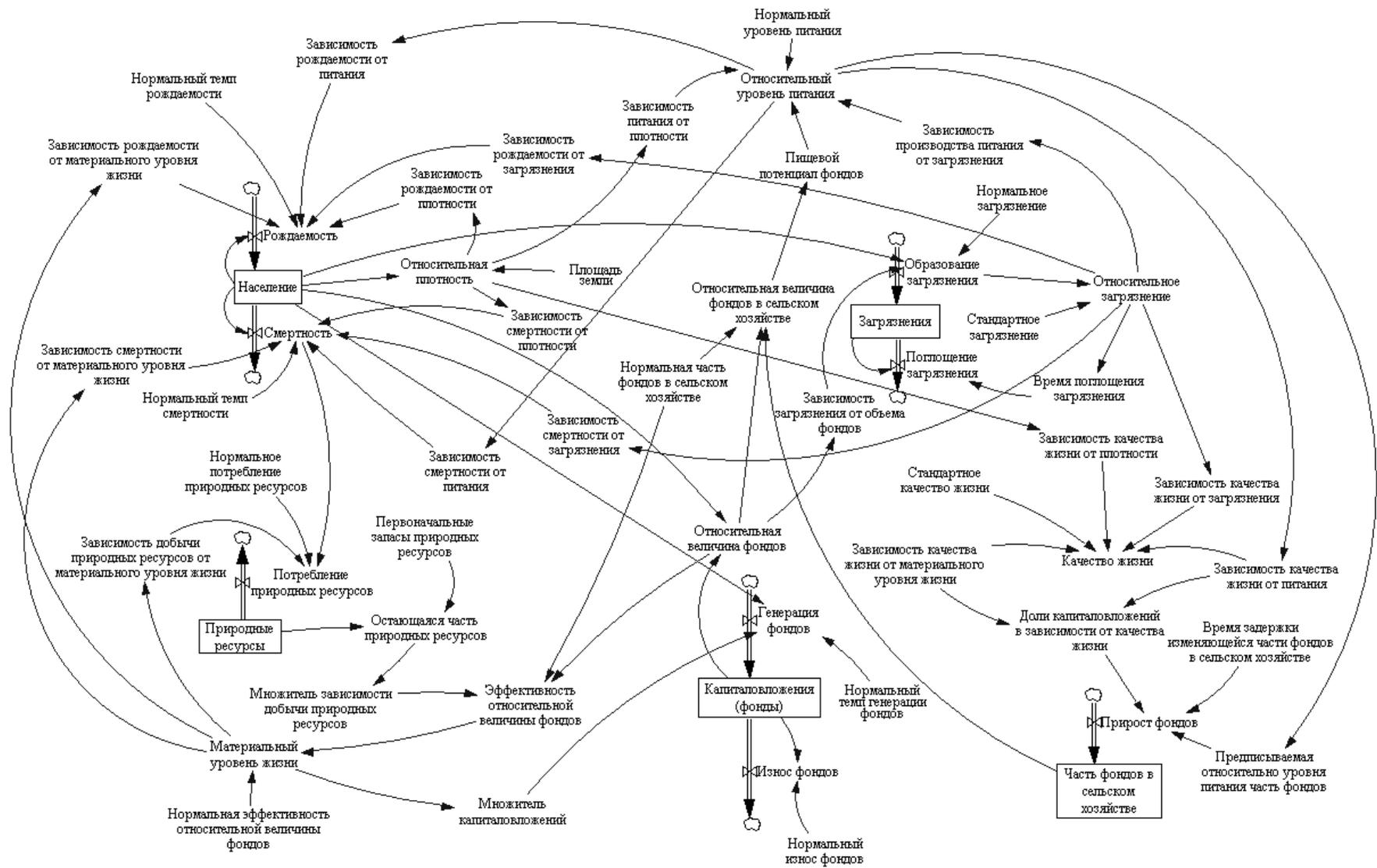


Рисунок 4.22. Диаграмма модели мировой системы.

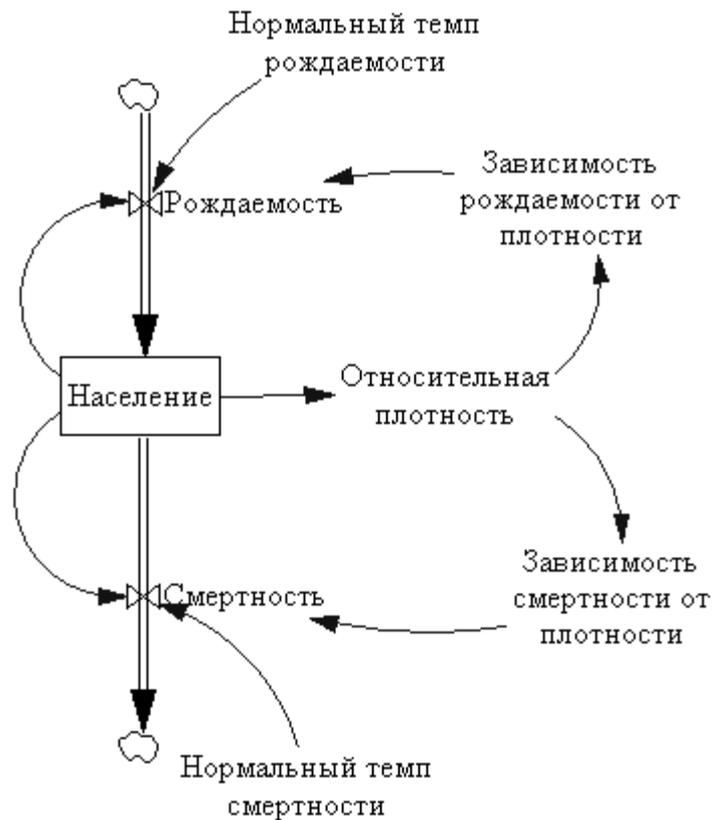


Рисунок 4.23 – Фрагмент диаграммы мировой системы «Влияние плотности населения на его рост».

Подсистема «Население». Основное состояние (уровень) подсистемы - «Население». Динамика демографических процессов описывается в модели *темпами рождаемости и смертности*.

В потоковом сегменте «население» образованы петли локальных обратных связей. На диаграмме (рис. 4.23.) показаны две основные петли локальных обратных связей, влияющие на численность населения. Верхняя петля определяет темп рождаемости, который увеличивает население. Нижняя петля определяет темп смертности, уменьшающий население. Здесь темп рождаемости и темп смертности определяются количеством людей, родившихся и умерших за год. Они определяют общий темп изменения численности населения. Петля рождаемости в потоковом сегменте «население» — положительная обратная связь, вызывающая рост населения. Увеличение населения (уровень) вызывает, через информационную связь, рост темпа рождаемости, который, в свою очередь, увеличивает население. Население увеличивает темп рождаемости, который вызывает рост населения, и тем самым удовлетворяются критерии

положительной обратной связи. Если бы не было сдерживающих сил, то население экспоненциально возрастало бы за счет влияния положительных обратных связей. Но петля смертности — отрицательная. Когда население (уровень) растет, количество умирающих в год также возрастает. Увеличение населения (посредством информационной связи) увеличивает темп смертности и уменьшает значение уровня «население».

Реальный темп рождаемости зависит и от условий в других частях мировой системы, в частности, от фондов и природных ресурсов, поскольку эти переменные влияют на материальный уровень жизни, плотности населения, обеспеченности пищей и уровня загрязнения. Такого рода влияния со стороны других частей системы вводятся в модели с помощью переменных (множителей), которые модифицируют базисный (нормальный) темп рождаемости. Темпы называются «нормальными» потому, что они соответствуют стандартной системе мировых условий, когда величины уровня питания, материального уровня жизни, плотности и загрязнения соответствуют своим «стандартным» значениям. Однако эта же система переменных при других численных значениях может вызвать рост или падение темпов рождаемости и смертности по сравнению с их нормальными значениями.

Темпы рождаемости и смертности зависят от четырех факторов: *плотности населения, уровня питания, материального уровня жизни, уровня загрязнения*. Изменение этих множителей (переменные: уровень питания, материальный уровень жизни, плотность населения и уровень загрязнений), отражающих текущее состояние мировой системы, может вызывать рост населения, его стабилизацию или уменьшение.

Относительная плотность населения. Относительная плотность равна частному от деления численности населения (уровень) на «площадь земли» и нормальную плотность населения. Пара петель отрицательных обратных связей в секторе «население» демонстрирует взаимосвязь численности населения с величиной максимально допустимой его плотности. Здесь в верхней петле при росте населения увеличивается его относительная плотность, множитель зависимости темпа рождаемости от плотности уменьшается, темп рождаемости понижается и население убывает. Как пишет автор, при уменьшении плотности населения происходит лишь небольшое увеличение темпа рождаемости, при увеличении же плотности влияние ее становится существенным (в модели предполагается, что 5-кратное возрастание плотности населения приводит к 50-процентному снижению темпа рождаемости). Аналогично, в нижней петле при увеличении населения возрастает его относительная плотность, множитель зависимости темпа смертности от плотности населения увеличивается, темп смертности растет и это уменьшает численность населения.

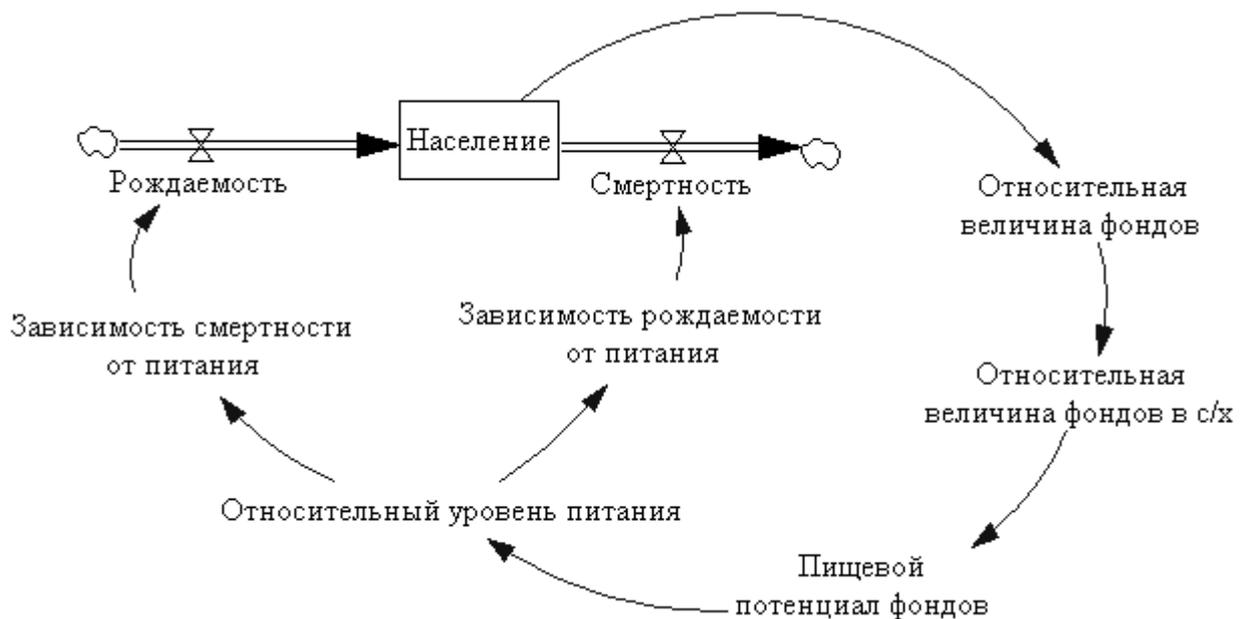


Рисунок 4.24 – Фрагмент диаграммы мировой системы «Влияние обеспеченности пиццей на рост населения».

Относительный уровень питания. Уровень питания является сильным регулятором численности населения. Если количество пищи на душу населения падает, то, безусловно, темп смертности должен резко возрастать вплоть до бесконечно большой величины при отсутствии пищи. Диаграмма влияния обеспеченности пиццей на рост населения (рисунок 4.24) демонстрирует две петли отрицательных обратных связей, регулирующих численность населения в соответствии с капиталовложениями, фондами и пищевыми ресурсами и, тем самым, с уровнем обеспеченности пиццей. Во внешней петле при росте населения относительная величина фондов (фондовооруженность) уменьшается, и, следовательно, уменьшаются относительная величина фондов в сельском хозяйстве, пищевой потенциал фондов (на человека), относительный уровень питания, множитель зависимости темпа рождаемости от уровня питания, темп рождаемости, и все это ведет к уменьшению населения. Следовательно, рост населения в конечном счете оказывает негативное воздействие на его численность. Отрицательная обратная связь определяет темп рождаемости таким образом, что численность населения всегда находится в соответствии с обеспеченностью пиццей. Во внутренней петле с ростом населения уменьшаются фондовооруженность, относительная величина фондов в сельском хозяйстве, пищевой потенциал фондов (на человека), относительный уровень питания и увеличиваются множитель зависимости темпа смертности от уровня питания и темп смертности, что вызывает уменьшение численности

населения. И снова рост населения определяется петлей отрицательной обратной связи. Эта петля за счет увеличения темпа смертности и уменьшения количества пищи на душу населения также регулирует численность населения в соответствии с уровнем обеспеченности пищей. С другой стороны, рост населения (за счет увеличения относительной плотности населения) приводит к уменьшению площади земли, пригодной для сельского хозяйства (что и учитывается множителем зависимости производства питания от плотности населения), и снижению относительного уровня питания. Затем, темп рождаемости понижается, а темп смертности повышается за счет множителей зависимости темпа рождаемости и смертности от уровня питания. Таким образом, увеличение плотности населения воздействует на само население через обеспеченность пищей.

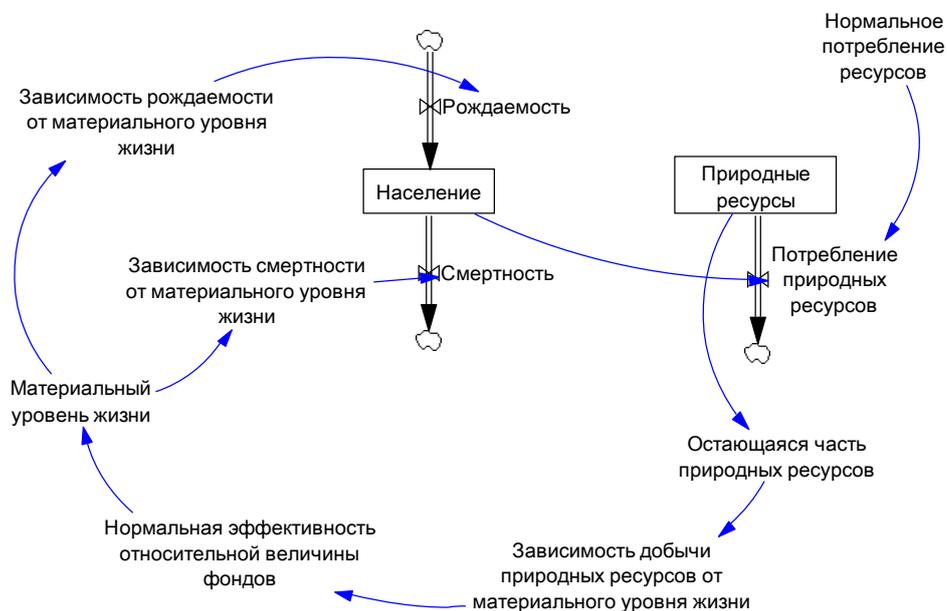


Рисунок 4.25 – Фрагмент диаграммы мировой системы «Влияние природных ресурсов на рост населения».

Материальный уровень жизни. Материальный уровень жизни описывает степень изменения эффективности относительной величины фондов на душу населения.

На рис. 4.25 показаны петли обратных связей, обуславливающие взаимодействия населения и природных ресурсов. В этих связях растущее население использует природные ресурсы до тех пор, пока падение материального уровня жизни не вызовет очередного уменьшения численности населения. Если население растет, то темп потребления природных ресурсов повышается, что приводит к истощению природных ресурсов, их запасы уменьшаются и множитель зависимости добычи природных ресурсов также уменьшается. Это, в свою очередь, понижает эффективность

относительной величины фондов и материальный уровень жизни. Падение материального уровня жизни вызывает увеличение множителя зависимости темпа рождаемости от материального уровня жизни и повышение темпа рождаемости; но это увеличение компенсируется ростом множителя зависимости темпа смертности от материального уровня жизни, который увеличивает темп смертности и уменьшает численность населения. Здесь одна из петель — положительная, а другая — отрицательная. Положительная петля обратной связи и петля отрицательной обратной связи имеют общую точку — эффективность относительной величины фондов. И именно здесь существует возможность затормозить и даже остановить рост, вызываемый положительной обратной связью. Истощение природных ресурсов снижает эффективность относительной величины фондов. Благодаря общим объединяющим точкам, петли отрицательных обратных связей системы способны подавить механизмы роста.



Рисунок 4.26 – Фрагмент диаграммы мировой системы «Влияние загрязнения на рост населения»

Подсистема «Загрязнение». Уровень загрязнения - один из пяти системных уровней модели. Это «накопитель», который увеличивается за счет образования загрязнения и уменьшается за счет его разложения. Загрязнение представляет собой активное загрязнение в

окружающей среде, т. е. загрязнение, которое не успело разложиться в какую-либо безвредную неактивную форму.

Темп образования загрязнения зависит от 2 факторов: антропогенного и промышленного загрязнения. *Темп образования загрязнения* определяется произведением следующих сомножителей: количества населения, нормального загрязнения и множителя зависимости загрязнения от объема фондов. Возрастающая фондовооруженность приводит к увеличивающимся темпам образования загрязнения на душу населения.

Поглощение загрязнения. Темп разложения загрязнения зависит от его уровня. На диаграмме это представлено петлей локальной обратной связи. Он также зависит от природных процессов самоочистки, определяющих скорость разложения загрязнений. В связи с этим темп разложения загрязнения определяется как частное от деления уровня загрязнения на *время разложения загрязнения*.

В условиях сильного загрязнения и высокой относительной величины фондов на душу населения загрязнение становится мощным регулятором численности населения за счет обратных связей, представленных на рис 4.26. Увеличение населения усиливает процесс образования загрязнения, увеличивает уровень загрязнения и относительное загрязнение. Благодаря множителям зависимости темпа рождаемости и темпа смертности от загрязнения увеличивающееся загрязнение снижает темп рождаемости, уменьшая тем самым численность населения, и увеличивает темп смертности, также уменьшая численность населения. В то же время, возрастающее относительное загрязнение понижает величину множителя зависимости производства продуктов питания от уровня загрязнения, снижает относительный уровень питания и (через множитель зависимости темпа рождаемости от уровня питания) уменьшает темп рождаемости и численность населения. Аналогично посредством множителя зависимости темпа смертности от уровня питания падение относительного уровня питания увеличивает темп смертности, уменьшая численность населения. Влияние загрязнения на рост населения, вероятно, не имело существенного значения в прошлом. Но сведения об уменьшении длительности жизни при долговременном пребывании в загрязненной среде и об увеличении смертности в периоды внезапных кратковременных повышений уровня загрязнения наводят на мысль, что эти связи начинают играть все большую роль. В будущем, если население и фонды будут непрерывно возрастать, эти факторы могут стать доминирующими

Подсистема «Капиталовложения». *Фонды или капиталовложения* является одним из системных уровней модели (см. рисунок 4.22), определяющим текущий уровень фондов в любой момент времени, который формируется за счет накопления капиталовложений, т.е. генерации

фондов (фондообразования) и за счет уменьшения фондов вследствие их износа, что задается в модели с помощью соответствующих темпов генерации и износа фондов.

Генерация фондов (фондообразование) вычисляется как произведение количества населения на нормальную генерацию фондов и на множитель капиталовложений. Фондообразование измеряется в единицах капитала (фондов) в год и зависит от численности населения и среднего количества капитала, накапливаемого человеком за год. Множитель капиталовложений зависит от материального уровня жизни и определяет способность к накоплению капитала, зависящую от количества уже существующих фондов. При низком значении фондов материальный уровень жизни и способность к накоплению капитала низки. Но когда капитал накапливается, производство позволяет часть продукции направлять для дальнейшего накопления фондов. *Износ фондов* определяется нормальным темпом и характеризуется средним временем жизни материальных активов (строения, дороги, заводы) и сроком морального старения нематериальных фондов (результаты научных исследований и т.п.).

Подсистема «Часть фондов в сельском хозяйстве». Фонды в сельском хозяйстве означают сельскохозяйственные машины, а также включают в себя плодородные земли, ирригационные системы, переработку продуктов питания и системы распределения. Структура модели мировой системы построена в предположении, что размещение капитала производится следующим образом: сначала образуется общий капитал (фонды), а затем уже выделяется (*темп прироста фондов*) часть фондов, предназначенная для сельского хозяйства. Это позволяет учитывать в модели создание фондов в сельском хозяйстве отдельно от всех других. Капиталовложения (фонды) на душу населения в сельском хозяйстве являются главным фактором, определяющим способность к производству продуктов питания, текущие значения которых определяют *пищевой потенциал фондов* и *относительный уровень питания* в модели.

Подсистема «Природные ресурсы». В модели рассматриваются только невозобновимые природные ресурсы, предполагается, что такие природные ресурсы как лес и другие относятся к сектору сельского хозяйства. Поэтому на диаграмме присутствует только исходящий поток из состояния с темпом *потребления природных ресурсов*, зависящим от материального уровня жизни. Темп использования природных ресурсов определяется произведением следующих сомножителей: численностью населения, нормальным потреблением природных ресурсов на душу населения и множителем зависимости добычи природных ресурсов от материального уровня жизни. Множитель зависимости добычи природных ресурсов от материального уровня жизни растет, когда возрастает материальный уровень жизни, поскольку повышение уровня жизни обеспечивается увеличением производства, что, в свою очередь, требует увеличения добычи природных ресурсов.

Начальное состояние, описывающее первоначальные запасы природных ресурсов, позволяет определить в модели оставшуюся часть природных ресурсов.

Основными индикаторами функционирования мировой системы являются в модели материальный уровень жизни и качество жизни. *Материальный уровень жизни* зависит от эффективности относительной (на душу населения) величины фондов и определяется общим объемом капитала с учетом роста нехватки мировых природных ресурсов. *Качество жизни* определяется как произведение стандартного качества жизни на четыре множителя, зависящих от питания, загрязнения, материального уровня жизни и плотности населения. Значения этих индикаторов определяют динамику процессов в других секторах модели мировой системы, которые мы рассмотрели выше.

Д.Медоуз. «Пределы роста». Сценарии развития мировой системы. Первые глобальные модели Дж. Форрестера были развиты и детализированы в проектах Д. Медоуза при создании компьютерной модели «МИР 3» [29]. Эксперименты этой модели включали в себя проигрывание различных вариантов развития человечества с учётом изменения и взаимодействия различных переменных. Этими переменными были: население земного шара, производство продуктов питания, природные ресурсы, промышленное производство, потребление воды, электроэнергии и др. Это была первая попытка построения модели «человек-общество-природа».

Согласно прогнозу, полученному при помощи этой модели, через 75 лет сырьевые ресурсы планеты окажутся исчерпанными, нехватка продовольствия станет катастрофической, если экономическое развитие мира немедленно не будет сведено к простому воспроизводству, а прирост населения Земли не будет поставлен под жесткий контроль. Модель «Мир-3» давала прогноз, что на рубеже 20—21 вв. вследствие голода и болезней возможно резкое падение численности населения Земли. Рост населения требует увеличения промышленных мощностей и, как следствие, потребностей в нефти, металле и др. ресурсах. С истощением источников сырья поднимаются цены, все меньше денег остается на развитие и финансирование различных сфер жизни общества. Наконец, наступит время, когда расходы на амортизацию производства превысят возможные капиталовложения. В результате этого промышленная база, сфера услуг и сельское хозяйство придут в упадок, обуславливая недостаток продовольствия, услуг и медицинской помощи населению планеты. Выводы, к которым пришли Медоуз и его коллеги, произвели сенсацию в научном мире, они заставили задуматься о будущем Земли: «Могут ли темпы роста численности населения и запасов капитала быть физически реализованы в нашем мире? Какое количество людей в состоянии обеспечить всем необходимым наша планета, на каком уровне благосостояния и на какой срок?». Согласно прогнозу Медоуза, человечество уверенно идет навстречу «глобальной катастрофе», избежать которой можно, только приняв меры по ограничению, регулированию роста производства, роста численности населения и изменению критериев прогресса. Материальный рост не может продолжаться до бесконечности, человечество должно отказаться от количества в пользу качества.

Основной вывод «Пределов роста» состоял в том, что если не изменить тенденции роста населения, то человечество окажется на грани глобальной катастрофы. Её предотвращение возможно лишь при условии принятия мер по «экологической и экономической стабилизации», позволяющей достигнуть нулевого прироста населения и его стабилизации на уровне 4,5-5 млрд. человек. Более 6 млрд. человек не могут поддерживать санитарно-гигиеническую чистоту, эрозию почв (более 20 млн. га в год), загрязнение воздуха и окружающей среды. К этим основным факторам следует также добавить такие факторы как войны, вооружённые конфликты, эпидемии, стихийные бедствия и т.п. В 2004 году Д. Медоуз выпустил доклад - «Пределы роста - тридцать лет спустя», в котором он только подтвердил ту динамику и те последствия, про которые он предупреждал человечество 30 лет назад. Все прогнозы учёного только подтверждались с течением времени, особенно на примере перенаселённых стран. В «Пределах роста» прирост населения ведёт к неизбежному коллапсу, после чего его численность стремительно падает в результате тех катаклизмов, которые она вызывает (повышается смертность в результате нехватки продовольствия, медицинских услуг и т.д.). Точно рассчитать время этих событий невозможно, поскольку уровень агрегирования модели высок и в ней присутствуют множество неопределённых факторов. Приблизительно кризис перенаселения наступит около 2100 года.

На рисунке 4.27 а представлены варианты сценарных исследований и развития кризиса из-за истощения ресурсов.

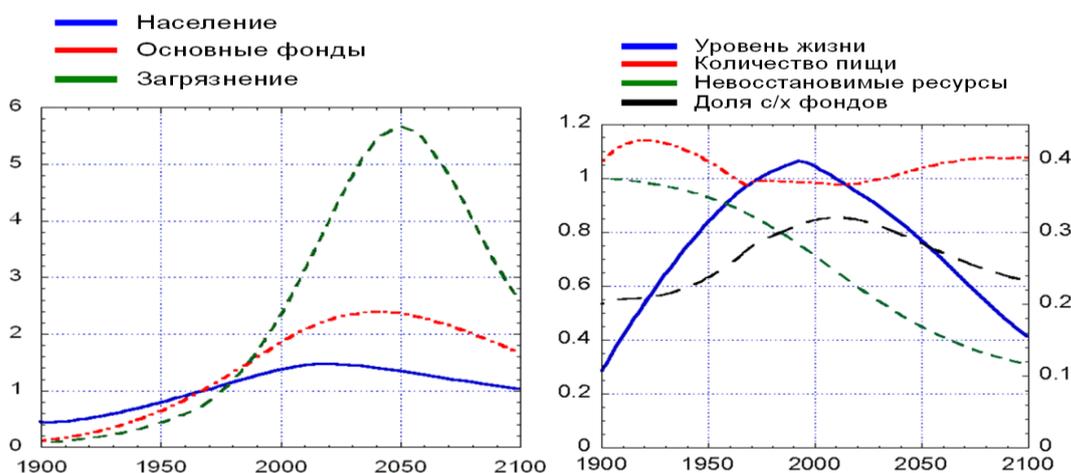


Рисунок 4.27а – Мировая динамика. Результаты сценарных исследований.

На модели проигрывались различные сценарии и варианты решения проблемы кризиса:

- Стабилизация численности населения планеты
- Отказ от излишеств в потреблении
- Минимизация удельных расходов сырья и энергии
- Замена невозобновимого сырья там, где возможно

- Переход к чистому промышленному производству
- Создание необходимых технологий
- Снижение потребления.

На рисунке 4.27б представлены результаты сценарных исследований и характеристики основных ресурсов мировой системы при изменении потребления.

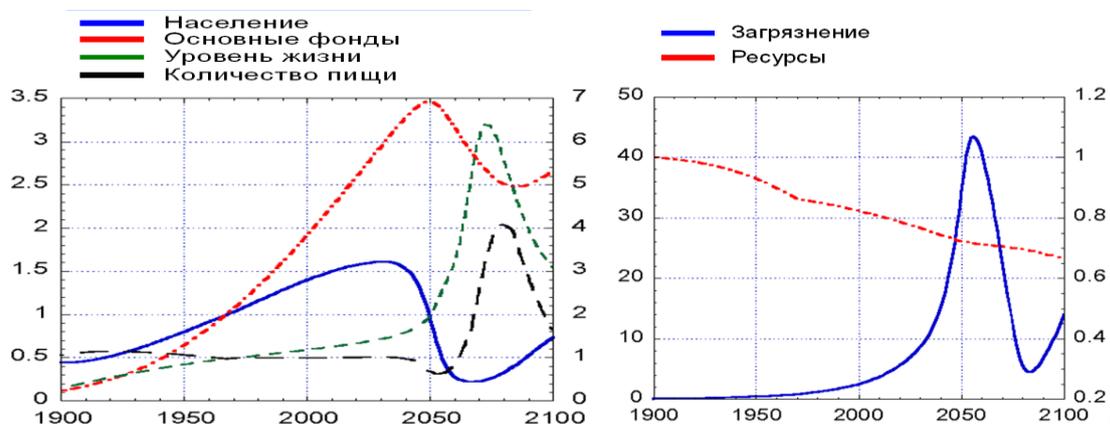


Рисунок 4.27б – Мировая динамика. Результаты сценарных исследований.

В докладе «Пределы роста» была предложена так называемая концепция нулевого роста. Согласно этой концепции, оптимальным является такое состояние планеты и общества, когда численность населения и объем капитала остаются, по существу, стабильными, а те факторы, которые могут увеличить или уменьшить их, поддерживаются в тщательно контролируемом равновесии. С точки зрения авторов, это картина мира, стремящегося к «глобальному равновесию» (рис.4.27в).

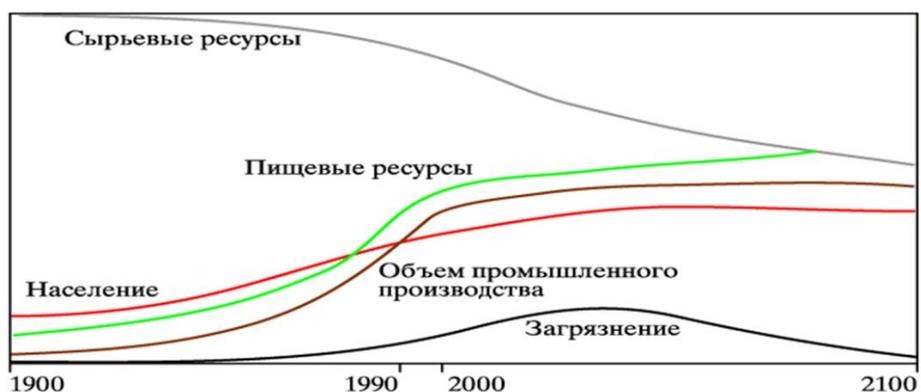


Рисунок 4.27в – Мировая динамика. Результаты сценарных исследований.

Вопросы для самопроверки.

1. С помощью каких показателей (KPI) можно оценить эффективность стратегии, эффективность бизнес-процессов в каждом сегменте динамической модели предприятия. Подумайте, что дает в управлении и формировании стратегии развития предприятия анализ динамики этих показателей.
2. На примере модели мировой системы Дж. Форрестера поясните, какие факторы и сегменты модели оказывают влияние на
 - А) образование и поглощение экологического загрязнения,
 - Б) динамику демографических процессов,
 - В) динамику потребления природных ресурсов.
3. Выделите базовые элементы структуры имитационной модели производственного процесса.
4. Для решения какого класса задач управления производством применяется имитационное моделирование, в чем его преимущество по сравнению с расчетным методом.
5. Какие параллельные процессы и переменные описываются в имитационной модели складской систем.
6. Какая выходная статистика требуется для анализа узких мест в производственной системе.
7. Какие выходные переменные и критерии оценки эффективности функционирования производственно-сбытовых систем формируются в имитационных моделях.
8. Какие динамические факторы рассматриваются в производственно-сбытовой системе.
9. Дж. Форрестер выделял в общей структуре динамической модели предприятия 5 потоков и информационную сеть. Перечислите эти потоки и опишите логику их взаимодействия.
10. Какие подсистемы представлены в динамической модели города Дж. Форрестера, какие задачи анализа и управления решались на модели города, в чем проявилась динамика городской системы?
11. Какие бизнес-процессы и ресурсы предприятия вы бы выделили в динамической модели предприятия для случая разработки долгосрочной стратегии его развития.
12. Какие критерии и управляющие параметры применяются в имитационной модели в задачах проектирования цепи поставок.
13. С помощью какой статистики можно оценить эффективность бизнес-процессов организации?
14. В чем состоит преимущество применения имитационного моделирования в анализе и реинжиниринге бизнес-процессов по-сравнению с традиционными CASE-средствами?.

15. Какие методологии структурно-функционального анализа могут применяться на верхнем уровне представления модели бизнес-процессов, описанных дискретно-событийными имитационными моделями?
16. Какая методология структурно-функционального анализа поддерживает модели системной динамики на верхнем уровне представления модели.
17. Какие базовые информационные технологии применяются при реализации современного цифрового производства
18. Рассмотрите аналитическую пирамиду на примере корпоративных информационных систем. На каких уровнях управления и при решении каких задач управления в контуре информационных системы предприятия возможно применение дискретных имитационных моделей, моделей системной динамики, агентного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Бахвалов Л.А. Компьютерное моделирование: долгий путь к сияющим вершинам, Компьютерра. 1997, № 40. с.26-36.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1978, 400 с.
3. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика// Exponenta Pro, 2008, №3-4.
4. Бахтизин А.Р. Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика, 2008. 279с.
5. Варжапетян А.Г. Имитационное моделирование на GPSS/H. - М.: Вузовская книга, 2004.
6. Горбунов А.Р., Лычкина Н.Н. Проблемы, актуальные задачи и приоритеты в создании систем поддержки принятия решений и применении имитационного моделирования в сфере управления и бизнеса.- Третья всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2007 -Сборник докладов, том 1, Санкт-Петербург, 2007 г.
7. Горбунов А.Р. Управление финансовыми потоками – проект «Сборка холдинга»,- М.: Издательство «Глобус», 2004 -240 с.
8. Емельянов А.А., Власова Е.А., Дума Р.В. Имитационное моделирование экономических процессов/ Под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2009. 416с.
9. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). /Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. и др. - М.: Наука, 1985.- 176 с.
10. Имитационное моделирование производственных систем /Под общей редакцией А.А. Вавилова. - М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983.- 416 с.
11. Имитационные системы принятия экономических решений /К.А. Багриновский и др. - М.: Наука, 1989.
12. Имитационный анализ регионального воспроизводства. /Ответственный редактор доктор физ.-мат. наук Булавский В.Г. – Новосибирск: Наука, сибирское отделение, 1987г. –176 с.
13. Калашников В.В. Организация моделирования сложных систем. - М.: Знание, 1982, 62 с.
14. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5.- СПб.: БХВ – Петербург, 2005.- 400с.:ил.
15. Кавтарадзе Д.Н. Имитационные игры и разработка стратегии природопользования, М.: ТЕИС, 2007.
16. Крюков М.М. Эколого-экономическое игровое имитационное моделирование: методический аспект. М.: ТЕИС, 2006
17. Киндлер Е. Языки моделирования, пер. с чешск. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.

18. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании : Пер с англ./ Под ред Ю.П. Адлера, В.Н.Варыгина. М.: Статистика, 1978. Вып.1. 221 с. Вып 2. 335 с.
19. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем. - М.: Дело, 2003.
20. Кугаенко А.А. Основы теории и практики динамического моделирования социально-экономических объектов и прогнозирования их развития. - М.: Вузовская книга 1998. – 392с.
21. Лекции по теории сложных систем. Бусленко Н.П., Калашников В.В. и др. - М.: Сов. радио, 1973.- 440 с.
22. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS – 3-е издание / Аверилл М.Лоу, В.Дэвид Кельтон. – СПб.: Питер, Издательская группа ВHV. 2004.848 с
23. Лычкина Н.Н. Компьютерное моделирование социально-экономического развития регионов в системах поддержки принятия решений, /III Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04, М., 2004.
24. Лычкина Н.Н. Технологические возможности современных систем моделирования. /Банковские технологии, Выпуск 9, М., 2000.
25. Лычкина Н.Н. Имитационные модели в процедурах и системах поддержки принятия стратегических решений на предприятия - ГУУ – ВШЭ, «Бизнес-информатика», № 1, М.,2007 г.
26. Лычкина Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах, - Материалы XIV Международной школы-семинара «Новые информационные технологии» – М.: МИЭМ, 2006 -489с, стр. 64-73
27. Лычкина Н.Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития./М.: ГУ-ВШЭ, Бизнес-информатика, №3(9), 2009 г.
28. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. - М.: Радио и связь, 1988.- 232с.
29. Медоуз Д. Пределы роста. - М., Изд-во Московского Университета,-1991-280 с.
30. Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. / Пер. с англ. - М.: Мир, 1975.- 502 с.
31. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. /Адлер Ю.П. и др. - М.: «Наука», 1971.
32. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. - М.: СИНТЕГ, 2000.- 528 с.
33. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II/ Пер. с англ. - М.: Мир, 1987.- 646 с.

34. Ресин В.И., Попков Ю.С. Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход. – М.: Эдиториал УРСС, 2000.
35. Руководство пользователя по GPSS World. /Перевод с английского/. - Казань: Изд. “Мастер Лайн”, 2002. – 384 с.
36. Сидоренко В.Н. Системная динамика – М., МГУ, ТЕИС, 1998 г.
37. Системный анализ и проблемы развития городов. Попков Ю.С., Посохин М.В. и др. – 1983.
38. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем.- М.: Высшая школа, 2003, 320с.
39. Социальные системы. Формализация и компьютерное моделирование: учебное пособие. /А.К. Гуц, В.В. Коробицын и др. – Омск: Омский Государственный Университет, 2000. – 160 с.
40. Технология системного моделирования. /Под общей редакцией Емельянова С.В. - М.: Машиностроение, 1998.520с.
41. Толуев Ю.И. Имитационное моделирование логистических сетей// Логистика и управление цепями поставок.2008. №2/25.
42. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия «Информатизация России на пороге XXI века».- М.: СИНТЕГ, 1998.
43. Трахтенгерц Э.А. Субъективность в компьютерной поддержке управленческих решений. - М.: СИНТЕГ, 2001.- 256 с.
44. Форрестер Дж. Динамика развития города. – М.: Прогресс, 1974.
45. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.
46. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / пер. с англ., общая редакция Д.М. Гвишиани – М: Прогресс, 1971.- 340 с.
47. Форрестер Дж.«Системная динамика – персональный взгляд на первые и следующие 50 лет», *System Dynamics Review*, the Journal of the System Dynamics Society, Vol.23 number 2-3 summer/fall, 2007 (<http://www.sysdynamics.ru>)
48. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. – М.: Мир, 1978
49. Шрайбер Т. Дж. Моделирование на GPSS – М.: Машиностроение, 1980.- 592 с.
50. Яцкив И.В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения. – Материалы конференции ИММОД -2003, 2003г. с. 211-217.
51. Balci O. Credibility Assessment of Simulation Results //Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference. - 1986. - pp. 39-44.
52. Balci O. (1994) Validation, Verification and Testing Techniques Throughout the Life Cycle of a Simulation Study, *Annals of Operation Research*.
53. Balci O. Verification, validation and accreditation //Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference.-1998. - pp. 41-48.

54. Carson J.S. Model verification and validation //Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. - 2002. - pp. 52-58.
55. Henriksen J. An Introduction to SLX Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference IEEE 1997 p. 593-599.
56. Law A.M., McComas, M.G. How to build valid and credible simulation models //Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.- 2001. - pp. 22-29.
57. John Morecroft *Strategic Modelling and Business Dynamics A Feedback Systems Approach*, John Wiley&Sons Ltd.2007
58. Sargent R.G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models //Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. - 2001.- pp, 106-114.
59. Schriber T. Introduction to Simulation Using GPSS/H N4 John Willey & Sons 1991.
60. Sterman, John *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill Higher Education,2000
61. W. David Kelton, Randall P. Sadowski, Deborah A. Sadowski *Simulation with Arena* - WCB/McGraw-Hill, 1998.
62. K. Warren *Competitive Strategy Dynamics*, London Business School, John Wiley&Sons Ltd.2002
63. K. Warren *Strategic Management Dynamics*, London Business School, John Wiley&Sons Ltd.2008
64. <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Simulation/Simulation.html>
65. <http://www.sysdynamics.ru>
66. <http://www.systemdynamics.org>
67. <http://www.gpss.ru>
68. <http://www.xjtek.ru>
69. <http://www.lichkina.guu.ru>