

# **Тема 4: «ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА»**

## **ВОПРОСЫ**

- 1. Понятие системы как семантической модели**
- 2. Структура системного анализа**

## **Литература**

1. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: Учебное пособие – Санкт-Петербург, «Издательский дом «Бизнес-пресса», 2000 – 208 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ: Учебное пособие для вузов. – М., Высшая школа, 2004. – 454 с.
3. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: Учебное пособие. – М., Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
4. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. – Киев, МАУП, 2003. – 368 с.

# 1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ КАК СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В процессе создания различных объектов и сложности стремятся к наиболее полному и объективному представлению объекта исследований – описанию его внутренней структуры, объясняющей причинно-следственные законы функционирования. Одним из условий является адекватное представление объекта в виде системы.

Существует несколько подходов к математическому описанию систем. Наиболее общим является теоретико-множественный подход, при котором система  $S$  представляется как отношение  $S \times X \times Y$ , где  $X$  и  $Y$  – входной и выходной объекты системы. То есть, предполагается, что задано семейство множеств  $V_i$ , где  $i$  – множество индексов, а система задается на  $V_i$  как некоторое собственное подмножество декартова произведения, все компоненты которого являются объектами системы в виде некоторой совокупности элементов и связей между ними, обладающей определенной целостностью.

Рассматривая объект относительно построения его в виде системы, более полно это определение можно раскрыть на основе понятия модели.

Рассматривая объект относительно построения его в виде системы, более полно это определение можно раскрыть на основе понятия модели. ¶

Пусть  $A$  и  $B$  — два произвольных множества. Функция  $f$ , однозначно ставящая в соответствие каждому элементу  $a \in A$  элемент  $f(a) \in B$ , называется отображением множества  $A$  в множество  $B$  и обозначается как  $f : A \rightarrow B$  или  $A \xrightarrow{f} B$ . ¶

Элемент  $f(a) = b$  называется значением элемента  $a$  при отображении  $f$  или образом  $b$ ;  $A$  — область определения,  $B$  — область значений отображения  $f$ . ¶

Если есть элементы  $b_j \in B$ , не являющиеся образом никаких элементов  $a_i \in A$ , то отображение  $f$  называется отображением «в»  $B$ . Если  $f(A) = B$ , то отображение  $f$  называется отображением «на»  $B$ . ¶

Функция  $f^{-1}(B)$  — множество элементов из  $A$ , образы которых принадлежат  $B$ , называется прообразом множества  $B$ , т.е.  $f^{-1}(B) = \{a \in A \mid f(a) \in B\}$ . ¶

В общем случае  $f^{-1}$  может не быть отображением «в» или «на»  $A$ , так как функция  $f^{-1}$  может быть неоднозначной. ¶

Отображение  $f$  называется взаимно однозначным, если каждый элемент множества  $B$  является образом не более чем одного элемента из  $A$ . ¶

Отображение  $f$  множества  $A$  на (в)  $B$  называется гомоморфизмом (отношением подобия системы в функциональном и структурном аспекте) множеств, если выполняется условие  $(a_1, a_2, \dots, a_k) \Rightarrow (f(a_1), f(a_2), \dots, f(a_k))$ , где  $a_i \in A$ ,  $f(a_i) \in B$ . ¶

Изоморфизм (отношение тождества системы в функциональном и структурном аспекте) множества  $A$  на  $B$  является взаимно однозначным гомоморфизмом, т.е.  $(a_1, a_2, \dots, a_k) \in A \Leftrightarrow (f(a_1), f(a_2), \dots, f(a_k)) \in B$ . ¶

Введенные понятия позволяют определить модель как изоморфизм  $A$  в  $\psi$ , где  $A$  – множество фиксированных элементов предметной области с исследуемыми связями, отношениями между этими элементами,  $\psi$  – абстрактное множество, задаваемое кортежем

$$\psi = \langle \{M\}, P_1, P_2, \dots, P_n \rangle, \quad (1)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – предикаты, отображающие наличие того или иного отношения между элементами предметной области, то есть предикат – это логическая  $n$ -я пропозициональная функция, определенная для предметной области и принимающая значения истинности или ложности;

$\{M\}$  – множество элементов модели, соответствующих элементам предметной области системы, называемое носителем модели.

Носитель модели является содержательной областью предикатов  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , а предикаты – *сигнатурой* модели  $\psi$ . Выбор носителя и сигнатуры при построении модели определяется предметом исследования.

Определим понятие системы, ориентированное на задачи декомпозиции, анализа и синтеза, т.е. на проведение преобразования  $\psi_a \rightarrow \psi_b$  между двумя подмоделями.

Системой называется кортеж

$$S = \langle \psi_a, \psi_b, P_0(\psi_a, \psi_b) \rangle \quad (2)$$

Здесь  $\psi_a$  – подмодель, определяющая поведение системы. Иногда она может рассматриваться как «черный ящик», о котором известно то, что на определенные воздействия он реагирует определенным образом;

$\psi_b$  – подмодель, определяющая структуру системы при ее внутреннем рассмотрении;

$P_0(\psi_a, \psi_b)$  – предикат целостности, определяющий назначение системы, семантику (смысл) моделей  $\psi_a$  и  $\psi_b$ , а также семантику преобразования  $\psi_a \rightarrow \psi_b$ .

$P_0(\psi_a, \psi_b) = 1$ , если преобразование  $\psi_a \rightarrow \psi_b$  существует при взаимно однозначном соответствии между элементами носителей моделей  $\psi_a$  и  $\psi_b$ ; в противном случае  $P_0(\psi_a, \psi_b) = 0$ . Наличие *предиката целостности* позволяет говорить о том, что система – это семантическая модель, имеющая внутреннюю интерпретацию.

Подмодель  $\psi_a$  представляется в виде кортежа, включающего пять объектов:

$$\psi_a = \langle x, y, z, f, g \rangle, \quad (3)$$

где  $x = x(t)$  – входной сигнал, т.е. конечное множество функций времени  $t: \langle x_0(t), \dots, x_k(t) \rangle$ ;

$y = y(t)$  – выходной сигнал, представляющий собой конечное множество функций  $y = \langle y_1(t), \dots, y_m(t) \rangle$ ;

$z = z(t)$  – переменная состояния модели  $\psi_a$ , характеризующаяся конечным множеством функций  $z = \langle z_1(t), \dots, z_m(t) \rangle$ , знание которых в заданный момент времени позволяет определить значения выходных характеристик модели  $\psi_a$ ;

$f$  и  $g$  – функционалы (глобальные уравнения системы), задающие текущие значения выходного сигнала  $y(t)$  и внутреннего состояния  $z(t)$ :

$$y(t) = g(z(t), x(t)); \quad (4)$$

$$z(t) = f(z(t_0), x(\tau)); \quad \tau \in [t_0, t]. \quad (5)$$

Соотношение (4) является уравнением наблюдения, а (5) – уравнением состояния системы. Если в описание системы введены функционалы  $f$  и  $g$ , то она уже не рассматривается как «черный ящик».

Кроме выражения (2) систему дополняют аксиомами.

Аксиома 1. Для системы определены пространство состояний  $Z$ , в которых она может находиться, и параметрическое пространство  $T$ , в котором задано ее поведение.

В связи с этим математическое описание систем в виде (3) характеризует *динамические* системы, так как оно отражает способность систем изменять состояния  $z(t)$  в параметрическом пространстве  $T$  (*статические* системы таким свойством не обладают). В качестве параметрического пространства рассматривается временной интервал  $(0, \infty)$ .



Аксиома 2. Пространство состояний  $Z$  системы содержит не менее двух элементов, то есть отражает естественное представление о том, что система может находиться в разных состояниях.

Аксиома 3. Система обладает свойством функциональной эмерджентности (целостности) – это такое свойство системы  $S$ , которое принципиально не сводится к сумме свойств элементов, составляющих систему, и не выводится из них:  $S \neq \sum_{i=1}^m y_i$ , где  $y_i$  –  $i$ -я характеристика системы  $S$ ;  $T$  – общее количество характеристик.

При таком рассмотрении система является совокупностью моделей и, главное, отражает семантику ее предметной области в отличие от неинтерпретированных частных математических моделей. Другими словами, *система* – это совокупность взаимосвязанных общей целью элементов, обладающая интегративными свойствами (эмерджентностью), а также способом отображения реальных объектов.

## 2. СТРУКТУРА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Универсальная методика по проведению СА отсутствует. Она разрабатывается в том случае, когда нет достаточной информации о системе, которая позволила бы формализовать процесс ее исследования, включающий постановку и решение рассматриваемой задачи. Общим для методик СА является определение закона функционирования объекта (системы), формирование вариантов его структуры (нескольких альтернативных алгоритмов, реализующих заданный закон функционирования) и выбор наилучшего варианта, осуществляемого решением задач декомпозиции, анализа и синтеза системы. Основой построения методики анализа и синтеза систем является соблюдение принципов системного анализа – некоторых положений общего характера, являющимися обобщением опыта работы исследователей со сложными системами.

Общий подход к решению задач в соответствии с теорией циклов может быть представлен в виде цикла, приведенного на рис. 1. При этом в процессе функционирования реальной системы выявляется задача практики – противоречие, как несоответствие существующего положения дел требуемому. Для решения задачи проводится системное исследование (декомпозиция, анализ и синтез) системы, разрешающее задачу. В ходе синтеза осуществляется оценка анализируемой и синтезируемой систем. Реализация синтезированной системы в виде предлагаемой физической системы позволяет провести оценку степени разрешения задачи практики и принять решение на функционирование модернизированной (новой) реальной системы.

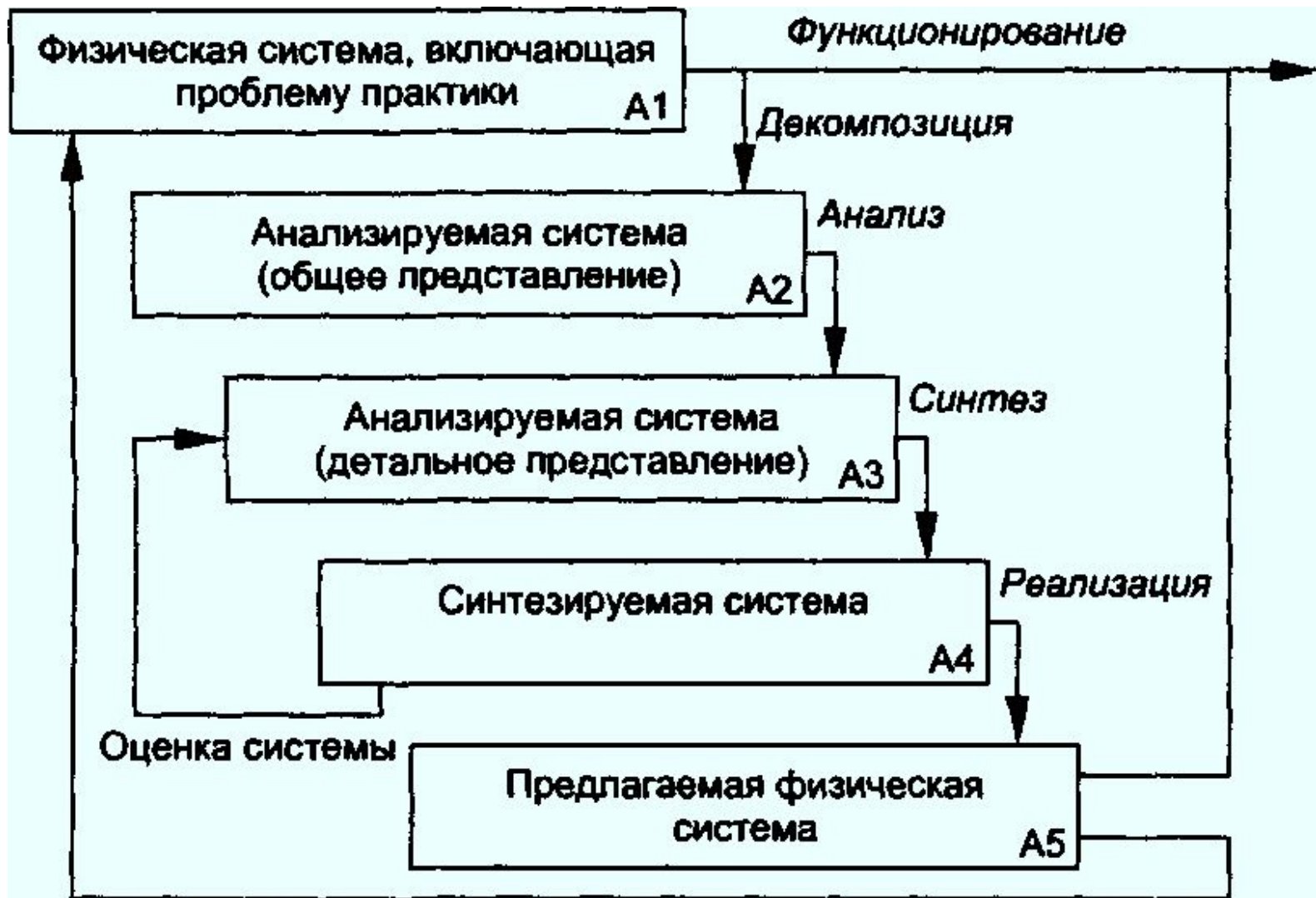


Рис. 3. Общий подход к решению задач

При таком представлении становится очевидным еще один аспект определения системы – система есть средство решения задач.

Основные задачи СА могут быть представлены в виде трехуровневого дерева функций (рис. 2).



Рис. 2. Дерево функций системного анализа

На этапе *декомпозиции* осуществляются:

- определение и структуризация общей цели исследования и основной функции системы как ограничение траектории в пространстве ее состояний или в области допустимых ситуаций (декомпозиция проводится построением дерева целей и дерева функций);
  - выделение системы из среды (разделение на систему и внешнюю среду) по критерию участия каждого элемента в процессе, приводящем к результату на основе рассмотрения системы как составной части надсистемы;
  - описание воздействующих на систему факторов;
  - описание тенденций развития, неопределенностей разного рода;
  - описание системы как «черного ящика»;
  - функциональная (по функциям), компонентная (по виду элементов) и структурная (по виду отношений между элементами) декомпозиции системы.
- Глубина декомпозиции системы является ограниченной, она прекращается при изменении уровня абстракции – представления элемента как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель описывает внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «черного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы, обуславливающее прекращение декомпозиции. В методиках типичной является декомпозиция модели на глубину 5-6 уровней, связанной с глубиной декомпозиции одной из подсистем. Функции, которые требуют такого уровня детализации, важны, так как их детальное описание обеспечивает нахождение решения для эффективной работы всей системы.

Задача декомпозиции состоит в том, что в сложных системах отсутствует однозначное соответствие между законом функционирования подсистем и алгоритмом его реализации. Поэтому проводится формирование нескольких вариантов (или одного варианта, если система отображена в виде иерархической структуры) декомпозиции системы.

Выделяют наиболее часто применяемые стратегии декомпозиции:

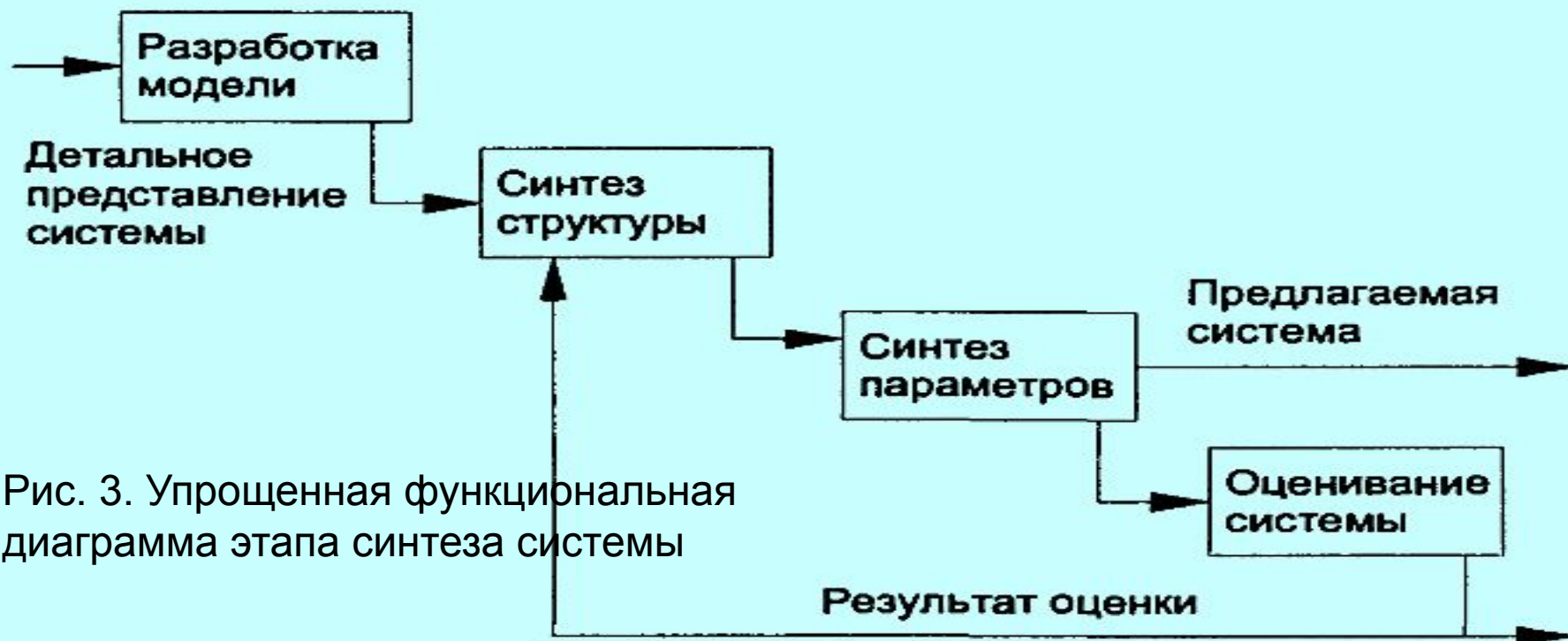
- *функциональная декомпозиция* – базируется на анализе функций системы на основании постановки вопроса *что* делает система, независимо от того, *как* она работает. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов;
- *декомпозиция по жизненному циклу* – изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла функционирования системы «от рождения до гибели». Стратегия применяется в предположении что целью системы является оптимизация процессов и когда можно определить последовательные стадии преобразования входов в выходы;
- *декомпозиция по физическому процессу* – на основе выделения шагов реализации алгоритма функционирования подсистемы, стадий смены состояний. Стратегия применяется, когда если целью модели является описание физического процесса функционирования подсистемы;
- *декомпозиция по подсистемам (структурная декомпозиция)* – выделение подсистем на основе установления сильной связи между элементами по одному из типов отношений (связей), существующих в системе (информационных, логических, иерархических, энергетических и т.п.). Для описания всей системы строится составная модель, объединяющая все отдельные модели.

На этапе *анализа*, обеспечивающем формирование детального представления системы, осуществляются:

- функционально-структурный анализ существующей системы, позволяющий сформулировать требования к создаваемой системе. Он включает уточнение состава и законов функционирования элементов, алгоритмов функционирования и взаимовлияний подсистем, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание пространства состояний  $Z$ , задание параметрического пространства  $T$ , в котором задано поведение системы, анализ целостности системы, формулирование требований к создаваемой системе;
- морфологический анализ – анализ взаимосвязи компонентов;
- генетический анализ – анализ предыстории, причин развития ситуации, имеющихся тенденций, построение прогнозов;
- анализ аналогов;
- анализ эффективности (по результативности, ресурсоемкости, оперативности). Он включает выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственно оценивание и анализ полученных оценок;
- формирование требований к создаваемой системе, включая выбор критериев оценки и ограничений.

Этап *синтеза* системы представлен на рис. 3 и включает:

- разработка модели требуемой системы (выбор математического аппарата, моделирование, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей, многовариантности реализаций, функциональной блочности построения);
- синтез альтернативных структур системы, разрешающих задачу;
- синтез параметров системы, разрешающих задачу;
- оценивание вариантов синтезированной системы (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка результатов, анализ результатов, выбор наилучшего варианта).





Оценка степени разрешения задачи проводится по завершению СА. Наиболее сложными являются этапы декомпозиции и анализа, что связано с неопределенностью, которую необходимо преодолеть в исследованиях.

### **Основные стадии процесс формирования общего и детального представления системы.**

#### **Формирование общего представления системы**

**Стадия 1.** Выявление главных функций (свойств, целей, предназначения) системы. Формирование (выбор) основных предметных понятий, используемых в системе. На стадии осуществляется выявление (уяснение) основных выходов в системе, так как с этого начинается ее исследование. На основе определения типа выхода (материальный, энергетический, информационный) осуществляется его соотнесение к каким-либо физическим или другим понятиям (выход производства – продукция (какая?), выход системы управления – командная информация (для чего, в каком виде), выход автоматизированной информационной системы – сведения (о чем) и т.д.).

**Стадия 2.** Выявление основных функций и частей (модулей) в системе и исследование (понимание) единства этих частей в ее рамках. На стадии происходит изучение внутреннего содержания системы, выявляется состав крупных частей и их роль в системе. Это стадия получения первичной информации о структуре и характере основных связей. Такую информацию необходимо представлять и изучать при помощи структурных или объектно-ориентированных методов анализа систем. На стадии следует обратить внимание на так называемые системообразующие факторы, т.е. на связи взаимообусловленности, которые и делают систему системой.

**Стадия 3.** Выявление основных процессов в системе, их роли, условий осуществления; выявление стадийности, смен состояний в функционировании; в системах с управлением – выделение основных управляющих факторов. Исследуется динамика важнейших изменений в системе, ход событий, вводятся параметры состояния, рассматриваются факторы, влияющие на эти параметры, обеспечивающие течение процессов, а также условия начала и конца процессов. Определяется, управляемы ли процессы и способствуют ли они осуществлению системой своих главных функций. Для управляемых систем уясняются основные управляющие воздействия, их тип, источник и степень влияния на систему.

**Стадия 4.** Выявление основных элементов внешней среды, с которыми связана исследуемая система, и характера этих связей. На стадии решается ряд отдельных задач: исследуются основные внешние воздействия на систему (входы); определяются их тип (вещественные, энергетические, информационные), степень влияния на систему, основные характеристики; фиксируются границы того, что считается системой, определяются элементы внешней среды, на которые направлены основные выходные воздействия; осуществляется анализ эволюции системы, путь ее формирования (иногда это ведет к пониманию структуры и особенностей функционирования системы). В целом стадия позволяет уяснить главные функции системы, ее зависимость и уязвимость или относительную независимость во внешней среде.

**Стадия 5.** Выявление неопределенностей и случайностей определяющего их влияния на систему.

**Стадия 6.** Выявление разветвленной структуры, иерархии, формирование представлений о системе как о совокупности модулей, связанных входами-выходами. **Стадией заканчивается формирование общих представлений о системе.** При необходимости детального ее исследования, улучшения функционирования и управления необходимо дальше углубленно исследовать и сформировать детальное представление системы.

**Стадия 7.** Выявление всех элементов и связей, их отнесение к структуре иерархии в системе и ранжирование элементов и связей по их значимости. Стадии 6 и 7 тесно связаны друг с другом, поэтому их анализ проводится совместно. Стадия 6 – это предел внутреннего познания системы для исследователя, оперирующего ею целиком. Более детальной информацией о системе (стадия 7) владеет исследователь, отвечающий за ее отдельные части. Т.о., хотя суть стадий 6 и 7 одна и та же, но в первой ограничиваемся тем объемом информации, которая доступна одному исследователю. При углубленной детализации важно выделять существенные для рассмотрения элементы (модули) и связи, отсекая все то, что не представляет интереса для целей исследований. Познание системы предполагает не всегда только отделение главного (основного) от обеспечивающего, но также выделение дополнительного внимания более главному. Детализация также предполагает рассмотрение и 4 стадии (связь системы с внешней средой). На стадии 7 совокупность внешних связей считается проясненной настолько, что позволяет оперировать с доскональной информацией о системе. Стадии 6 и 7 обеспечивают получение общего результата, цельного исследования системы. Дальнейшие стадии рассматривают ее отдельные стороны.

**Стадия 8.** Учет изменений и неопределенностей в системе - исследуются нежелательное изменение свойств системы («старение»), а также возможность замены отдельных частей (модулей) на новые для повышения качества системы по сравнению с первоначальным состоянием (улучшение характеристик модулей, подключение новых модулей, накопление информации для лучшего ее использования, а иногда и перестройку структуры, иерархии связей).

**Стадия 9.** Исследование функций и процессов в системе для управления ими на основе введения управления и процедур принятия решения, рассматривая управляющие воздействия как системы управления. Возможность единообразного рассмотрения всех целенаправленных вмешательств в поведение системы позволяет судить уже не об отдельных управленческих актах, а о системе управления, которая переплетается с основной системой, но четко выделяется в функциональном отношении.

На данной стадии выясняется, где, когда и как (в каких точках системы, в какие моменты, в каких процессах, скачках, выборах из совокупности, логических переходах и т.д.) система управления воздействует на основную систему, насколько это эффективно, приемлемо и удобно реализуемо. При введении управлений в системе исследуются варианты перевода входов и постоянных параметров в управляемые, определены допустимые пределы управления и способы их реализации.

**Стадии 6-9** направлены на углубленное исследование системы. Далее идет специфическая стадия моделирования, основанная на создании математической модели для полного изучения системы.

## **ВОПРОСЫ НА СЕМИНАР**

1. Определение системы на основе теоретико-множественного подхода. Определение системы на основе семантической модели. Анализ аксиом построения моделей системы.
2. Алгоритмическое представление структуры системного анализа объектов.
3. Задачи и стратегии декомпозиция системы.
4. Задачи системного анализа в процессе создания систем.
5. Задачи системного синтеза в процессе создания систем.
6. Стадии процесс формирования общего и детального представления системы.