

Лекция. Базовые положения системного анализа

Цель: Изложить основы системного анализа, познакомить с понятийным аппаратом и методологией решения проблем.

Время - 4 часа

Учебные вопросы:

1. *Сущность и задачи системного анализа*
2. *Системы и их классификация*
3. *Основные определения системного анализа*
4. *Системный анализ как методология решения проблем*

1. Сущность и задачи системного анализа

Разнообразные сложные организационно-технические системы относятся к классу систем с управлением. Общие закономерности функционирования и свойства таких систем являются предметом изучения системного анализа. Считается, что системный анализ – это методология решения проблем, основанная на структуризации систем и количественном сравнении альтернатив.

Системный анализ – это логически связанная совокупность теоретических и эмпирических положений из области математики, естественных наук и опыта разработки сложных систем, которая обеспечивает повышение обоснованности решения конкретной проблемы.

В системном анализе используются как математический аппарат общей теории систем, так и другие качественные и количественные методы из области математической логики, теории эффективности, теории информации, методов моделирования и т.д.

Применение системного анализа дает возможность выделить перечень и указать целесообразную последовательность выполнения взаимосвязанных задач, позволяющих не упустить из рассмотрения важные стороны и связи изучаемого объекта. Поэтому говорят, что системный анализ – это методика улучшающего вмешательства в проблемную ситуацию. Определение «*системный*» означает, что исследования основываются на использовании положений общей теории систем. Термин «*анализ*» характеризует саму процедуру проведения исследований, заключающуюся в последовательном вскрытии проблемы, ее изучении и выработке рекомендаций по ее снятию.

В связи с этим в состав задач системного анализа в процессе создания систем включают *задачи* декомпозиции, анализа и синтеза этих систем.

Задача декомпозиции означает представление системы в виде подсистем, состоящих из более мелких образований – элементов. В ряде случаев задачу декомпозиции рассматривают как составную часть задачи анализа.

В свою очередь, **задача анализа** состоит в нахождении различного рода свойств системы или среды, окружающей систему. Цель анализа может быть в определении закона преобразования информации, задающего поведение системы. В последнем случае речь идет об агрегации (композиции) системы в единственный элемент.

Задача синтеза системы противоположна задаче анализа. При ее решении необходимо по описанию закона преобразования информации построить систему, выполняющую это преобразование по определенному алгоритму. При этом предварительно должен быть определен класс элементов, из которых строится искомая система, реализующая алгоритм функционирования.

В рамках каждой задачи выполняются частные *процедуры*. Например, задача декомпозиции включает в себя процедуры наблюдения, измерения свойств системы. В задачах анализа и синтеза выделяют процедуры оценки исследуемых свойств системы, алгоритмов, реализующих заданный закон преобразования информации. Тем самым вводятся различные определения *эквивалентности* систем, делающие возможным постановку и решение задач оптимизации, то есть задач нахождения в классе эквивалентных систем системы с экстремальными значениями определяемых в них функционалов.

В основе системного анализа как науки лежат, с одной стороны, определения основных понятий, а с другой – принципы проведения анализа.

2. Системы и их классификация

Базовое понятие системного анализа – это **система**. Строгого и единого понятия «система» в настоящее время не существует. В качестве «рабочего» определения в литературе под системой в общем случае понимают *совокупность элементов и связей между ними, обладающую определенной целостностью*.

Целостность (эмергентность) системы – это такое ее свойство, которое 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 ;
 m – общее количество характеристик.

Кроме того, система отражает семантику предметной области, поэтому систему следует также рассматривать как способ отображения реальных объектов в виде совокупности моделей в сознании исследователя. При этом модели должны быть адекватны решаемой объектом задаче.

Многообразие систем и присущих им свойств позволяет проводить *классификацию* систем по разным признакам.

По *характеру существования* различают **физические** и **абстрактные** системы.

Физические системы – это реально существующие объекты, явления и процессы. *Абстрактные системы* – это определенного рода отображения (модели) реальных объектов.

Для одной и той же реальной системы может быть построено множество систем – моделей, различающихся по цели моделирования, степени детализации и другим признакам.

По *степени сложности* выделяют **простые** и **сложные** системы. (В системном анализе рассматриваются сложные системы большого масштаба.)

Устоявшейся границы между простыми и сложными системами нет. Условно считают, что сложные системы характеризуются тремя основными признаками: робастностью, наличием неоднородных связей и эмергентностью.

Робастность – это способность системы сохранять частичную работоспособность при отказе ее отдельных частей (подсистем, элементов). Подобное свойство объясняется функциональной избыточностью сложной системы и проявляется в изменении степени деградации выполняемых функций. Эта степень деградации зависит от глубины возмущающих воздействий. Заметим, что простая система может находиться не более чем в двух состояниях: полной работоспособности или полного отказа.

В сложных системах кроме значительного количества элементов присутствуют многочисленные и, главное, разные по типу (т.е. *неоднородные*) связи между элементами. Основными типами считаются следующие связи: структурные (в том числе иерархические), функциональные, причинно-следственные, информационные, про-

странственно-временные. По этому же признаку (наличие или отсутствие неоднородных связей) в отдельный класс выделяют **большие** системы. В отличие от сложных систем они представляют собой совокупность (множество) *однородных* элементов, объединенных связью *одного* типа.

Как упоминалось ранее, сложные системы обладают свойством, которое отсутствует у любой из составляющих частей. Это *интегативность* (*целостность*, *эмергентность*). Другими словами, отдельное рассмотрение каждого элемента системы не дает полного представления о сложной системе в целом. Эмергентность может достигаться за счет обратных связей, играющих важнейшую роль при управлении сложной системой.

При описании сложных систем выделяют их *структурную* и *функциональную* (вычислительную) сложность.

Структурная сложность может быть оценена числом элементов, входящих в систему (переменных, состояний, компонентов), и разнообразием взаимосвязей между ними.

Для оценки сложности *функционирования* систем применяют алгоритмический подход. Он основан на определении ресурсов (времени счета или используемой памяти), требуемых системе при решении некоторого класса задач. Например, если функция времени вычислений является полиномиальной от входных данных, то имеют дело с полиномиальным по времени или «легким» алгоритмом. В случае экспоненциального по времени алгоритма говорят о его «сложности».

Кроме всего, сложные системы допустимо делить на **естественные** (природные) и **искусственные**. Как правило, *искусственные* системы отличаются от естественных наличием ярко выраженных *целей функционирования* (назначением) и наличием *управления*.

По *характеру поведения во времени* системы делят на **динамические** и **статические**.

Если система способна изменять свои состояния в некотором параметрическом пространстве (в данном случае времени), то она относится к классу *динамических*. В отличие от динамических систем *статические* таким свойством не обладают.

По *характеру изменения своего состояния* **динамическую** систему можно отнести к классу **дискретных** или же **непрерывных**.

Система с управлением, имеющая некоторый входной сигнал $x(t)$, выходной сигнал $y(t)$ и характеризующаяся некоторой переменной состояния $z(t)$, может рассматриваться как преобразователь, перерабатывающий входной поток информации (исходные данные) $x(t)$ в выходной поток информации (решение по управлению) $y(t)$. Деление систем на дискретные и непрерывные проводится в соответствии с типом значений $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$.

Изменение состояния дискретных систем происходит не непрерывно, а в дискретные моменты времени по принципу «от события к событию».

Непрерывные системы исследуются с помощью аппарата дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных. В свою очередь, дискретные системы описываются имитационными, дискретно-событийными моделями: массового обслуживания, сетями Петри, цепями Маркова и т.п.

Фазовая траектория дискретных систем является кусочно-постоянной и формируется последовательностью некоторых событий u . Последовательность отрезков постоянства отражает последовательность состояний системы z , а длина каждого отрезка соответствует времени пребывания системы в соответствующем состоянии. Под состоянием понимается, например, число сообщений, ожидающих передачи в каждом узле сети. Состояния принимают значения из дискретного множества. Таким образом,

фазовая траектория дискретной системы описывается последовательностью двух чисел: состояния и времени пребывания в нем.

Траектория непрерывной системы постоянно изменяется и, в общем случае, развивается на основе непрерывных входных воздействий $x(t)$.

По *характеру определенности поведения* ту или иную динамическую систему можно относить к **детерминированным** или **стохастическим**.

В общем случае детерминированная система описывается уравнением наблюдения и уравнением состояния:

$$\begin{aligned}y(t) &= g(z(t), x(t)); \\z(t) &= f(z(t_0), x(\tau)); \tau \in [t_0, t]\end{aligned}$$

Если в правые части этих соотношений добавить в качестве аргументов функционалов g и f случайную функцию $p(t)$, принимающую значения на непрерывном или дискретном множестве действительных чисел, то новые соотношения будут описывать стохастическую систему:

$$\begin{aligned}y(t) &= g(z(t), x(t), p(t)); \\z(t) &= f(z(t_0), x(\tau), p(t)); \tau \in [t_0, t]\end{aligned}$$

По *характеру взаимодействия с внешней средой* системы делятся на **открытые** и **закрытые**.

Системы с входным сигналом, источником которого нельзя управлять, или системы, в которых неоднозначность их реакции нельзя объяснить разницей в состояниях, называются *открытыми*. Взаимодействие с внешней средой порождает проблему «непредсказуемости» значений выходных сигналов и, как следствие, трудности описания открытых систем.

В отличие от них *закрытые (замкнутые)* системы изолированы от среды. Все реакции замкнутой системы однозначно объясняются изменением ее состояний. Вектор входного сигнала $x(t)$ в замкнутых системах имеет нулевое число компонентов и не может нести никакой информации. Строго говоря, замкнутые системы не должны иметь не только входа, но и выхода. Тем не менее, даже в этом смысле их можно интерпретировать как генераторы информации, рассматривая изменение их внутреннего состояния во времени.

3. Основные определения системного анализа

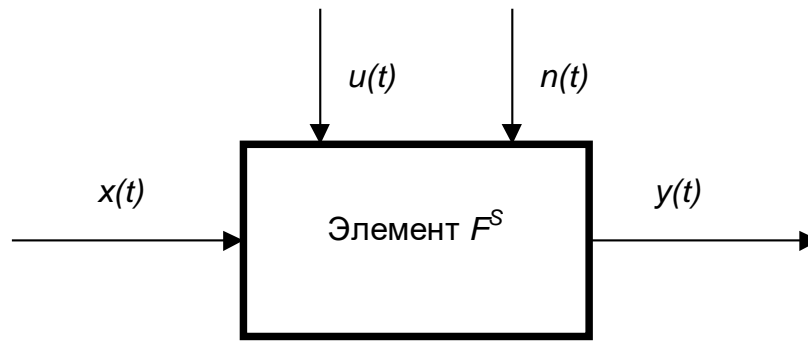
Как любая научная теория системный анализ оперирует множеством словесно-интуитивных или формальных определений. Структуризацию понятийного аппарата целесообразно вести «снизу-вверх».

Элемент – некоторый объект (материальный, энергетический, информационный), обладающий рядом важных свойств и реализующий в системе определенный закон функционирования F^S , внутренняя структура которого не рассматривается.

Входной сигнал элемента может быть разделен на три составляющих:

- 1) неуправляемые входные сигналы $x(t)$, преобразуемые рассматриваемым элементом;
- 2) воздействия внешней среды $n(t)$, представляющие собой шум, помехи;
- 3) управляемые сигналы (события) $u(t)$, появление которых приводит к переводу элемента из одного состояния в другое.

Таким образом, элемент – это неделимая наименьшая функциональная часть исследуемой системы, представляющая собой так называемый «черный ящик». Функционально элемент описывается как $y(t) = F^S(x, n, u, t)$.



Элемент системы как «черный ящик»

Входные сигналы, воздействия внешней среды и управляющие сигналы являются независимыми переменными. При строгом подходе изменение любой из этих независимых переменных ведет к изменению состояния элемента системы. Поэтому целесообразно обозначать все эти сигналы как $x(t)$, а элемент описывать как $y(t) = F^S(x(t))$, если это не затрудняет анализ системы.

Выходной сигнал $y(t)$, в свою очередь, представляют совокупностью характеристик элемента $y_j \in Y$.

Под *средой* понимается множество объектов S' вне данного элемента (системы), которые оказывают влияние на элемент (систему) и сами находятся под воздействием элемента (системы).

Правильное разграничение исследуемого объекта и среды является необходимым элементом системного анализа. Часто вводят понятие «суперсистема» или «метасистема» - часть внешней среды, для которой исследуемая система является элементом.

Подсистема – это часть системы, выделенная по определенному признаку, обладающая некоторой самостоятельностью и допускающая разложение на элементы в рамках данного рассмотрения.

Система может быть разделена на элементы не сразу, а последовательным расчленением на подсистемы – совокупности элементов. Как правило, такое расчленение проводится на основе определения независимой функции, выполняемой данной совокупностью элементов совместно для достижения некоторой частной цели, обеспечивающей достижение общей цели системы. Подсистема отличается от простой группы элементов, для которой не выполняется условие целостности.

Последовательное разбиение системы в глубину приводит к иерархии подсистем, нижним уровнем которой является элемент.

Под *свойством* понимают сторону объекта, обуславливающую его отличие от других объектов или сходство с ними. Свойство всегда проявляется при взаимодействии объекта с другими объектами.

Свойства классифицируются на *внешние*, проявляющиеся в форме выходных характеристик u_i только при взаимодействии с внешними объектами, и *внутренние*, проявляющиеся в форме переменных состояния z_i при взаимодействии с внутренними элементами системы и являющиеся причиной внешних свойств.

Одна из основных целей системного анализа – это выявление внутренних свойств системы, определяющих ее поведение.

По структуре свойства делят на простые и сложные (интегральные). Следует заметить, что внешние простые свойства доступны непосредственному наблюдению. Сложные свойства формируются на их основе. Внутренние же свойства конструируются в сознании логически и не доступны наблюдению.

Рассмотрение свойств можно вести на различных горизонтальных (иерархических) уровнях анализа системы. Кроме того выделяют вертикальные уровни анализа –

аспекты. При проведении системного анализа на результаты влияет фактор времени. Для своевременного окончания работы следует правильно определить уровни и аспекты проводимого исследования. При этом выделяются существенные для данного исследования свойства путем абстрагирования от несущественных подробностей по отношению к цели анализа.

Характеристика – то, что отражает некоторое свойство элемента системы.

Характеристика y_j формально задается кортежем $y_j = \langle name, \{value\} \rangle$, где *name* – имя j -й характеристики, $\{value\}$ – область допустимых значений. Эта область задается перечислением значений или функционально, с помощью правил вычисления (измерения) и оценки.

В зависимости от *типа отношений на множестве значений характеристик* их делят на *количественные* и *качественные*.

Если на множестве значений характеристики заданы метризованные отношения, когда указывается не только факт выполнения отношения $\rho(y_j^1, y_j^2)$, но также и степень количественного превосходства, то характеристика называется *количественной*.

Метризованное отношение может быть *аддитивным*: на некоторое количество единиц, или *мультипликативным*: в несколько раз.

Количественная характеристика также называется *параметром*.

Если же пространство отношений не является метрическим, то характеристика называется *качественной*. Качественные характеристики позволяют различать объекты без установления количественных предпочтений.

Характеристики отражают свойства объектов. Формально свойства могут быть представлены и в виде закона функционирования элемента (системы).

Законом функционирования, описывающим процесс функционирования элемента (системы) во времени, называют зависимость $y(t) = F^S(x, n, u, t)$.

Оператор F^S отражает поведение элемента (системы) во времени.

Поведением называют процесс изменения состояния элемента (системы), оцениваемый по степени достижения цели функционирования. Понятие поведения принято относить только к целенаправленным системам и оценивать по показателям.

Цель – это ситуация или область ситуаций, которая должна быть достигнута при функционировании системы за определенный временной промежуток. Цель может задаваться требованиями к показателям результативности, ресурсоемкости, оперативности функционирования системы, либо к траектории достижения заданного результата. Как правило, цель для системы определяется суперсистемой, той, в которой рассматриваемая система является элементом.

Показатель – это характеристика, отражающая качество системы или целевую направленность процесса, реализуемого системой: $Y = W(x, n, u)$.

Различают *показатели качества* и *показатели эффективности*. Показатель качества характеризует пригодность системы для использования ее по назначению, а показатель эффективности – процесс и эффект от функционирования системы.

Показатели качества (эффективности) делятся на *частные* и *обобщенные*. Частные показатели отражают существенные свойства системы в отдельности. Обобщенный показатель – это вектор, отражающий совокупность свойств системы в целом.

Связью называют вид отношений между элементами, который проявляется как некоторый обмен (взаимодействие) между ними. Выделяют *внешние* и *внутренние* связи.

Внешние связи системы – это ее связи со средой. Эти связи проявляются в виде характерных свойств системы. Определение внешних связей позволяет отделить систему от окружающего мира и является начальным этапом исследования.

В ряде случаев достаточно ограничить исследование системы установлением ее закона функционирования. При этом система отождествляется с оператором F^S и представляется в виде «черного ящика». Однако в задачах анализа обычно требуется выяснить, какими внутренними связями обусловлены интересующие исследователя свойства. Поэтому основным содержанием системного анализа является определение внутренних связей системы.

Выделение связей разных видов, как и выделение элементов системы, позволяет судить о сложности системы.

Для описания и исследования систем важным является понятие *алгоритма функционирования* A^S , под которым понимают метод получения выходных характеристик $y(t)$ с учетом входных воздействий $x(t)$, управляющих воздействий $u(t)$ и воздействий внешней среды $n(t)$. Вполне понятно, что один и тот же закон функционирования может быть реализован различными способами, с помощью различных алгоритмов функционирования: $F^S \rightarrow \{A^S\}$.

Наличие множества алгоритмов функционирования и возможности выбора на этом множестве приводит к тому, что системы с одним и тем же законом функционирования обладают различным качеством и эффективностью процесса функционирования.

Качество – совокупность существенных свойств объекта, обуславливающих его пригодность для использования по назначению. Оценка качества может проводиться через обобщенный *показатель качества* системы.

Процессом называют совокупность состояний системы $z(t_0), z(t_1), \dots, z(t_n)$, упорядоченных по изменению некоторого параметра t , определяющего свойства системы.

Формально процесс функционирования системы как последовательная смена ее состояний интерпретируется координатами точки в k -мерном фазовом пространстве. При этом каждой реализации процесса соответствует определенная фазовая траектория. Совокупность всех возможных состояний $\{z\}$ называется *пространством состояний* системы.

Эффективность процесса – это степень его приспособленности к достижению цели. Следует различать качество системы и эффективность процесса, реализуемого системой. Эффективность проявляется только при функционировании системы и зависит от свойств самой системы, способа ее применения и от внешних воздействий.

Критерий эффективности – это обобщенный показатель и правило выбора лучшего варианта системы (решения). Пример: $Y^* = \max \{Y\}$.

Если решение выбирается по качественным характеристикам, то критерий называют *решающим правилом*.

В том случае, если исследователя интересует не только закон функционирования, но и алгоритм реализации этого закона, то элемент не может рассматриваться в виде «черного ящика» и должен рассматриваться как *подсистема* – часть системы, выделенная по определенному признаку

Описание подсистемы в целом совпадает с описанием элемента. Тем не менее, дополнительно вводится понятие множества собственных (внутренних) характеристик $h \in H$.

Оператор F^S преобразуется к виду $y(t) = F^S(x, n, u, h, t)$, а метод получения выходных характеристик должен учитывать не только внешние воздействия $x(t)$, управляющие воздействия $u(t)$ и воздействия внешней среды $n(t)$, но и собственные характеристики подсистемы $h(t)$.

Описание закона функционирования системы наряду с аналитическим, графическим, табличным и другими способами в ряде случаев может быть получено через со-

стояние системы. *Состояние системы* – это множество значений ее характеристик в данный момент времени.

Состояние системы в начальный момент времени $t_0 < t^* \leq T$ полностью определяется начальным состоянием $z(t_0)$, входными воздействиями $x(t)$, управляющими воздействиями $u(t)$, внутренними параметрами $h(t)$ и воздействиями внешней среды $n(t)$, которые имели место за период $t^* - t_0$, с помощью уравнений динамической системы, преобразованных к виду:

$$\begin{aligned}z(t) &= f(z(t_0), x(\tau), u(\tau), n(\tau), h(\tau), t), \tau \in [t_0, t]); \\y(t) &= g(z(t), t).\end{aligned}$$

Здесь уравнение состояния по начальному состоянию $z(t_0)$ и переменным x, u, n, h определяет вектор-функцию $z(t)$, а уравнение наблюдения по полученному значению состояний $z(t)$ определяет переменные на выходе подсистемы $y(t)$.

Таким образом, цепочка уравнений объекта «вход-состояние-выход» позволяет определить характеристики подсистемы:

$$y(t) = f[g(z(t_0), x, u, n, h, t)]$$

Структура – совокупность образующих систему элементов и связи между ними. В структуре системы существенную роль играют связи. Так, изменяя связи при сохранении элементов, можно получить другую систему.

Ситуация – совокупность состояний системы и среды в один и тот же момент времени.

Проблема – несоответствие между существующим и требуемым (целевым) состоянием системы при данном состоянии среды в рассматриваемый момент времени.

4. Системный анализ как методология решения проблем

Системный анализ - это совокупность научно-методических и практических приемов решения разнообразных проблем. Эта процедура базируется на трех понятиях: *проблема, решение проблемы, система*.

Проблема - несоответствие между существующим и требуемым положением дел в какой либо области (более строгое определение дано ранее). Требуемое положение дел обычно отождествляют с целью, которая должна быть достигнута. Такое положение может диктоваться объективными условиями или субъективными предпосылками.

В зависимости от глубины познания все проблемы условно делят на *структурированные* и *неструктурированные*. Последним соответствует сугубо качественная формулировка и их решение возможно лишь на чисто эвристической основе. Среди структурированных проблем различают хорошо и слабоструктурированные. Первые формулируются количественно и решаются в рамках исследования операций. При формулировке вторых используются как количественные, так и качественные элементы, причем последние доминируют. Слабоструктурированные проблемы имеют следующие особенности: информация по проблеме никогда не бывает полной, получение наиболее важной информации проводится с помощью экспертов, множество решений проблемы имеет большую размерность, принятие решений сопряжено с риском. Для решения проблем этого типа и предусмотрен системный анализ.

Основными атрибутами проблемы выступают: важность, масштаб (размеры несоответствия), место и время возникновения. Каждую проблему можно разделить на подпроблемы.

Проблема проявляется в симптомах. Систематически проявляющиеся симптомы образуют тенденцию. Выявление проблемы - это процесс идентификации симптомов. Такая идентификация возможна при условии знания требуемого состояния (цели). За

выявлением проблемы следует прогнозирование ее развития и оценка актуальности, позволяющая определить необходимость решения проблемы.

Решение проблемы - это устранение несоответствия между существующим и требуемым положением дел, то есть замена существующей системы новой или совершенствование существующей системы.

Система выступает средством решения проблемы. В отсутствии проблемы нет смысла создавать систему.

Необходимые компоненты системного анализа:

- 1) *цель*, которая должна быть достигнута функционирующей системой;
- 2) *альтернативы* (варианты) систем, посредством которых возможно достижение выдвинутой цели;
- 3) *ресурсы*, необходимые для создания или совершенствования и использования той или иной альтернативы;
- 4) *критерий*, используемый для выбора альтернативы;
- 5) *модель*, связывающая цель, альтернативы, ресурсы и критерий.

Для реализации процесса решения проблем системный анализ предлагает стандартный набор функций, которые не зависят от методов их выполнения и определяют технологию системного исследования.

Процесс решения проблемы состоит из следующих этапов:

1. **Определение цели.** Она определяется с учетом необходимых и желательных потребностей, а также исходя из возможности достижения. При определении цели используются опыт прогнозы и суждения специалистов. Неточная постановка цели ведет к ложным проблемам.

2. **Выявление и формулирование проблемы.** Проблема должна быть правильно и четко сформулирована. Для этого изучается процесс функционирования системы в историческом аспекте. Затем определяется существующее положение дел, осуществляется сравнение требуемого и существующего положения дел. На основании сравнения дается оценка соответствия. После этого прогнозируется развитие системы. Проблема формулируется в терминах системного анализа. Исходная формулировка проблемы редко оказывается исчерпывающей и, как правило, подлежит дальнейшей доработке.

3. **Построение или выбор модели.** Модель необходима для того, чтобы оказать помощь принимающему решение. В ней должны отражаться наиболее существенные факторы. Она позволяет оценить последствия решения.

4. **Выбор возможного набора альтернатив.** Этот набор определяется исходя из наложенных ограничений.

5. **Оценка решения и выбор наиболее приемлемого.** Такая оценка с целью выбора наилучшего решения идет по выбранному критерию.

6. **Реализация решения.** Решению придается законодательная сила и оно превращается в жизнь, в результате чего создается новая или совершенствуется существующая система.

7. **Оценка результатов решения проблемы.** Формируется суждение о том, достигнута ли поставленная цель или нет, и насколько эффективным оказалось решение проблемы.

5. Любой анализ является итеративным процессом. Детализация исследований должна проводиться постепенно. Приблизительное исследование многих моделей предпочтительнее детального исследования одной. Аналогично расширение набора альтернатив может принести большую пользу, чем исчерпывающий набор первоначально взятых.