

### 3. Лекция-обратная связь. Методология системного анализа

#### 1. Методы системного анализа

Методы системного анализа направлены на формулирование проблемы, выявление целей, выдвижение альтернативных вариантов решения проблем, выявление масштабов неопределённости по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности, а также принятия решений и связанных организационных задач. В общем случае при рассмотрении существующей системы и процесса её функционирования выявляется проблемная ситуация как несоответствие существующего положения дел требуемому. Для разрешения проблемной ситуации проводится системное исследование при помощи методов *декомпозиции*, *анализа* и *синтеза* системы. Моделирование системы, то есть реализация системы в виде модели, позволяет провести оценку степени снятия проблемной ситуации. Общий подход к разрешению проблемных ситуаций, применяемый в рамках системного анализа, представлен на схеме № 1.

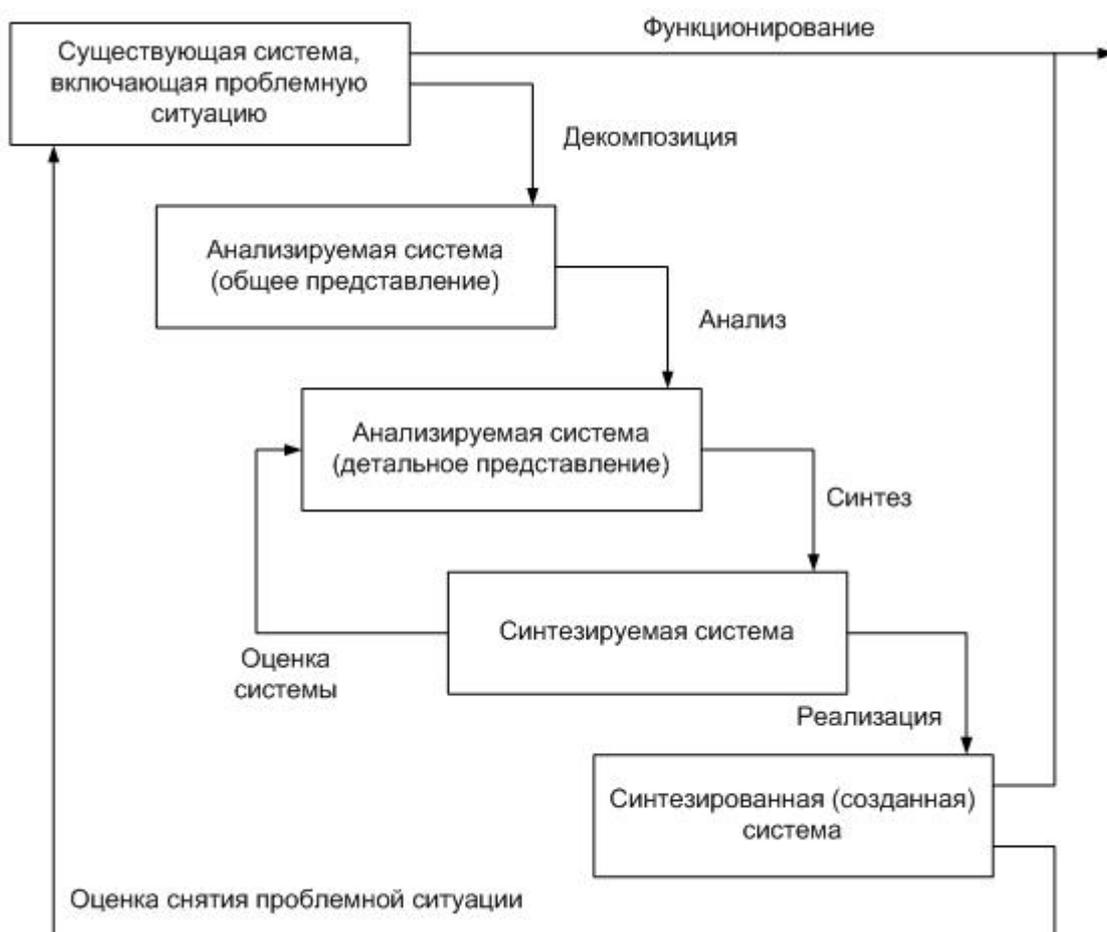


Схема № 1. Системный подход к решению проблемной ситуации.

Основные методы системного анализа и соответствующие им процедуры в упрощённом виде могут быть представлены в виде трёхуровневого дерева (схема № 2).

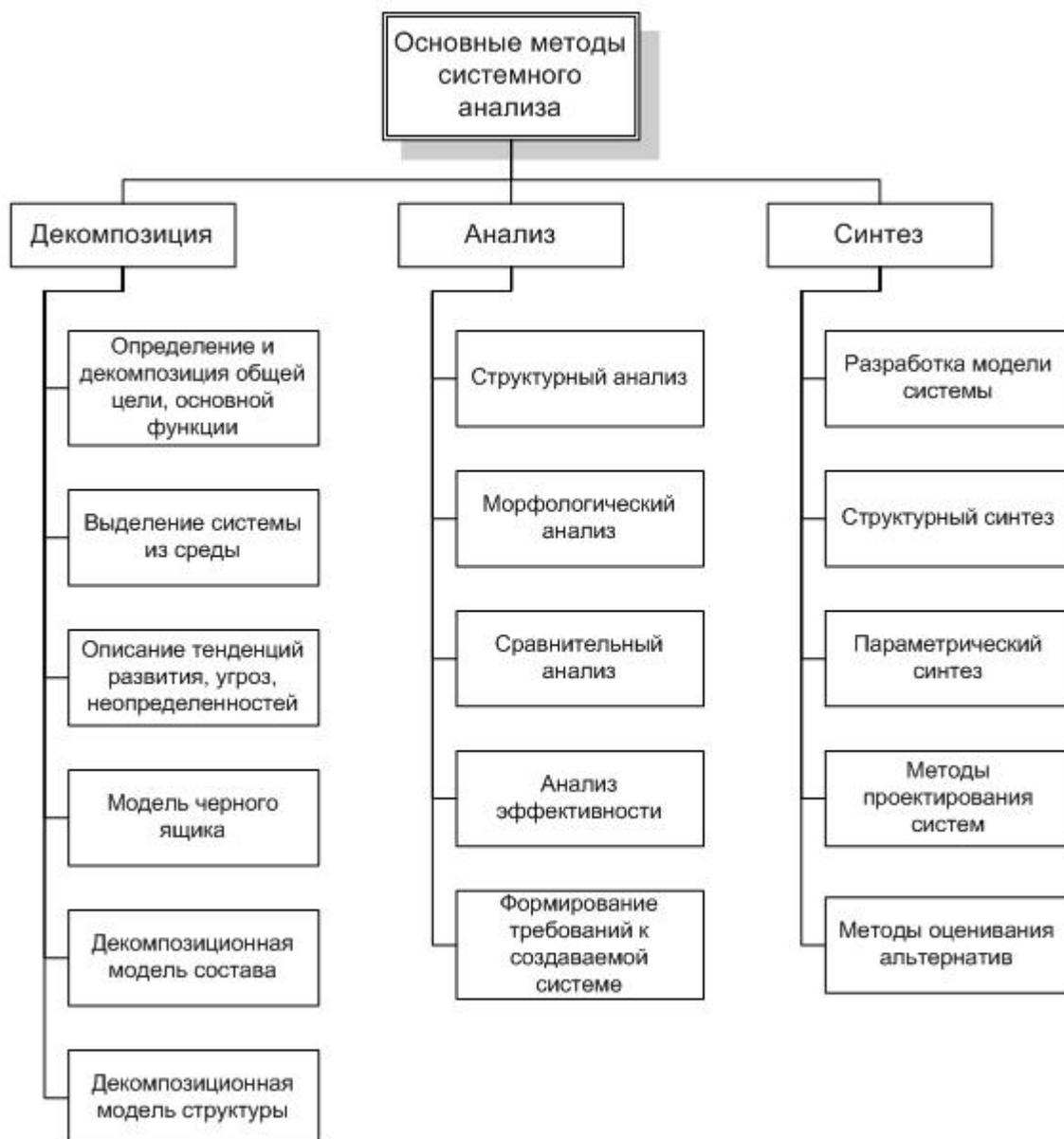


Схема № 2. Основные методы системного анализа.

В практической деятельности обычно не следуют указанному на схеме № 2 строго формальному разделению методов системного анализа по этапам проведения исследования, так как в действительности задачи системного анализа являются достаточно сложными, поэтому перечисление этапов не может быть самоцелью. Непосредственное применение тех или иных методов связано с предметом исследования и конкретным содержанием решаемой задачи.

### Декомпозиция системы

На этапе *декомпозиции системы*, обеспечивающем её общее представление, осуществляются:

1. определение и декомпозиция целей исследования и основной функции системы как ограничение траектории в пространстве состояний системы или в области допустимых ситуаций;
2. выделение системы из среды: определение ближнего и дальнего окружения системы, а также выявление и описание воздействующих факторов;
3. описание тенденций развития, ограничений и неопределённостей разного рода;

4. описание системы как «чёрного ящика»;
5. проведение компонентной (по виду элементов) и структурной (по видам отношений между элементами) декомпозиции системы.

Процесс декомпозиции довольно сложен и требует привлечения квалифицированных экспертов. Основной проблемой при этом является соблюдение двух противоречивых принципов:

1. принципа полноты — системная проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно;
2. принципа простоты — системное моделирование должно быть максимально компактным на всех уровнях.

Компромисс в указанном противоречии достигается с помощью четырёх основополагающих принципов:

1. принципа существенности — в системную модель включаются только компоненты, существенные по отношению к целям анализа;
2. принципа элементарности — доведение декомпозиции до простого, понятного, реализуемого результата;
3. принципа постепенной детализации модели;
4. принципа итеративности — возможность введения новых элементов в основания и продолжение декомпозиции по ним на разных ветвях дерева.

Глубина декомпозиции ограничивается. Так, декомпозиция должна прекращаться, если необходимо изменить уровень абстракции — представить элемент как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «чёрного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы и, следовательно, вызывает прекращение декомпозиции. В современных методиках типичной является декомпозиция модели на глубину 5–6 уровней. На такую глубину декомпозируется обычно одна из подсистем. Функции, которые требуют такого уровня детализации, часто очень важны, и их детальное описание даёт ключ к основам функционирования всей системы.

Согласно теории систем, большинство систем могут быть декомпозированы на базовые представления подсистем. К ним относят:

1. последовательное (каскадное) соединение элементов;
2. параллельное соединение элементов;
3. соединение элементов с помощью обратной связи.

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

Наиболее часто применяются следующие стратегии декомпозиции:

1. *Функциональная декомпозиция.* Базируется на анализе функций системы. При этом ставится вопрос, что делает система, независимо от того, как она работает. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов.

2. *Декомпозиция по жизненному циклу.* Признак выделения подсистем — изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы от создания до прекращения функционирования или применения. Так, в производственном жизненном цикле (в соответствии с ISO 9000) выделяют следующие его стадии:

- маркетинг;
- проектирование;
- подготовка и разработка;

- производство;
- контроль и испытания;
- упаковка и хранение;
- реализация и распределение;
- монтаж и эксплуатация;
- техническая помощь в обслуживании;
- утилизация.

В жизненном цикле управления организационно-экономической системы выделяют следующие его стадии:

- планирование;
- инициирование;
- координация;
- контроль;
- регулирование.

В жизненном цикле информационных систем его стадии соответствуют этапам обработки информации:

- регистрация;
- сбор;
- передача;
- обработка;
- отображение;
- хранение;
- защита;
- уничтожение.

Рекомендуется применять эту стратегию, когда целью системы является оптимизация процессов и когда можно с достаточной точностью определить последовательные стадии преобразования входов в выходы.

3. *Декомпозиция по физическому процессу.* Признак выделения подсистем — шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний. Хотя эта стратегия полезна при описании существующих процессов, результатом её часто может стать слишком последовательное описание системы, которое не будет в полной мере учитывать ограничения, диктуемые функциями друг другу. При этом может оказаться скрытой последовательность управления. Применять эту стратегию следует, только если целью модели является описание физического процесса как такового.

4. *Декомпозиция по подсистемам,* или структурная декомпозиция. Признак выделения подсистем — сильная связь между элементами по одному из типов отношений (связей), существующих в системе (информационных, логических, иерархических, энергетических и других). Силу связи, например, по информации можно оценить коэффициентом информационной взаимосвязи подсистем  $k = N/N_0$ , где  $N$  — количество взаимноиспользуемых информационных массивов в подсистемах,  $N_0$  — общее количество информационных массивов. Для описания всей системы должна быть построена составная модель, объединяющая все отдельные модели. Рекомендуется использовать разложение на подсистемы, только когда такое разделение на основные части системы не изменяется. Нестабильность границ подсистемы быстро обесценит как отдельные модели, так и их объединение.

5. *Декомпозиция по входам для организационных систем.* Признак выделения подсистем — источник воздействия на систему, это может быть вышестоящая или нижестоящая система, а также существенная среда.

6. *Декомпозиция по типам ресурсов, потребляемых системой.* Формальный перечень типов ресурсов состоит из энергии, материи, времени и информации (для организационных систем в этот перечень добавляются кадры и финансы).

7. *Декомпозиция по конечным продуктам системы.* Основанием могут служить различные виды продукта, производимые системой.

8. *Декомпозиция по деятельности.* В системе выделяется субъект деятельности, объект, на который направлена деятельность, средства, используемые в процессе деятельности, внешняя среда, а также все возможные связи между ними. Обычно декомпозиция по деятельности осуществляется по нескольким основаниям, порядок их выбора определяется предметом исследования и конкретным содержанием решаемой задачи.

### **Анализ системы**

На этапе *анализа системы*, обеспечивающем формирование её детального представления, наиболее часто применяются следующие методы:

1. *Когнитивный анализ* — акцентирует внимание на «знаниях» в конкретной предметной области, на процессах их представления, хранения, обработки, интерпретации и производстве новых знаний. Он применяется в тех случаях, когда объём и качество имеющейся о проблеме информации не позволяют использовать традиционные методы, а требуется извлечение знаний экспертов, изучение процессов понимания ими проблемы и дополнительная структуризация данных. История развития когнитивного анализа применительно к принятию решений и управлению ситуациями тесно связана с исследованиями процессов человеческого мышления и психологии.

2. *Структурный анализ* — позволяет рассмотреть существующую систему с тем, чтобы сформулировать требования к создаваемой системе. Он включает уточнение состава и закономерностей функционирования элементов, алгоритмов функционирования и взаимовлияний подсистем, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание пространства состояний и параметрического пространства, в котором задано поведение системы, анализ целостности системы, формулирование требований к создаваемой системе.

3. *Морфологический анализ* — позволяет выбрать в анализируемой системе группу основных признаков. В качестве таких признаков могут быть взяты элементы структуры системы либо функции элементов. Для каждого признака предлагаются различные альтернативные варианты его реализации. Затем предложенные варианты комбинируют между собой. Из всего множества получаемых комбинаций выбираются допустимые, а затем наиболее эффективные варианты по некоторым критериям качества.

4. *Анализ эффективности* — позволяет провести оценку системы по результативности, ресурсоёмкости, оперативности. Он включает выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственно оценивание и анализ полученных оценок.

5. *Формирование требований* — позволяет сформировать требования к создаваемой системе, включая выбор критериев оценки и ограничений.

### **Синтез системы**

На этапе *синтеза системы* осуществляются:

1. *Разработка модели требуемой системы.* Этот этап включает выбор соответствующего исследованию математического аппарата, собственно моделирование системы, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей, многовариантности реализаций, модульности построения. Полученная модель исследуется с целью выяснения близости результата применения того или иного из вариантов её реализации к желаемому, сравнительных затрат ресурсов по каждому из вариантов, степени чувствительности модели к различным нежелательным внешним воздействиям.

2. *Синтез альтернативных структур системы, разрешающий проблемную ситуацию.* На этом этапе активно используются результаты структурного и морфологического анализа для генерации альтернатив.

3. *Синтез параметров системы, снимающей проблему.* Этот этап включает качественные и количественные характеристики функциональных элементов структуры и описание их функций, а также основные характеристики входящих и выходящих из системы потоков (материальных, энергии, времени и информации) и параметры их взаимодействия с внешней средой.

4. *Оценивание альтернативных вариантов синтезированной системы.* Этот этап проводится, как правило, с привлечением экспертов, и включает обоснование схемы оценивания вариантов реализации системной модели, проведение эксперимента по оценке, обработку результатов оценивания, анализ результатов, выбор наилучшего варианта.

Наиболее популярным методом оценки является *критериальный метод* — когда каждая отдельно взятая альтернатива оценивается конкретным числом (критерием, целевой функцией и так далее) и сравнение альтернатив сводится к сравнению соответствующих чисел. То есть для всего множества альтернатив  $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$  вводится целевая функция —  $Z = f(x) \Rightarrow \max$  или  $\min$ . Следует отметить что значения альтернатив могут выражаться различным образом — через скалярные, векторные, множественные и другие величины.

При практическом рассмотрении альтернатив выясняется, что для их оценки в большинстве случаев требуется более чем один критерий, то есть некоторое их множество  $Z_i = f_i(x)$ , где  $i = 1, n$ . В большинстве случаев невозможно найти альтернативу, являющуюся предпочтительной на всём множестве критериев, в таком случае необходимо применять специальные многокритериальные способы выбора. Примером такого решения является сведение многокритериальной задачи к однокритериальной, то есть введению суперкритерия.

$$Z_0 = Z_0(f_i(x)), \text{ где } i = 1, n.$$

Для определения вклада каждого из критериев обычно используют аддитивные и мультипликативные функции.

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n \frac{p_i f_i(x)}{a_i},$$

$$Z_0 = \prod_{i=1}^n \frac{f_i(x)^{p_i}}{a_i},$$

Где  $a_i$  — величина, обеспечивающая нормализацию разнородных критериев;  $p_i$  — вес (для [2–3] он должен  $\in [0,1]$ ), характеризующий вклад конкретного критерия в суперкритерий.

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

К плюсам аддитивного суперкритерия следует отнести его простоту и доступность. Справедливым в этом случае следует считать такой компромисс, при котором суммарный уровень абсолютного снижения значений одного или нескольких показателей не превышает суммарного уровня абсолютного увеличения значений других показателей. Главный недостаток аддитивных суперкритериев состоит в том, что они не вытекают из объективной роли частных критериев в определении качества системы и выступают поэтому как формальный математический приём, придающий задаче удобный вид. Кроме того, низкие оценки по одним критериям могут компенсироваться высокими оценками

по другим критериям. Это значит, что уменьшение одного из критериев вплоть до нулевого значения может быть покрыто возрастанием другого критерия.

Правомочность мультипликативного суперкритерия основывается на принципе справедливой относительной компенсации: справедливым следует считать такой компромисс, при котором суммарный уровень относительного снижения значений одного или нескольких критериев не превышает суммарного уровня относительного увеличения значений других критериев. Для мультипликативной функции, в сравнении с аддитивной, фактически действует правило: «низкая оценка хотя бы по одному критерию влечёт за собой низкое значение суперкритерия».

Выбор между аддитивной и мультипликативной свёртками частных критериев определяется степенью важности абсолютных или относительных изменений значений частных критериев соответственно.

Наряду с экспертными методами построения суперкритериев существуют принципиально иные, так называемые «объективные» методы. Весовые коэффициенты при их использовании определяются без привлечения экспертов. Эти методы не зависят от мнения экспертов или респондентов и в этом смысле не являются субъективными. Один из них — это метод главных компонент. В соответствии с данным методом веса исходных показателей в интегральном индексе зависят от дисперсий этих показателей и корреляции между ними. Другой подход к формированию интегрального индекса основан на использовании регрессионной модели с инструментальной переменной. В качестве весов в этом случае используются коэффициенты регрессионного уравнения.

При оценивании систем выделяют две большие группы критериев — *критерии качества* и *критерии эффективности* систем.

*Критерии качества* обозначают свойство или совокупность существенных свойств системы, обуславливающих её пригодность (соответствие) к целевому использованию. В большей части своей они относятся к строению системы (состав и свойства составных частей, структура, организация и так далее).

При оценивании качества систем с управлением признают целесообразным введение нескольких уровней качества, проранжированных в порядке возрастания сложности рассматриваемых свойств:

1. Первичным качеством любой системы является её *устойчивость*. Для простых систем устойчивость объединяет такие свойства, как прочность, стойкость к внешним воздействиям, сбалансированность, стабильность, гомеостазис (способность системы возвращаться в равновесное состояние при выводе из него внешними воздействиями). Для сложных систем характерны различные формы структурной устойчивости, такие, как надёжность, жизнеспособность и так далее. Они определяют способность системы сохранять значения показателей при нарушении работоспособности или повреждении части системы. Качество устойчивости системы может характеризоваться относительным числом элементов (или связей), при нарушении работоспособности, повреждении или уничтожении которых остальные показатели системы не выходят за допустимые пределы.

2. Более сложным, чем устойчивость, является *помехоустойчивость*, понимаемая как способность системы без искажений воспринимать и передавать информационные потоки. Помехоустойчивость объединяет ряд свойств, присущих в основном системам управления. К таким свойствам относятся надёжность информационных систем и систем связи, их пропускная способность, возможность эффективного кодирования/декодирования информации и так далее.

3. Следующим уровнем шкалы качества системы является *управляемость* — способность системы переходить за конечное (заданное) время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий. Управляемость обеспечивается, прежде всего, наличием прямой и обратной связи, объединяет такие свойства системы, как гибкость управления, оперативность, точность, производительность, инерционность, связность,

наблюдаемость объекта управления и другие. На этом уровне качества для сложных систем управляемость включает способность принятия решений по формированию управляющих воздействий.

4. Следующим уровнем на шкале качеств является *результативность*. Это качество системы, определяющее её возможности по достижению требуемого результата на основе имеющихся ресурсов в заданный период времени. Данное качество характеризуется такими свойствами, как производительность, мощность, ресурсоёмкость и оперативность. Таким образом, результативность — это потенциальная эффективность функционирования системы, способность получить требуемый результат при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствие воздействий внешней среды.

5. Наиболее сложным качеством системы является *самоорганизация*. Самоорганизующаяся система способна изменять свою структуру, параметры, алгоритмы функционирования и поведение для повышения эффективности. Принципиально важными свойствами этого уровня являются свобода выбора решений, адаптируемость, самообучаемость, способность к распознаванию ситуаций. Принцип свободы выбора решений предусматривает возможность изменения критериев на любом этапе принятия решений в соответствии со складывающейся обстановкой.

Введение уровней качества позволяет ограничить исследования одним из перечисленных уровней. Для простых систем часто ограничиваются исследованием устойчивости. Уровень качества выбирает исследователь в зависимости от сложности системы, целей исследования, наличия информации, условий применения системы.

*Критерии эффективности систем* соответствуют комплексному операционному свойству процесса функционирования системы, характеризующему его приспособленность к достижению цели операции (выполнению задачи системы). Это могут быть, например, критерии результативности, ресурсоёмкости и оперативности по исходу операции и по качеству «алгоритма», обеспечивающего получение результатов, и так далее:

1. *Результативность* операции обуславливается получаемым целевым эффектом, ради которого функционирует система.

2. *Ресурсоёмкость* характеризуется ресурсами всех видов, используемыми для получения целевого эффекта.

3. *Оперативность* определяется расходом времени, требуемого для достижения цели операции.

Оценка исхода операции учитывает, что операция проводится для достижения определённой цели — исхода операции. Под исходом операции понимается ситуация (состояние системы и внешней среды), возникающая на момент её завершения.

Оценка алгоритма функционирования является ведущей при оценке эффективности. Такое утверждение основывается на теоретическом постулате, подтверждённом практикой: наличие хорошего «алгоритма» функционирования системы повышает уверенность в получении требуемых результатов. В принципе, требуемые результаты могут быть получены и без хорошего алгоритма, но вероятность этого невелика. Это положение особенно важно для организационно-технических систем и систем, в которых результаты операции используются в режиме реального времени.

В совокупности результативность, ресурсоёмкость и оперативность порождают комплексное свойство — *эффективность процесса*, степень его приспособленности к достижению цели. Это свойство, присущее только операциям, проявляется при функционировании системы и зависит как от свойств самой системы, так и от внешней среды.

#### **Метод выбора на базе бинарных отношений:**

*Метод выбора на базе бинарных отношений* основан на том факте, что в практической деятельности бывает трудно дать оценку отдельно взятой альтернативе, однако если рассматривать её не в отдельности, а в паре с другой альтернативой,

то находятся основания сказать, какая из них более предпочтительна. Таким образом, основные положения этого метода заключаются в следующем:

- отдельная альтернатива не оценивается, то есть критериальная функция не вводится;
- для каждой пары альтернатив  $x$  и  $y$  некоторым образом можно установить, что одна из них предпочтительней другой или они равноценны;
- отношение предпочтения внутри любой пары альтернатив не зависит от других элементов множества альтернатив.

Математическое бинарное отношение  $R$  на множестве  $X$  определяется как некоторое подмножество упорядоченных пар  $(x, y)$ . Используется обозначение  $x R y$ , если  $x$  находится в отношении  $R$  с  $y$ , и  $x \not R y$  — в противоположном случае. Задать отношение — это значит тем или иным способом указать все пары  $(x, y)$ , для которых выполнено отношение  $R$ , являющиеся подмножеством полного бинарного отношения, то есть  $R \subseteq X * X$ .

Существует четыре разных способа задания отношений (схема № 3), предпочтительность каждого из них определяется характеристиками множества  $X$ .



Схема № 3. Способы описания выбора на базе бинарных отношений.

Первый способ задания отношений — самый очевидный, он состоит в непосредственном перечислении пар.

При использовании второго способа задания отношений все элементы нумеруются и отношения определяются элементами матрицы  $a_{ij} = \{1 : x_i R x_j; 0 : x_i \not R x_j\}$ , где значения  $i, j$  изменяются от 1 до  $n$  — количества элементов множества  $X$ . На практике, отношение может выражаться любой скалярной величиной, характеризующей свойство этого отношения.

Третий способ задания отношений — построение графа предпочтений, вершинами которого являются пронумерованные элементы множества  $X$ , если  $x_i R x_j$ , то от вершины  $x_i$  проводят направленную дугу к вершине  $x_j$ ; в случае  $x_i \not R x_j$  дуга не проводится.

Для определения отношений на бесконечных множествах альтернатив используется четвёртый способ задания отношений — задание отношений  $R$  сечениями.

Множество  $R^+(x) = \{y \in X \mid (y, x) \in R\}$  называется верхним сечением — это множество всех  $y \in X$ , которые находятся в отношении  $y R x$ , с заданным элементом  $x \in X$ . Множество  $R^-(x) = \{y \in X \mid (x, y) \in R\}$  называется нижним сечением — это множество всех  $y \in X$ , с которыми заданный элемент  $x$  находится в отношении  $R$ . Отношение однозначно определяется одним из своих сечений. Предпочтительность альтернативы задаётся через строго определяемые отношения эквивалентности, порядка и доминирования.

**Метод выбора на основании функции выбора:**

Метод выбора на основании функции выбора возник из-за того, что в действительности предпочтение между двумя альтернативами часто зависит от остальных. Кроме того, возможны такие ситуации выбора, когда понятие предпочтения вообще не имеет смысла. Например, когда в случае по отношению к множеству

альтернатив применяются правила выбора «типичного», «среднего», «наиболее отличного, оригинального» и так далее.

Указанный способ описывает выбор, как операцию над произвольным множеством альтернатив  $X$ , которая ставит этому множеству в соответствие некоторое предпочтительное подмножество  $C(X)$ :  $C(X) \in X$ .

Функция выбора как отображение совокупности множеств в совокупность множеств без поэлементарного отображения одного множества на другое и без отображения множеств на числовую ось является своеобразным и пока ещё не полно изученным математическим объектом.

Следует отметить, что серьёзное влияние на выбор того или иного варианта решения оказывает система выделенных в задаче *ограничений* — условий, отражающих влияние внешних и внутренних факторов, которые нужно учитывать в задаче принятия решений. Требования системности при рассмотрении вопроса требуют учёта всех возможных ограничений: организационных, экономических, правовых, технических, экологических, психологических и так далее. При этом качественные ограничения формулируются, как правило, в терминах «не разрешается», «не допускается», а количественные — «не более», «не менее», «в интервале от-до». Ограничения, как правило, дополняют (конкретизируют) сформулированные ранее цели и в ряде случаев могут сделать цели нереализуемыми. В этом случае необходимо через проведение ряда итерационных процедур снять часть ограничений или переформулировать цели.

#### Метод выбора на основе парных сравнений:

*Метод выбора на основе парных сравнений* сочетает в себе элементы выбора на основе критериев и бинарных отношений.

Основные этапы метода парных сравнений выглядят следующим образом:

- взвешивание целей и определение соответствующих им критериев;
- взвешивание и определение удельных весов критериев;
- проведение попарных сравнений альтернатив по каждому критерию;
- составление финальной матрицы для оценки альтернатив и определение относительной общей ценности каждой альтернативы;
- выбор альтернативы с наивысшей относительной ценностью.

После выполнения ранжирования методом строчных сумм все цели  $E_i$  получают нормированные веса  $g_i$ , кроме того, для каждой  $i$ -й цели должны быть определены критерии  $Z_{ij}$  (схема № 4), где  $i$  — порядковый номер цели ( $i = 1, n$ ), а  $j$  — номер критерия для  $i$ -й цели ( $j = 1, m_i$ ).

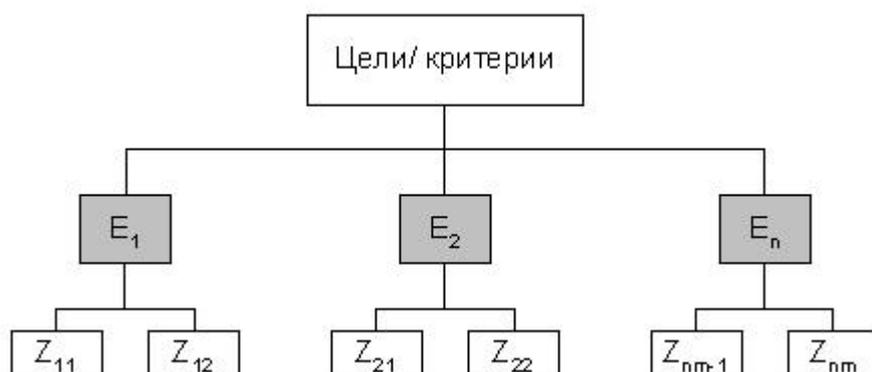


Схема № 4. Схема целей и критериев.

В случае если для одной цели определяется более одного критерия, то их также необходимо ранжировать методом строчных сумм, получить пронормированные веса  $c_{ij}$ , после чего подсчитать суммарные веса критериев  $q_{ij}$  по формуле:

$$q_{ij} = g_i * c_{ij},$$

Где  $i = 1, n$  — число целей;  $j = 1, m_i$  — количество критериев для  $i$ -й цели.

На следующем этапе проводится попарное сравнение альтернативных проектов  $A_i$  по каждому критерию  $Z_{ij}$  и на основании полученных результатов строится матрица  $\{P_{kn}\}$ , где:

$$k = \sum_{i=1}^n m_i$$

Относительных предпочтений, каждый столбец которой будут составлять результаты сравнения по определённому критерию.