

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики  
Кафедра прикладной математики и информатики**

# **ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

Текст лекций для студентов всех форм обучения  
по направлениям подготовки:

01.03.02 — Прикладная математика и информатика

13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Составитель  
В. П. Яковлев

Санкт-Петербург  
2023

Утверждено  
на заседании кафедры ПМИ  
08.02.2023 г., протокол № 6

Рецензенты:  
Н. В. Романцова, В. И. Королев

Текст лекций соответствует программе и учебному плану дисциплины «Основы системного анализа» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»; 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»; 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Текст лекций охватывает весь объем материалов по дисциплине. Издание предназначено для самостоятельной работы студентов очной и заочной формы обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД  
в качестве текста лекций

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.  
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 04.04.2023 г. Рег. № 5121/22

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛЕКЦИЯ № 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА .....	5
1. Этапы развития системных представлений.....	5
2. Системный анализ как метод принятия и обоснования решений.....	7
3. Системный подход как методология системного анализа.....	10
4. Системный подход к процессу принятия решений. Система предпочтений ЛПР .....	12
5. Системность как всеобщее свойство материи .....	14
ЛЕКЦИЯ № 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА.....	17
1. Определения системы. Задание системы аксиомами.....	17
1.1. Определения системы.....	17
1.2. Свойства системы .....	19
2. Классификация систем .....	20
3. Понятия, характеризующие строение системы .....	23
4. Понятия, характеризующие функционирование и развитие системы .....	24
ЛЕКЦИЯ № 3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА .....	27
1. Системный анализ в структуре современных системных исследований. Принципы системного анализа.....	27
2. Виды проблем, решаемых с помощью системного анализа.....	29
3. Принципы решения неструктурированных проблем .....	30
4. Принципы решения слабоструктурированных проблем .....	31
5. Принципы решения хорошо структурированных проблем.....	32
6. Системный подход к выявлению и решению проблем.....	34
ЛЕКЦИЯ № 4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ .....	39
1. Основные этапы и методы системного анализа.....	39
2. Методы экспертных оценок.....	42
3. Метод мозговой атаки (штурма).....	43
4. Дельфийский метод.....	44
5. Методы типа сценариев и дерева целей .....	45
6. Морфологические методы.....	48

ЛЕКЦИЯ № 5. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ. ПРОЦЕДУРЫ ЭКСПЕРТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ .....	50
1. Ранжирование .....	50
2. Парное сравнение.....	53
3. Множественные сравнения. Непосредственная оценка.....	55
4.Последовательное сравнение (метод Черчмена–Акоффа) .....	57
5. Методы Неймана-Моргенштерна и согласования оценок.....	57
ЛЕКЦИЯ № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	60
1. Основные понятия и этапы моделирования систем .....	60
2. Принципы и подходы к построению моделей .....	61
3. Классификация моделей систем.....	63
ЛЕКЦИЯ № 7. МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....	70
1. Многоуровневое моделирование сложных систем .....	70
2. Обобщенная модель элемента .....	73
3. Классификация моделей элементов .....	74
ЛЕКЦИЯ № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА .....	80
1. Определение и формирование жизненного цикла.....	80
2. Структура жизненного цикла.....	85
3. Классификация жизненных циклов.....	89
4. Система управления жизненным циклом.....	94
ЛЕКЦИЯ № 9. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ.....	98
1. Методика системного исследования социально-экономических проблем..	98
2. Методика проектирования систем управления организациями.....	100
3. Шкала уровней качества системы .....	104
4. Показатели и критерии эффективности систем .....	105
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	108

## ЛЕКЦИЯ № 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

1. Этапы развития системных представлений.
2. Системный анализ как метод принятия и обоснования решений.
3. Системный подход как методология системного анализа.
4. Системный подход к процессу принятия решений. Система предпочтений ЛПР.
5. Системность как всеобщее свойство материи.

### 1. Этапы развития системных представлений

Системные представления не являются открытием XX века. Слово «система» появилось в Древней Греции 2000–2500 лет назад и означало «сочетание», «организм», «устройство», «организация», «строй», «союз». Первоначально оно было связано с формами социально-исторического бытия, позднее принцип порядка был перенесен на Вселенную. В античной философии термин «система» характеризовал упорядоченность и целостность естественных объектов, а термин «синтагма» – упорядоченность и целостность искусственных объектов.

В конце XIX – начале XX века возникают три варианта нового направления, которое предполагает обобщенное описание организации, «поведения» систем любой природы и управления ими: *тектология*, *общая теория систем* и *кибернетика*.

*Тектология* – всеобъемлющая наука об универсальных типах и закономерностях структурного преобразования любых систем, общая теория организации и дезорганизации. Основная идея тектологии заключается в единстве строения и развития самых различных систем независимо от того конкретного материала, из которого он состоит. Это системы любых уровней организации – от атомных и молекулярных до биологических и социальных.

*Общая теория систем* обязана своим возникновением Людвигу фон Берталанфи (конец 40-х гг.). Он первым использовал термин «теория систем» в своих лекциях, прочитанных в Чикагском университете. В теории фон Берталанфи главное – это понятие «открытой системы». Это такая система, которая непрерывно взаимодействует со своей средой. Взаимодействие может принимать форму информации, энергии или материальных преобразований на границе с системой. Открытая система противопоставляется изолированной, которая не обменивается энергией, веществом или информацией с окружающей средой.

*Кибернетика*. В 1948 г. вышла знаменитая книга Норберта Винера «Кибернетика», в которой провозглашается единство принципов управления в биологических и технических системах, а позднее – и в социальных. В начале 50-х годов системный анализ стал рассматриваться как направление при исследовании сложных систем в биологии, макроэкономике и создании автоматизированных экономико-организационных систем управления. В

настоящее время кибернетику, наоборот, чаще квалифицируют как часть теории систем.

К началу 1980-х гг. все шире стали использоваться понятия «системный подход», «системный анализ», все чаще стали говорить о «системном мышлении», «системном кризисе» и т. п.

Постепенно различные виды системных теорий интегрировались в *системологию* – науку, которая включает в себя *общую теорию систем, отраслевые и специальные теории систем, системотехнику*.

*Общая теория систем* интегрирует наиболее обобщенное знание о системах. Она находится под воздействием философии, которая дает ей обоснование категориального аппарата, методы и приемы познания, качественное видение систем, и математики, обеспечивающей количественный анализ систем. Огромную роль в развитии общей теории систем играет логика, теория множеств, кибернетика и другие науки.

*Отраслевые теории систем* раскрывают специфику систем различной природы: физических, технических, химических, биологических, экономических, социальных и других.

*Специальные теории систем* направлены на отражение их отдельных сторон, аспектов, срезов, этапов. Они находятся под влиянием соответствующих теорий (например, теория эволюции).

*Системотехника* – практика и технология проектирования и исследования систем. Она находится под воздействием техники, моделирования, проектирования и конструирования, т. е. технической, биологической, информационной и социальной инженерии.

Теоретические и прикладные дисциплины образуют как бы единый поток, «системное движение», методологической базой которого стал так называемый «системный подход», который широко использовался в первые годы приложения теории систем к практическим задачам. В дальнейшем возникло прикладное научное направление, ставшее как бы «мостом» между абстрактными теориями и живой системной практикой, получившее название «системный анализ» – наиболее конструктивное из прикладных направлений системных исследований.

*Особенности современного системного анализа вытекают из самой природы сложных систем. Имея в качестве цели ликвидацию проблемы* или, как минимум, выяснение ее причин, системный анализ привлекает для этого широкий спектр средств, использует возможности различных наук и практических сфер деятельности. Являясь по существу прикладной диалектикой, системный анализ придает большое значение методологическим аспектам любого системного исследования. С другой стороны, прикладная направленность системного анализа приводит к использованию всех современных средств научных исследований – математики, вычислительной техники, моделирования, натуральных наблюдений и экспериментов.

В ходе исследования реальной системы обычно приходится сталкиваться с самыми разнообразными проблемами; быть профессионалом в каждой из них невозможно одному человеку. Выход видится в том, чтобы тот, кто берется

осуществлять системный анализ, имел образование и опыт, необходимые для опознания и классификации конкретных проблем, для определения того, к каким специалистам следует обратиться для продолжения анализа. Это предъявляет особые требования к специалистам-системщикам: они должны обладать широкой эрудицией, раскованностью мышления, умением привлекать людей к работе, организовывать коллективную деятельность.

## 2. Системный анализ как метод принятия и обоснования решений

По мере усложнения производственных процессов, развития науки, проникновения в тайны функционирования и развития живых организмов появились проблемы и задачи с большой начальной неопределенностью проблемной ситуации, которые не решаются с помощью формальных математических методов. В таких задачах все большее место стал занимать сам процесс постановки задачи, возросла роль человека, как носителя целостного восприятия, сохранения целостности при расчленении проблемы для облегчения её решения, роль методов активации интуиции и опыта специалистов различных областей знаний, принимающих участие в решении сложной проблемы.

На рубеже XX и XXI вв. стало очевидно, что человечество переходит от одной эпохи мышления и деятельности к другой – от века «анализа и синтеза» к «веку систем». Появилась концепция третьей грамотности – системной (первая – общая, вторая – компьютерная).

Наиболее конструктивным из направлений системных исследований в настоящее время считается системный анализ, занимающийся приложением методов и моделей теории систем для принятия решений.

Системный анализ как дисциплина сформировался в результате возникновения необходимости исследовать и проектировать сложные системы, управлять ими в условиях неполноты информации, ограниченности ресурсов и дефицита времени. Системный анализ является дальнейшим развитием целого ряда дисциплин, таких как исследование операций, теория оптимального управления, теория принятия решений, экспертный анализ, теория организации эксплуатации систем и т. д. Для успешного решения поставленных задач системный анализ использует всю совокупность формальных и неформальных процедур. Перечисленные теоретические дисциплины являются базой и методологической основой системного анализа. Таким образом, *системный анализ – междисциплинарный курс, обобщающий методологию исследования сложных технических, природных и социальных систем.*

Под термином *системный анализ*, как правило, понимают:

– в узком смысле – *совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам (как исследование проблемы принятия решений в сложной системе)* или логически связанная совокупность теоретических и эмпирических положений из области математики, естественных наук и опыта разработки сложных систем, обеспечивающая повышение обоснованности решения конкретной проблемы;

– в широком смысле – *как синоним «системного подхода».*

Следует отметить, что в публикациях термин трактуется неоднозначно. Будем опираться на развернутое определение профессора В. Н. Волковой, на основе обобщения позиций различных исследователей.

***Системный анализ:***

1) применяется в тех случаях, когда задача (проблема) *не может быть сразу представлена и решена* с помощью формальных и математических методов, т. е. имеет место большая начальная неопределенность проблемной ситуации и многокритериальность задачи;

2) уделяет внимание процессу постановки задачи и *использует не только формальные методы, но и методы качественного анализа;*

3) опирается на основные понятия теории систем и философские концепции, лежащие в основе исследования общесистемных закономерностей;

4) помогает организовывать процесс коллективного принятия решений, объединения специалистов различных областей знаний;

5) для организации процесса исследования и принятия решений требует обязательной разработки методики системного анализа, определяющей последовательность этапов проведения анализа и метод их выполнения;

6) исследует процессы целеобразования и разработки средств работы с целями (в том числе занимается разработкой методик структуризации целей).

Первые четыре из приведенных особенностей характерны для всех направлений системных исследований, а две последние уточняют отличие системного анализа от других системных направлений.

*Основным методом системного анализа является расчленение большой неопределенности на более обозримые, лучше поддающиеся исследованию, при сохранении целостного (системного) представления об объекте исследования и проблемной ситуации.*

*Методологическая специфика системного анализа* заключается в том, что эта научная область использует методы формализованного представления систем, основываясь на методах качественного анализа.

*Основами системного анализа* считают *общую теорию систем и системный подход.*

Однако системный анализ заимствует у них лишь самые общие исходные представления и предпосылки. Методологический статус системного анализа весьма необычен: с одной стороны, он располагает детализированными методами и процедурами, почерпнутыми из современной науки и созданными специально для него, что ставит системный анализ в один ряд с другими прикладными направлениями современной методологии; с другой – в развитии системного анализа отсутствует тенденция к оформлению в строгую научную теорию. В системном анализе тесно переплетены элементы науки и практики. Поэтому далеко не всегда обоснование решений с помощью системного анализа связано с использованием строгих формализованных методов и процедур;



допускаются суждения, основанные на личном опыте и интуиции, необходимо лишь, чтобы это обстоятельство было ясно осознано.

В системном анализе система описывается, прежде всего, *системными объектами*, к которым относятся: *вход, выход, процесс, обратная связь, критерий и ограничение*.

*Входом* является то, изменение чего служит причиной изменения хода процесса. Выделяют два вида входов – *процессор* и *рабочий вход*. Под процессором понимается все то, что осуществляет «обработку», а под рабочим входом – все то, над чем осуществляется обработка.

*Выходом* является то, что определяет конечное состояние или результат процесса.

*Понятие процесса* является центральным в системном анализе. Различают три различных вида процесса:

*основной процесс* – преобразующий вход в выход;

*обратная связь* – производит сравнение заданного и фактического состояния, оценивает разницу между ними и вырабатывает решение, направленное на сближение заданного и фактического состояний выходов;

*ограничение* – устанавливается потребителем выхода системы и включает в себя определенную цель и принуждающие связи.

*Критерий* – правило или норма, позволяющие оценить эффективность системы, соответствие требуемого и достигаемого результатов.

*Центральной процедурой* в системном анализе является *построение обобщенной модели (или моделей), отображающей все факторы и взаимосвязи реальной ситуации*, которые могут проявиться в процессе осуществления решения. Системный анализ опирается на ряд прикладных математических дисциплин и методов, широко используемых в современной деятельности управления. К ним относятся:

- исследование операций;
- метод экспертных оценок;
- метод критического пути;
- теория очередей и т. п.

*Техническая основа системного анализа* – современные компьютерные и информационные системы.

*Методологические средства, применяемые при решении проблем с помощью системного анализа*, определяются в зависимости от того, преследуется ли единственная цель или некоторая совокупность целей, принимает ли решение одно лицо или несколько и т. д.

Когда имеется одна, достаточно четко выраженная цель, степень достижения которой можно оценить на основе одного критерия, используются *методы математического программирования*. Если степень достижения цели должна оцениваться на основе нескольких критериев, то применяют *аппарат теории полезности*, с помощью которого проводится упорядочение критериев и определение важности каждого из них. Когда развитие событий определяется взаимодействием нескольких лиц или систем, из которых каждая преследует свои цели и принимает свои решения, используются *методы теории игр*.

Несмотря на то, что диапазон применяемых в системном анализе методов моделирования и решения проблем непрерывно растет, системный анализ по своему характеру не тождественен научному исследованию: он не связан с задачами получения научного знания в собственном смысле, он *представляет собой лишь применение методов науки к решению практических проблем управления и преследует цель рационализации процесса принятия решений*, не исключая из этого процесса неизбежных в нем субъективных моментов.

*Центральной проблемой системного анализа является проблема принятия решения.* Применительно к задачам исследования, проектирования и управления сложными системами проблема принятия решения связана с выбором определённой альтернативы в условиях различного рода неопределённости. Неопределённость обусловлена многокритериальностью задач оптимизации, неопределённостью целей развития систем, неоднозначностью сценариев развития системы, недостаточностью априорной информации о системе, воздействием случайных факторов в ходе динамического развития системы и прочими условиями.

Учитывая данные обстоятельства, *системный анализ можно определить как дисциплину, занимающуюся проблемами принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы.*

### **3. Системный подход как методология системного анализа**

Системный анализ *ставит своей целью исследование новых связей и отношений объектов и явлений.* Но, тем не менее, основной проблемой науки является исследование связей и отношений таким образом, чтобы изучаемые объекты стали бы более управляемыми, изучаемыми, а «вскрытый» в результате исследования механизм взаимодействия этих объектов – более применимым к другим объектам и явлениям. Задачи и принципы *системного подхода* не зависят от природы объектов и явлений.

Если говорят о *предметной области* как разделе науки, изучающем предметные аспекты системных процессов и системные аспекты предметных процессов и явлений, то это определение можно считать системным определением предметной области.

*Системный анализ* – совокупность понятий, методов, процедур и технологий для изучения, описания, реализации явлений и процессов различной природы и характера, междисциплинарных проблем; это совокупность общих законов, методов, приемов исследования таких систем.

*Системный анализ* – методология исследования сложных, часто не вполне определенных, проблем теории и практики.

Различают три ветви науки, изучающие системы:

1. *Системологию* (теорию систем) которая изучает теоретические аспекты и использует теоретические методы: теория информации, теория вероятностей, теория игр и др.;

2. *Системный анализ* (методологию, теорию и практику исследования систем), которая исследует методологические, а часто и практические аспекты, использует практические методы: математическая статистика, исследование операций, программирование и др.;

3. *Системотехнику* – практику и технологию проектирования и исследования систем.

Общим у всех этих ветвей является *системный подход*, системный принцип исследования – *рассмотрение изучаемой совокупности не как простой суммы составляющих (линейно взаимодействующих объектов), а как совокупности нелинейных и многоуровневых взаимодействующих объектов*, что особенно важно при исследовании поведения сложнейших технологических процессов.

*Системный подход* является направлением методологии специально-научного познания, в основе которого лежит исследование объектов как систем.

*Системный подход* занимает одно из ведущих мест в научном познании. Предпосылкой его проникновения в науку явился переход к новому типу научных задач:

- в целом ряде отраслей науки центральное место начинают занимать проблемы организации и функционирования сложных объектов;
- познание начинает оперировать системами, границы и состав которых далеко не очевидны и требуют специального исследования в каждом отдельном случае.

Изменение типа научных и практических задач, возникающих в современном мире, *сопровождается появлением общенаучных и специально-научных концепций*, для которых характерно использование в той или иной форме основных идей системного подхода, например:

- в учении В. И. Вернадского о биосфере и ноосфере научному познанию предложен новый тип объектов – глобальные системы;
- выделение особого класса систем – информационных и управляющих – послужило фундаментом возникновения кибернетики;
- в биологии системные идеи используются в экологических исследованиях, при изучении высшей нервной деятельности, в анализе биологической организации;
- в экономической науке принципы системного подхода получили распространение, особенно в связи с задачами оптимального экономического планирования, которые требуют построения многокомпонентных моделей социальных систем разного уровня;
- в практике управления идеи системного подхода конкретизируются в методологических средствах системного анализа.

*Системный подход не существует в виде строгой методологической концепции*, он выполняет свои эвристические функции, *оставаясь не очень жестко связанной совокупностью познавательных принципов*, основной смысл которых состоит в соответствующей ориентации конкретных исследований.

*Позитивная роль системного подхода* может быть сведена к следующим основным моментам:

1. Понятия и принципы системного подхода *выявляют более широкую познавательную реальность* по сравнению с той, которая фиксировалась в научном познании раньше.

2. Системный подход *содержит в себе новую схему объяснения*, в основе которой лежит поиск конкретных механизмов целостности объекта и выявление достаточно точной типологии его связей. Реализация этой функции обычно сопряжена с большими трудностями: для действительно эффективного исследования мало зафиксировать наличие в объекте разнотипных связей, необходимо еще представить это многообразие в операциональном виде, т. е. изобразить различные связи как логически однородные, допускающие непосредственное сравнение и сопоставление.

3. Из тезиса о многообразии типов связей объекта следует, что *сложный объект допускает не одно, а несколько расчленений*.

При этом критерием обоснованного выбора наиболее адекватного расчленения может служить то, *насколько в результате удастся построить операциональную «единицу» анализа*, позволяющую фиксировать целостные свойства объекта, его структуру и динамику.

#### **4. Системный подход к процессу принятия решений. Система предпочтений ЛПР**

Процесс принятия решения состоит в выборе рационального решения из некоторого множества альтернативных решений с учетом системы предпочтений ЛПР. Всякий процесс, в котором участвует человек, имеет две стороны: *объективную и субъективную*.

*Объективная сторона* – это то, что реально вне сознания человека, а *субъективная* – это то, что находит отражение в сознании человека, т. е. объективное в сознании человека. Объективное отражается в сознании человека не всегда достаточно адекватно, однако отсюда не следует, что не может быть правильных решений. Практически верным считается такое решение, которое в главных чертах правильно отражает обстановку и соответствует поставленной задаче.

*Система предпочтений ЛПР определяется многими факторами:*

- понимание проблемы и перспектив развития;
- текущая информация о состоянии некоторой операции и внешние условия ее протекания;
- директивы от вышестоящих инстанций и различного рода ограничения;
- юридические, экономические, социальные, психологические факторы, традиции и др.

Взаимозависимость этих факторов и их влияние на ЛПР можно представить в виде следующей схемы (рис. 1).



## 5. Системность как всеобщее свойство материи

Системность не должна казаться неким нововведением, последним достижением науки. *Системность есть всеобщее свойство материи*, форма ее существования, а значит, и неотъемлемое свойство человеческой практики, включая мышление. Всякая деятельность может быть менее или более системной.

*Появление проблемы – признак недостаточной системности; решение проблемы – результат повышения системности.*

Теоретическая мысль на разных уровнях абстракции отражала системность мира вообще и системность человеческого познания и практики.

На философском уровне – это диалектический материализм.

На общенаучном – системология и общая теория систем, теория организации.

На естественно-научном – кибернетика. С развитием вычислительной техники возникли информатика и искусственный интеллект.

Рассмотрим схему, представляющую системность как всеобщее свойство материи (рис. 2).

*Системность практической деятельности.* По отношению, например, к человеческой деятельности указанные признаки очевидны, поскольку каждый из нас легко обнаружит их в своей собственной практической деятельности. Всякое наше осознанное действие преследует вполне определенную цель; во всяком действии легко увидеть его составные части, более мелкие действия. При этом составные части выполняются не в произвольном порядке, а в определенной их последовательности. Это и есть определенная, подчиненная цели взаимосвязанность составных частей, которая и является признаком системности.

*Системность и алгоритмичность.* Другое название для такого построения деятельности – алгоритмичность. Понятие алгоритма возникло сначала в математике и означало задание точно определенной последовательности однозначно понимаемых операций над числами или другими математическими объектами. В последние годы начинает осознаваться алгоритмичность любой деятельности. Уже говорят не только об алгоритмах принятия управленческих решений, об алгоритмах обучения, алгоритмах игры в шахматы, но и об алгоритмах изобретательства, алгоритмах композиции музыки. Подчеркнем, что при этом отходят от математического понимания алгоритма: сохраняя логическую последовательность действий, допускают, что в алгоритме могут присутствовать неформализованные действия. Таким образом, явная алгоритмизация любой практической деятельности является важным свойством ее развития.

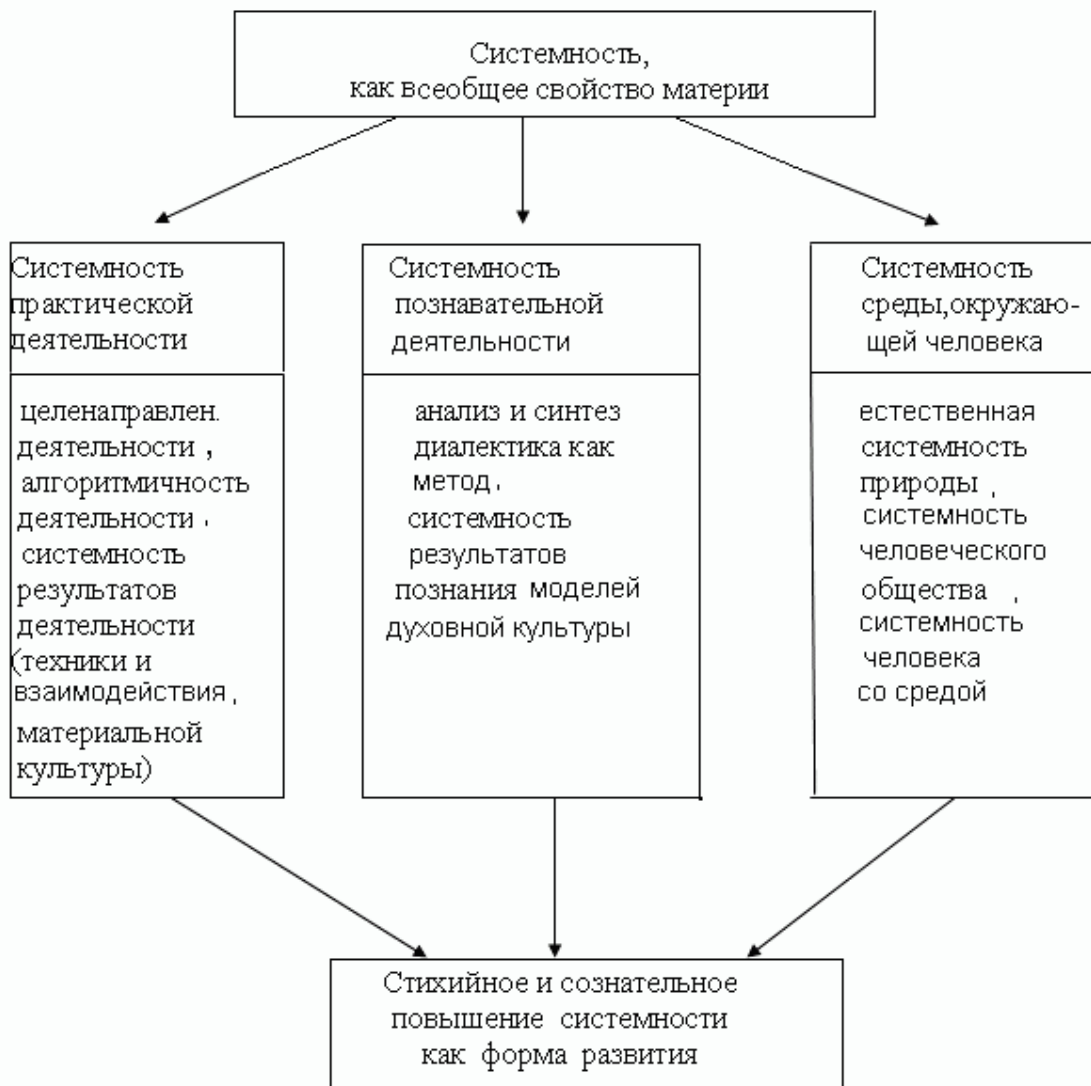


Рис. 2. Системность как всеобщее свойство материи

*Системность познавательной деятельности.* Одна из особенностей познания – наличие аналитического и синтетического образов мышления. Суть анализа состоит в разделении целого на части, в представлении сложного в виде совокупности более простых компонент. Но чтобы познать целое, сложное, необходим и обратный процесс – синтез. Это относится не только к индивидуальному мышлению, но и к общечеловеческому знанию. Расчлененность мышления на анализ и синтез и взаимосвязанность этих частей являются важнейшим признаком системности познания.

*Системность как всеобщее свойство материи.* Здесь важно выделить ту мысль, что системность – это не только свойство человеческой практики, включающей и внешнюю активную деятельность, и мышление, но свойство всей материи. Системность нашего мышления вытекает из системности мира. Современные научные данные и современные системные представления позволяют говорить о мире как о бесконечной иерархической системе систем, находящихся в развитии и на разных стадиях развития, на разных уровнях системной иерархии.

## Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте этапы развития системных представлений.
2. Понятие системного анализа в узком и широком смысле.
3. Дайте развернутое определение системного анализа на основе обобщения позиций различных исследователей.
4. Основной метод и методологическая специфика системного анализа.
5. Что является основами системного анализа?
6. Какие объекты относятся к системным объектам? Дайте характеристику этих объектов.
7. В чем заключается центральная процедура системного анализа? Что является технической основой системного анализа?
8. Каким образом определяются методологические средства, применяемые при решении проблем с помощью системного анализа?
9. Назовите и характеризуйте три ветви науки, изучающие системы.
10. Дайте характеристику системного подхода.
11. В чем заключается позитивная роль системного подхода?
12. Какими факторами определяется система предпочтений ЛПР?
13. Какие процедуры реализуются при системном подходе к процессу принятия решений?
14. Что является признаком недостаточной системности и результатом ее повышения?
15. В чем проявляется системность как всеобщее свойство материи?



## ЛЕКЦИЯ № 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

1. Определения системы. Задание системы аксиомами.
2. Классификация систем.
3. Понятия, характеризующие строение системы.
4. Понятия, характеризующие функционирование и развитие системы.

### 1. Определения системы. Задание системы аксиомами

#### 1.1. Определения системы

Термин «система» используют для характеристики исследуемого или проектируемого объекта как некоторого целого, сложного образования, о котором невозможно сразу дать представление, показав его, изобразив графически или описав математическим выражением.

Единого определения системы нет. Исследователи в разных предметных областях формулируют понятие системы, в наибольшей степени удовлетворяющее конкретным задачам исследования. Вероятно, нет необходимости стремиться к однозначности, и *следует признать систему «открытым понятийным объектом», непрерывно развивающимся*, не определяемым исчерпывающим образом в рамках каких бы то ни было логических и формальных построений.

Существует несколько десятков определений, таких, например, как:

- система есть *совокупность (множество) элементов*, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство;
- система есть *средство, с помощью которого выполняется процесс решения проблемы*;
- система – *множество объектов вместе с соотношениями между объектами и между их атрибутами* (А. Холл, Р. Фейджин);
- система – *организованное или сложное целое, собрание или сочетание вещей или частей, образующих сложное или единое целое* (Ф. Каст);
- система есть *абстрактный (языковой) аналог реального объекта или явления* (А. И. Берг, Ю. И. Черняк);
- под целостной системой понимается *совокупность компонентов, взаимодействие которых порождает новые (интегральные, системные) качества, не присущие ее образующим* (В. Г. Афанасьев);
- система – это *объективное единство закономерно связанных друг с другом предметов, явлений, знаний о природе и обществе* (В. П. Боголепов).

Вычленив из многообразия формальных определений суть, можно сделать следующий вывод: *система есть некий целостный комплекс взаимосвязанных элементов, объединенных общностью цели и образующих особое единство с окружающей средой.*

Возникает вопрос, как выделить этот комплекс элементов, входящих в систему, из окружающей среды? Следует отметить, что *выделение системы из окружающей среды* является одной из первых задач системного анализа.

Для *выделения системы* необходимы:

- объект исследования;
- цель, для реализации которой формируется система;
- субъект наблюдения («наблюдатель»), формирующий систему;
- входные и выходные переменные, отражающие взаимосвязь системы с окружающей средой.

Границы системы весьма условны, они диктуются конкретной задачей исследования. Частным случаем выделения системы является определение ее через входы и выходы, т. е. фактически представление системы в виде черного ящика.

Понятие «система» носит субъективный характер. *Система не существует объективно* – она такая, какой ее определил субъект наблюдения в соответствие с поставленной целью. Это связано, в частности, и с субъективностью целеполагания. Нельзя говорить об анализе любого объекта как системы, не определив цели анализа.

Система обладает новыми интегральными качествами, которые отсутствуют у ее компонентов. При этом нужно учитывать, что:

- каждый элемент, входящий в систему, сам по себе может рассматриваться как система, состоящая из элементов другого типа, то есть системы обычно представляют собой иерархическую структуру;
- взаимосвязи между элементами системы могут меняться во времени, в соответствии с ходом выполнения возложенных на эти элементы функций.

Существует также *аксиоматическое задание системы*, включающее в себя три аксиомы:

Аксиома 1. Для системы определены – *пространство состояний*, в которых может находиться система, и *параметрическое пространство*, в котором задано поведение системы (в качестве параметрического пространства обычно рассматривают временной интервал).

Аксиома 2. Пространство состояний  $M$  содержит не менее двух элементов.

Аксиома 3. Система обладает свойством функциональной эмерджентности.

*Эмерджентность* (целостность) – это такое свойство системы  $S$ , которое принципиально не сводится к сумме свойств элементов, составляющих систему, и не выводится из них.

Обобщая перечисленные подходы к определению системы, будем считать системой *совокупность взаимосвязанных элементов*, обладающую интегративными свойствами (эмерджентностью), а также *способ отображения* реальных объектов.

В системном анализе также используются такие понятия как «Модель исходной системы» и «Представление системы».

*Модель исходной системы (прототипа)* – система, отражающая по определенным законам свойства исходной системы.

*Представление системы* – совокупность базисных множеств (частей, элементов, компонентов) системы, которые взаимосвязаны рядом отношений, удовлетворяющих правилам (аксиомам) сочетания как элементов множеств, так и самих отношений. Это формальное определение системы фактически сводится к определению соответствующей математической модели, то есть содержит необходимую основу для формализации.

На разных этапах представления объекта в виде системы, в различных конкретных ситуациях можно пользоваться различными определениями. По мере уточнения представлений о системе должно уточняться и определение системы. Например, в организационных системах, если не определить лицо, компетентное принимать решения, то можно и не достичь цели, ради которой создается и исследуется система. Но есть системы, для которых наблюдатель очевиден.

*Таким образом, при проведении системного анализа* нужно отобразить ситуацию, с помощью как можно более полного определения системы, а затем, выделив наиболее существенные компоненты, влияющие на принятие решения, сформировать «рабочее определение», которое может расширяться, уточняться или сужаться в зависимости от хода анализа.

## **1.2. Свойства системы**

К основным свойствам системы относят:

- *взаимосвязь среды и системы;*
- *целостность (эмерджентность) системы,* под которой понимают внутреннее единство системы и принципиальную несводимость ее свойств к сумме свойств ее элементов;
- *членимость* – свойство системы разделяться на подсистемы, являясь одновременно подсистемой некоторой другой системы;
- *устойчивость* – способность системы удерживать равновесное (устойчивое) состояние при наличии дестабилизирующих факторов;
- *информационное взаимодействие элементов системы* – определяется наличием каналов связи и материальной наполненностью их носителями информации;
- *иерархичность* – существование в системе нескольких уровней, подчиненных по нисходящей, со своими зонами ответственности, ресурсами и локальными целями;
- *наличие обратных связей* – свойство, предполагающее информационное взаимодействие выхода системы со входом;
- *эквивинальность* – характеристика, отражающая предельные возможности системы, ее способность достигать состояния, которое не зависит от времени и начальных условий, а определяется исключительно параметрами системы.

## 2. Классификация систем

Многообразие систем довольно велико и существенную помощь при их изучении оказывает классификация. Можно дать следующее определение понятию классификация.

*Классификация* – распределение совокупности объектов на классы по некоторым, наиболее существенным признакам.

Сама классификация выступает в качестве инструмента системного анализа. Отнесение системы к определенному классу предполагает наличие у системы некоторых свойств, которых нет у систем другого класса.

Единой классификации систем в настоящее время нет. Разные авторы предлагают разные принципы классификации, а сходным по сути дают разные названия. Рассмотрим некоторые критерии классификации (рис. 3).

*По характеру природы и основному назначению системы делятся на два класса материальные и абстрактные.*



Рис. 3. Классификация систем

*Материальные (реальные) системы* – это системы, объективно существующие в реальном мире. В свою очередь они также делятся на два класса:

- 1) *естественные* – системы самой природы, к которым относятся:
  - неживые – вид физических систем неорганической природы;

– живые – вид биологических систем;

2) *искусственные* – системы, создаваемые деятельностью людей, среди которых выделяют:

– *техничко-технологические* – вид систем, включающий системы целевого назначения и системы, управляющие ими в соответствии с определенной технологией;

– *социальные* – вид различных систем человеческого общества, в том числе системные программы.

*Абстрактные системы* – продукт мышления, то есть результат отражения реальных систем в сознании людей. Среди них различают два класса систем:

1) *генерирующие* – системы обобщающего отражения реальной действительности, в которых выделяют:

– *понятийные* – вид концептуальных систем (теории, методологические построения, включая математические);

– *знаковые* – как вид семиотических систем. Семиотика представляет собой отрасль знания, которая изучает знаки и знаковые системы. Она возникла на стыке нескольких дисциплин – психологии, биологии, кибернетики, литературы, а также социологии.

2) *непосредственного отражения* – системы, отражающие определенные свойства (аспекты) конкретных реальных систем. В этом классе два вида:

– *математические модели*;

– *логико-эвристические модели*. Эвристика (от древнегреческого εὐρίσκω – «отыскиваю», «открываю») – совокупность логических приемов, методов и правил, облегчающих и упрощающих решение познавательных, конструктивных, практических задач. Эвристика – это момент открытия нового, а также методы, которые используются в процессе этого открытия.

*Логико-эвристические методы* предполагают рассмотрение постепенного расчленения проблемы на отдельные подвопросы до таких элементарных действий, для которых уже известны эмпирические решения. Например, метод дерева решений, метод мозгового штурма, теоретико-игровой метод.

В рассмотренной классификации многие системы можно назвать гибридными (смешанными), поскольку они занимают промежуточное положение между указанными классами систем.

Например, человека можно рассматривать как биосоциальную систему, а вычислительный комплекс – как социально-техническую систему.

Существуют и другие подходы к классификации систем, например, по таким признакам, как:

– *по характеру поведения* – детерминированные, вероятностные, игровые;

– *по степени целеустремленности* – открытые и закрытые;

– *по сложности структуры и поведения* – простые и сложные;

– *по виду научного направления, используемого для их моделирования*, – математические, физические, химические и др.;

– по степени организованности – хорошо организованные, плохо организованные, самоорганизующиеся;

– по степени централизации – централизованные и децентрализованные; (*централизованной системой* называется система, в которой некоторый элемент играет главную доминирующую роль в функционировании системы; *децентрализованная система* – система, в которой нет главного элемента);

– по размерности – одномерные и многомерные. Система, имеющая один вход и один выход, называется одномерной. Если входов и выходов больше одного – *многомерной*;

– по однородности и разнообразию структурных элементов системы делятся на гомогенные (однородные) и гетерогенные (разнородные), а также системы смешанного типа.

В *гомогенных системах* структурные элементы системы достаточно однородны, т. е. обладают в некотором приближении одинаковыми свойствами. В связи с этим в гомогенных системах элементы взаимозаменяемы. Понятие «гомогенная система» широко используется при описании свойств газов, жидкостей или популяций организмов. В гомогенной системе возможно добавление или изъятие нескольких элементов, как правило, без существенного изменения свойств системы.

*Гетерогенные системы* состоят из разнородных элементов, не обладающих свойством взаимозаменяемости. Изъятие даже одного элемента или его введение приводит к существенному изменению свойств системы, вплоть до ее гибели.

*Линейные и нелинейные системы.* Система называется линейной, если она описывается линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными, интегральными и т. п.). Для линейных систем справедлив принцип суперпозиции. Суть данного принципа состоит в том, что реакция системы на любую комбинацию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий, поданных на эту систему порознь. Если принцип суперпозиции для системы не выполняется, то система является нелинейной. Большинство сложных систем являются нелинейными;

*Большие и сложные системы.* Понятие большой системы связывают со словом «много»: много элементов, много связей, много исследователей. Единого определения понятия «сложной системы» нет, так же как нет и четкой границы, отделяющей простые системы от сложных. В различных работах рассматривают системы, сложные по числу элементов, целей, аспектов, структурной и функциональной сложности.

### 3. Понятия, характеризующие строение системы

*Элемент* – это понятие является одним из фундаментальных в общей теории систем. Оно происходит от латинского слова «elementarius» и имеет смысл: начальный, простой, простейший, неделимый, лежащий в основе чего-либо.

Под элементом принято понимать простейшую, неделимую часть системы. Поскольку деление системы на части зависит от цели рассмотрения объекта как системы, от точки зрения на него или от аспекта изучения, то элемент можно рассматривать как предел деления системы в контексте решения конкретной задачи и достижения поставленной цели.

В различных источниках приводятся разные определения понятия элемент.

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

*Элемент* – это наименьшая функциональная часть исследуемой системы, представляемая как «черный ящик».

*Подсистема* – 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 путем последовательного расчленения на подсистемы. Такое расчленение, как правило, производится на основе определения независимой функции, выполняемой данной совокупностью элементов совместно для достижения некой 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 которых является элемент.

Описание подсистемы в целом совпадает с описанием элемента. Но для описания подсистемы дополнительно вводится понятие множества внутренних (собственных) характеристик подсистемы.

*Характеристика* – то, что отражает некоторое свойство элемента системы. Характеристика  $x_j$  задается кортежем, включающим в себя имя характеристики и область допустимых значений. *Характеристики делятся на количественные и качественные.*

*Связью* называют важный для целей рассмотрения обмен между элементами (веществом, энергией, информацией).

Понятие связи между элементами входит в любое определение системы и обеспечивает возникновение и сохранение ее целостных свойств. Связь выступает как ограничение степени свободы элементов. Элементы, вступая во взаимодействие (связь) друг с другом, утрачивают часть своих свойств, которыми они потенциально обладали в свободном состоянии. В определениях системы термины связь и отношение используются как синонимы.

*Различают следующие связи:*

1-го порядка – функционально необходимые;

2-го порядка – улучшающие действие системы, но не являющиеся функционально необходимыми;

3-го порядка – излишние или противоречивые.

Связи характеризуются направлением, силой, характером (видом).

*Простейшие типы связей:* с последовательным соединением элементов, с параллельным соединением элементов и обратная связь.

Обратная связь означает, что результат функционирования элемента влияет на поступающие на него воздействия. Как правило, обратная связь выступает важным регулятором в системе.

*Большой системой* называют систему, включающую значительное число однотипных элементов и однотипных связей.

*Сложной системой* называют систему, состоящую из элементов разных типов и обладающую разнородными связями между ними.

Различия между системой, большой системой и сложной системой являются условными.

*Структурой системы* называется ее разделение на группы элементов с указанием связей между ними, дающее представление о системе в целом. Структура характеризует организованность системы, устойчивую упорядоченность ее элементов и связей.

#### **4. Понятия, характеризующие функционирование и развитие системы**

К понятиям, характеризующим функционирование и развитие системы, относятся:

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

Целенаправленное вмешательство в процесс в системе называется *управлением*.

*Показатель* – характеристика, отражающая качество системы или целевую направленность процесса, реализуемого системой.

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

Если система способна переходить из одного состояния в другое, то говорят, что она обладает *поведением*. Изменение состояния и зависимости от конкретных задач исследования систем интерпретируется как движение, поведение, функционирование или некоторый процесс в системе.



*Равновесие* – способность системы в отсутствие внешних возмущающих воздействий (или при постоянных воздействиях) сохранять свое состояние сколь угодно долго. Это состояние называется состоянием равновесия.

*Устойчивость* – способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она была из него выведена под влиянием внешних или внутренних возмущающих воздействий. Эта способность обычно присуща системам, когда воздействия на нее не превышают некоторого предела.

*Процессом* называется совокупность состояний системы, соответствующих упорядоченному непрерывному или дискретному изменению некоторого параметра, определяющего свойства системы.

*Эффективность процесса* – это степень его приспособленности к достижению цели. Эффективность проявляется только при функционировании и зависит от свойств самой системы, способа ее применения и от воздействий внешней среды.

*Критерий эффективности* – обобщенный показатель и правило выбора лучшей системы или лучшего решения.

Система, состояние которой изменяется во времени под воздействием определенных причинно-следственных связей, называется *динамической системой*. Все материальные системы – динамические.

*Динамической математической моделью* называется модель, раскрывающая причинно-следственные связи, которые определяют развивающийся во времени процесс перехода системы из одного состояния в другое. Состояние динамической системы является элементом некоторого пространства состояний, задающим для определенного момента времени минимум сведений, которые необходимы для полного описания поведения динамической системы в будущем при полном задании входных воздействий.

*Кинематической моделью* динамической системы называется модель, описывающая изменение во времени состояния системы или некоторой функции состояния без раскрытия причинно-следственных связей, которые вызывают это изменение.

*Статической* называется *система*, состояние которой во времени не изменяется. Состояние такой системы вводится в результате фиксации определенного состояния динамической системы или на основе некоторой идеализации.

*Статической моделью* называется модель, описывающая связи между компонентами и другими характеристиками системы в условиях равновесия и других условиях «моратория» изменения состояния.

Математические модели систем делятся:

- в зависимости от мощности множества (т. е. количества самих элементов) на конечные системы и системы с бесконечным множеством состояний;
- в зависимости от размерности пространства состояний (количества компонентов элементов этого пространства) – на конечномерные (n-мерные) и бесконечномерные (счетномерные и несчетномерные) системы.

## Контрольные вопросы

1. Что необходимо для выделения системы?
2. Назовите аксиомы, используемые для задания системы.
3. Что такое эмерджентность?
4. Обобщенное понятие системы.
5. Поясните понятия «модель исходной системы» и «представление системы».
6. Назовите и поясните основные свойства системы.
7. Назовите и поясните классы материальных систем.
8. Назовите и поясните классы абстрактных систем.
9. Дайте определение элемента, запишите и поясните его функциональную модель.
10. Дайте определение и назовите возможные виды связи.
11. Дайте определение понятий большой, сложной системы и структуры системы.
12. Дайте определение понятий: цель, управление, показатель, поведение.
13. Дайте определение понятий: равновесие, устойчивость, процесс, критерий эффективности.
14. Дайте определение статической, динамической и кинематической моделей.
15. Как различаются математические системы в зависимости от мощности множества?
16. Как различаются математические системы в зависимости от размерности пространства состояний?

## ЛЕКЦИЯ № 3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

1. Системный анализ в структуре современных системных исследований.  
Принципы системного анализа.
2. Виды проблем, решаемых с помощью системного анализа.
3. Принципы решения неструктурированных проблем.
4. Принципы решения слабоструктурированных проблем.
5. Принципы решения хорошо структурированных проблем.
6. Системный подход к выявлению и решению проблем.

### 1. Системный анализ в структуре современных системных исследований. Принципы системного анализа

Процедуры и методы СА направлены на выдвижение альтернатив решения проблем, выявления масштабов неопределенности по каждой из них и сопоставление их по тем или иным критериям эффективности.

СА имеет своим предметом *изучение и моделирование объектов сложной природы (систем)*.

Чтобы лучше уяснить методологию системного анализа, *рассмотрим основные идеи, которые он использует*.

*Идея 1.* При изучении сложного объекта главное внимание уделяется внешним связям объекта с другими системами, а не его детальной внутренней структуре, хотя последнее не исключается, то есть системный анализ осуществляет *макроподход* к изучению объекта.

*Идея 2.* При изучении сложного объекта *приоритет отдается его целям и функциям*, из которых выводится структура (но не наоборот), т.е. системный анализ — это *подход функциональный*.

*Идея 3.* При решении проблем, связанных с системами, следует сопоставлять необходимое и возможное, желаемое и достижимое, эффект и имеющиеся для этого ресурсы. Иными словами, следует всегда учитывать, какую «цену» придется заплатить за получение требуемого результата.

*Идея 4.* При принятии решения в системах следует учитывать последствия решения для всех систем, которые оно затрагивает.

Обычно при исследовании или создании какой-то сложной системы возникают трудности:

- во-первых, мы должны сформулировать цель,
- во-вторых, описать систему с помощью набора определенных показателей,
- в-третьих, измерить и сопоставить эти показатели между собой так, чтобы появилась возможность сравнивать между собой различные варианты стратегий (способов достижения поставленных целей).

Перечисленные задачи не решаются однозначно, всегда имеется неопределенность выбора целей, показателей, схем их сравнения. Поэтому мы должны сначала представить систему в виде исследовательской модели. Сложность изучаемых систем привела к необходимости создания специальной

техники исследования, основанной на использовании аппарата имитации (воспроизведения) на ЭВМ математических моделей функционирования изучаемой системы. Среди задач, возникающих в связи с проектированием систем, важное место занимает проблема сочетания структурных и функциональных аспектов.

Системный анализ разрабатывает системную методологию решения сложных прикладных проблем, опираясь на принципы системного подхода и общей теории систем, развития и методологически обобщая концептуальный (идейный) и математический аппарат кибернетики, исследования операций и системотехники.

Остановимся на принципах системного анализа.

*Принцип оптимальности.* Задача заключается не в том, чтобы найти решение лучше существующего, а в том, чтобы найти самое лучшее решение из всех возможных.

*Принцип эмерджентности.* Чем больше система и чем больше различие в размерах между частью и целым, тем выше вероятность того, что свойства целого могут сильно отличаться от свойств частей. Не совпадение свойств отдельных частей системы со свойствами системы в целом.

*Принцип системности.* Предполагает исследование объекта, с одной стороны, как единого целого, а с другой – как части более крупной системы, в которой анализируемый объект находится с остальными системами в определенных отношениях.

*Принцип иерархии.* Тип структурных отношений в сложных многоуровневых системах, характеризуемых упорядоченностью, организованностью взаимодействий между отдельными уровнями по вертикали. Соблюдение иерархического построения сложных систем.

*Принцип интеграции.* Направлен на изучение интегративных свойств и закономерностей.

*Принцип формализации.* Нацелен на получение количественных и комплексных характеристик.

*Продуктивная формулировка базовых целей и задач.* Процесс принятия решений должен начинаться с выявления и четкого формулирования конечных целей.

*Принцип объективности.* Суть принципа состоит в том, что любые знания, любая информация об изучаемом объекте должны быть объективны.

*Принцип постоянной коррекции и эмпирического контроля.*

*Принцип единства анализа и синтеза.*

*Принцип приоритета конечной цели.* Цели отдельных частей не должны вступать в конфликт с конечными целями всей системы.

Перечисленные классические принципы системного анализа, носят, прежде всего, философский характер. Они постоянно развиваются, причем в разных направлениях.

## 2. Виды проблем, решаемых с помощью системного анализа

Согласно классификации, предложенной учеными Саймоном и Ньюэллом, все множество проблем, рассматриваемых в процессе системного анализа, в зависимости от глубины их познания, подразделяется на 3 класса:

1. *Хорошо структурированные* или количественно выраженные проблемы, которые поддаются математической формализации и решаются с использованием формальных методов;

2. *Неструктурированные* или качественно выраженные проблемы, которые описываются лишь на содержательном уровне и решаются с использованием неформальных процедур;

3. *Слабоструктурированные* (смешанные проблемы), которые содержат количественные и качественные проблемы, причем качественные, малоизвестные и неопределенные стороны проблем имеют тенденцию доминирования.

Эти проблемы решаются на основе комплексного использования формальных методов и неформальных процедур. За основу классификации взята степень структуризации проблем, причем структура всей проблемы определяется пятью логическими элементами:

- 1) цель или ряд целей;
- 2) альтернативы достижения целей;
- 3) ресурсы, расходуемые на реализацию альтернатив;
- 4) модель или ряд моделей;
- 5) критерий выбора предпочтительной альтернативы.

Степень структуризации проблемы определяется тем, насколько хорошо выделены и осознаны указанные элементы проблем.

Характерно, что одна и та же проблема может занимать различное место в таблице классификации. В процессе все более глубокого изучения, осмысления и анализа проблема может превратиться из неструктурированной в слабоструктурированную, а затем из слабоструктурированной в структурированную. При этом выбор метода решения проблемы определяется ее местом в таблице классификаций (рис. 4).

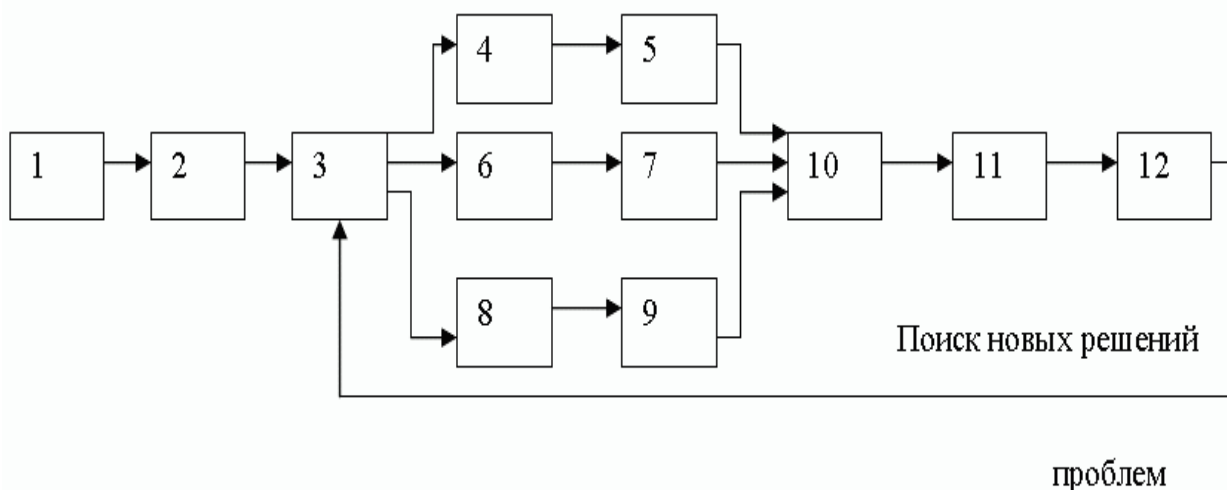


Рис. 4. Таблица классификаций:

1 – выявление проблемы; 2 – постановка проблемы; 3 – решение проблемы; 4 – неструктурированная проблема (может решаться с помощью эвристических методов); 5 – методы экспертных оценок; 6 – слабо структурированная проблема; 7 – методы системного анализа; 8 – хорошо структурированная проблема; 9 – методы исследования операций; 10 – принятие решения; 11 – реализация решения; 12 – оценка решения

### 3. Принципы решения неструктурированных проблем

*Для решения проблем этого класса целесообразно использовать методы экспертных оценок.*

Методы экспертных оценок применяются в тех случаях, когда математическая формализация проблем либо невозможна в силу их новизны и сложности, либо требует больших затрат времени и средств. Общим для всех методов экспертных оценок является обращение к опыту, указанию и интуиции специалистов, выполняющих функции экспертов. Давая ответы на поставленный вопрос, эксперты являются как бы датчиками информации, которая анализируется и обобщается. Можно утверждать, следовательно, что если в диапазоне ответов имеется истинный ответ, то совокупность разрозненных мнений может быть эффективно синтезирована в некоторое обобщенное мнение, близкое к реальности. Любой метод экспертных оценок представляет собой совокупность процедур, направленных на получение информации эвристического происхождения и обработку этой информации с помощью математико-статистических методов.

Процесс подготовки и проведения экспертизы включает следующие этапы:

- 1) определение целей экспертизы;
- 2) формирование группы специалистов-аналитиков;
- 3) формирование группы экспертов;
- 4) разработка сценария и процедур экспертизы;
- 5) сбор и анализ экспертной информации;

- 6) обработка экспертной информации;
- 7) анализ результатов экспертизы и принятия решений.

При формировании группы экспертов необходимо учитывать их индивидуальные характеристики, которые влияют на результаты экспертизы:

- компетентность (уровень профессиональной подготовки);
- креативность (творческие способности человека);
- конструктивность мышления (не «летать» в облаках);
- конформизм (подверженность влиянию авторитета);
- отношение к экспертизе;
- коллективизм и самокритичность.

Методы экспертных оценок применяются достаточно успешно в следующих ситуациях:

- выбор целей и тематики научных исследований;
- выбор вариантов сложных технических и социально-экономических проектов и программ;
- построение и анализ моделей сложных объектов;
- построение критериев в задачах векторной оптимизации;
- классификация однородных объектов по степени выраженности какого-либо свойства;
- оценка качества продукции и новой техники;
- принятие решений в задачах управления производством;
- перспективное и текущее планирование производства, НИР и ОКР;
- научно-техническое и экономическое прогнозирование и т. д.

#### **4. Принципы решения слабоструктурированных проблем**

Для решения проблем этого класса *целесообразно использовать методы системного анализа*. Проблемы, решаемые с помощью системного анализа, имеют ряд характерных особенностей:

- 1) принимаемое решение относится к будущему (Например, завод, которого пока нет);
- 2) имеется широкий диапазон альтернатив;
- 3) решения зависят от текущей неполноты технологических достижений;
- 4) принимаемые решения требуют больших вложений ресурсов и содержат элементы риска;
- 5) не полностью определены требования, относящиеся к стоимости и времени решения проблемы;
- 6) проблема внутренняя сложна вследствие того, что для ее решения необходимо комбинирование различных ресурсов.

*Основные концепции системного анализа состоят в следующем:*

- процесс решения проблемы должен начинаться с выявления и обоснования конечной цели, которой хотят достичь в той или иной области и уже на этом основании определяются промежуточные цели и задачи;

- к любой проблеме необходимо подходить, как к сложной системе, выявляя при этом все возможные подпроблемы и взаимосвязи, а также последствия тех или иных решений;
- в процессе решения проблемы осуществляется формирование множества альтернатив достижения цели;
- оценка этих альтернатив с помощью соответствующих критериев и выбор предпочтительной альтернативы;
- организационная структура механизма решения проблемы должна подчиняться цели или ряду целей, а не наоборот.

*Системный анализ* представляет собой многошаговый итеративный процесс, причем исходным моментом этого процесса является формулировка проблемы в некоторой первоначальной форме. При формулировке проблемы необходимо учитывать два противоречивых требования:

1. Проблема должна формулироваться достаточно широко, чтобы ничего существенного не упустить;

2. Проблема должна формироваться таким образом, чтобы она была обозримой и могла быть структурирована. В ходе системного анализа степень структуризации проблемы повышается, т. е. проблема формулируется все более четко и исчерпывающе. Один шаг системного анализа представлен на рисунке 5.

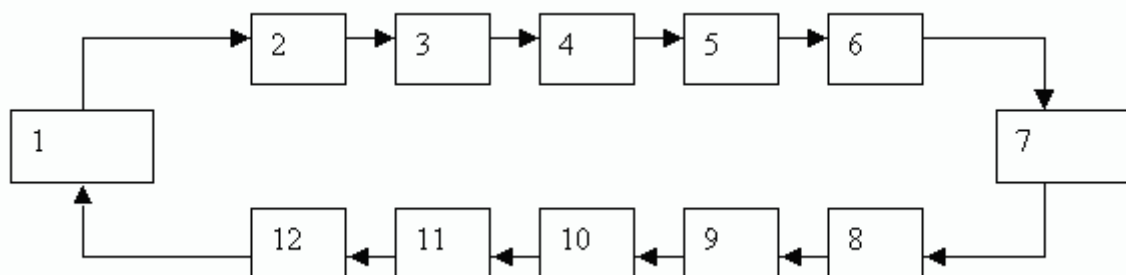


Рис. 5. Один шаг системного анализа:

1 – постановка проблемы; 2 – обоснование цели; 3 – формирование альтернатив; 4 – исследование ресурса; 5 – построение модели; 6 – оценка альтернатив; 7 – принятие решения (выбор одного решения); 8 – анализ чувствительности; 9 – проверка исходных данных; 10 – уточнение конечной цели; 11 – поиск новых альтернатив; 12 – анализ ресурсов и критериев

Для оценки применяют самые разнообразные, но локальные методы: экономические, технические, социальные, политические и другие.

## 5. Принципы решения хорошо структурированных проблем

Для решения проблем этого класса широко используются математические методы исследования операций (ИО). В операционном исследовании можно выделить основные этапы:



1. Определение конкурирующих стратегий достижения цели.
2. Построение математической модели операции.
3. Оценка эффективностей конкурирующих стратегий.
4. Выбор оптимальной стратегии достижения целей.

Модель позволяет оценить эффективность конкурирующих стратегий и выбрать из их числа оптимальную стратегию (рис. 6).

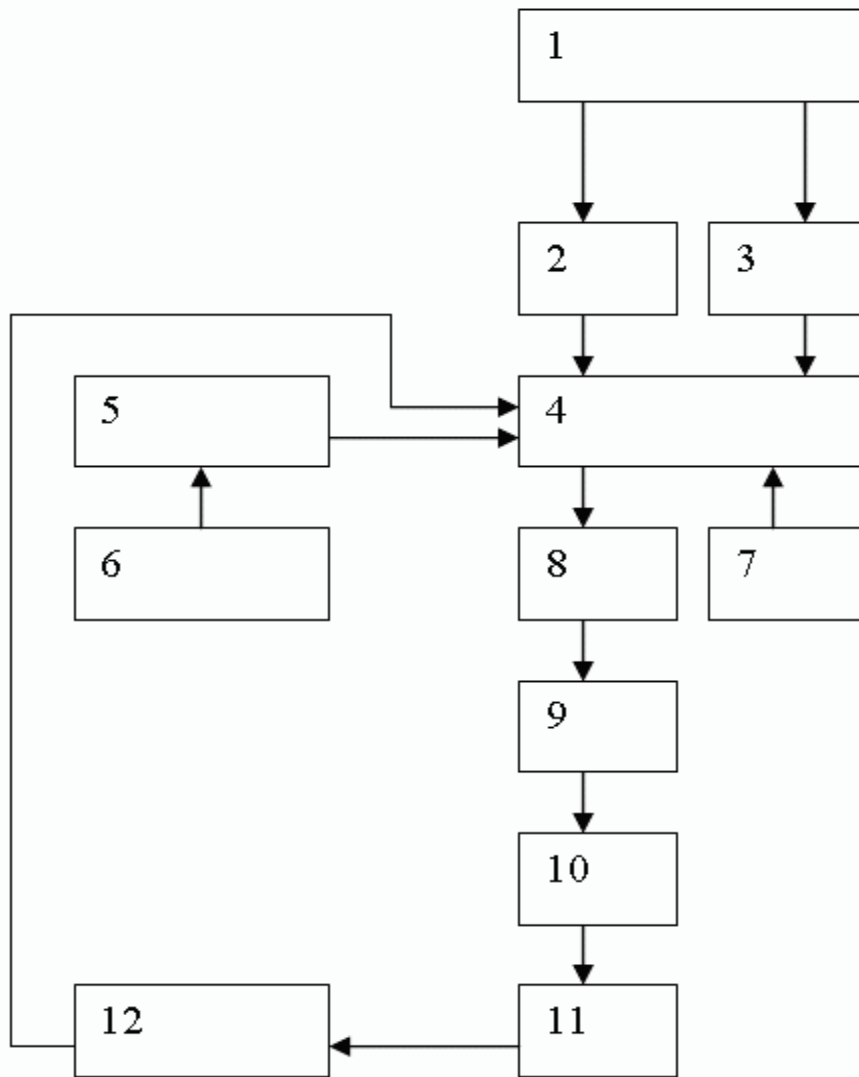


Рис. 6. Алгоритм решения хорошо структурированных проблем:  
 1 – постоянство проблемы; 2 – ограничения; 3 – критерий эффективности операций; 4 – математическая модель операции; 5 – параметры модели, но часть параметров, как правило, не известна, поэтому (6);  
 6 – прогнозирование информации (т. е. нужно предугадать ряд параметров);  
 7 – конкурирующие стратегии; 8 – анализ и стратегии; 9 – оптимальная стратегия; 10 – утвержденная стратегия (более простая, но которая удовлетворяет еще ряду критериев); 11 – реализация решения; 12 – корректировка модели

Критерий эффективности операции должен удовлетворять ряду требований:

1. Представительность, т. е. критерий должен отражать основную, а не второстепенную цель операции.
2. Критичность – т. е. критерий должен изменяться при изменении параметров операций.
3. Единственность, так как, только в этом случае возможно найти строгое математическое решение задачи оптимизации.
4. Учет стохастичности, которая связана обычно со случайным характером некоторых параметров операций.
5. Учет неопределенностей, которая связана с отсутствием какой-либо информации о некоторых параметрах операций.
6. Учет противодействия, которое вызывает часто сознательный противник, управляющий полными параметрами операций.
7. Простота, так как простой критерий позволяет упростить математические выкладки при поиске оптимального решения.

## 6. Системный подход к выявлению и решению проблем

В процессе функционирования реальной системы выявляется проблема, состоящая в несоответствии существующего положения – требуемому. Для решения проблемы проводится системное исследование, состоящее из *декомпозиции, анализа и синтеза*, позволяющее в результате снять проблему.

Системный подход к решению проблем может быть представлен в виде схемы цикла системного исследования (рис. 7).

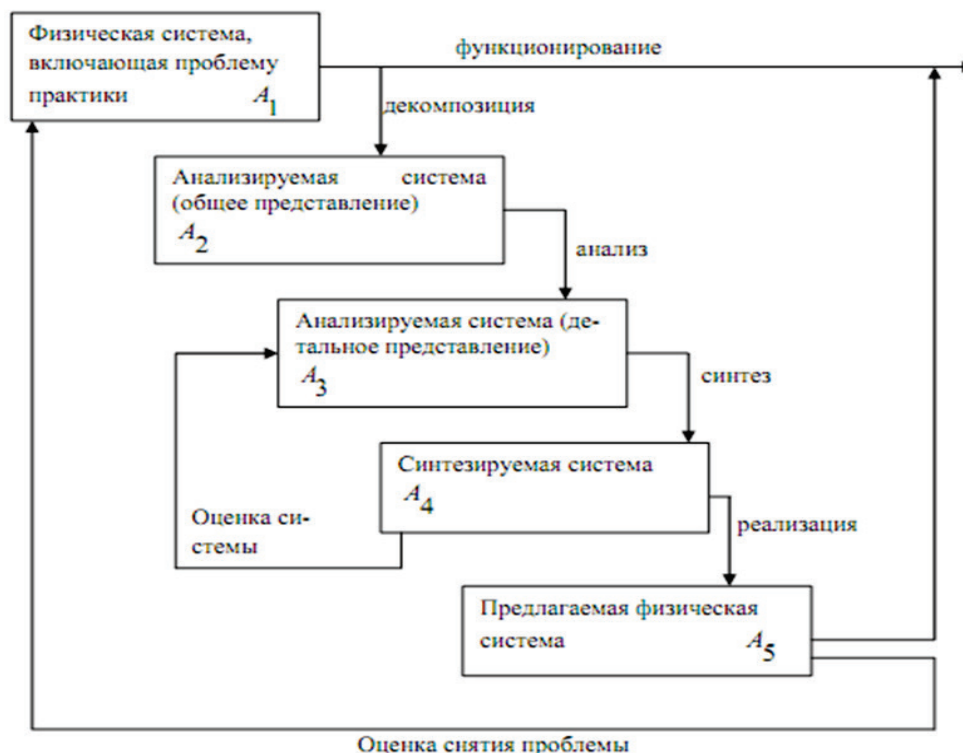


Рис. 7. Схема цикла системного исследования

Основные задачи (структура) системного анализа могут быть представлены в виде трехуровневого дерева функций системного анализа (рис. 8).

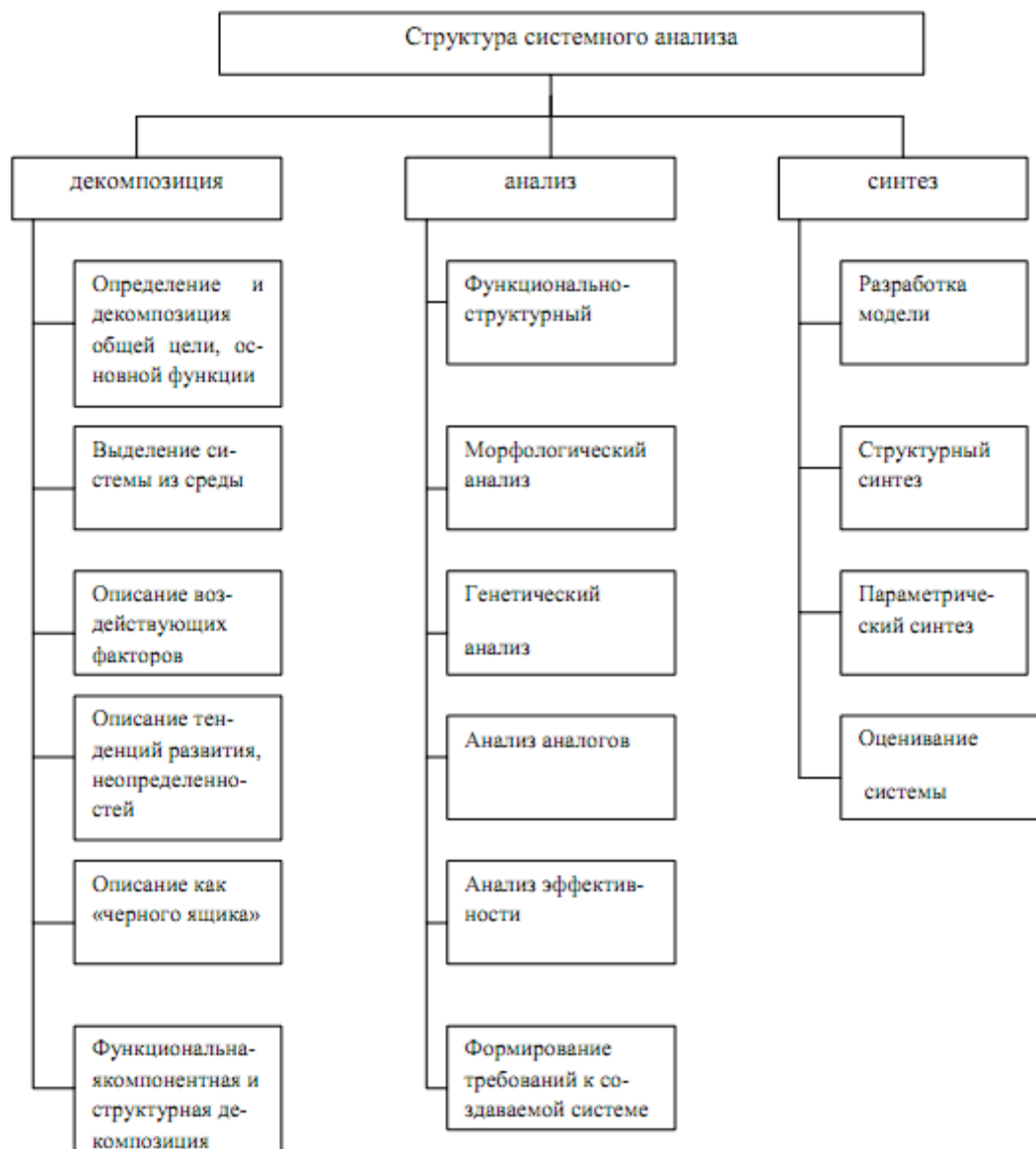


Рис. 8. Дерево функций системного анализа

Декомпозицией (структуризацией) системы называется деление системы на части, удобное для каких-либо операций с этой системой. Целью декомпозиции является упрощение системы, сложной для рассмотрения целиком.

Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций. Глубина декомпозиции ограничивается. В автоматизированных методиках типичной является декомпозиция модели на глубину 5 – 6 уровней. Декомпозиция прекращается, 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 «черного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции.

В общей теории систем доказано, что большинство систем могут быть декомпозированы на **базовые представления подсистем**. К ним относятся: последовательное, параллельное соединение элементов, а также соединение с помощью обратной связи.

*Наиболее часто применяемыми стратегиями декомпозиции являются:*

а) *функциональная декомпозиция* (базируется на анализе функций системы. Ставится вопрос: «что делает система?» независимо от того, как она работает);

б) *декомпозиция по жизненному циклу* (признак выделения подсистем – изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы «от рождения до гибели»);

в) *декомпозиция по физическому процессу* (признак выделения подсистем – шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний);

г) *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 т. п.)).

*Для описания всей системы должна быть построена составная модель, объединяющая все отдельные модели.*

*Анализ* – нахождение различного рода свойств системы или среды, окружающей систему.

На этапе анализа происходит *формирование детального представления системы* посредством осуществления:

1) *функционально-структурного анализа*, который включает в себя: уточнение состава и законов функционирования элементов, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание множества состояний  $Z$ , задание параметрического пространства  $T$ , анализ целостности системы, формирование требований к системе;

2) *морфологического анализа* – анализа взаимосвязи компонентов;

3) *генетического анализа* – анализа предыдущей истории, причин развития ситуации, тенденций, построение прогнозов;

4) *анализа аналогов*;

5) *анализа эффективности*, включающего выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственное оценивание и анализ полученных оценок;

6) *формирование требований к создаваемой системе* – выбор критериев оценки и ограничений.

Задача *синтеза системы* противоположна задаче анализа – *необходимо по описанию закона преобразования построить систему*, фактически выполняющую это преобразование по определенному алгоритму. В ходе синтеза осуществляется оценка анализируемой и синтезируемой системы. Реализация синтезированной системы в виде предлагаемой физической системы позволяет

провести оценку степени снятия проблемы практики и принять решение на функционирование модернизированной реальной системы.

Упрощенная функциональная диаграмма этапа синтеза системы, решающей проблему (рис. 9).

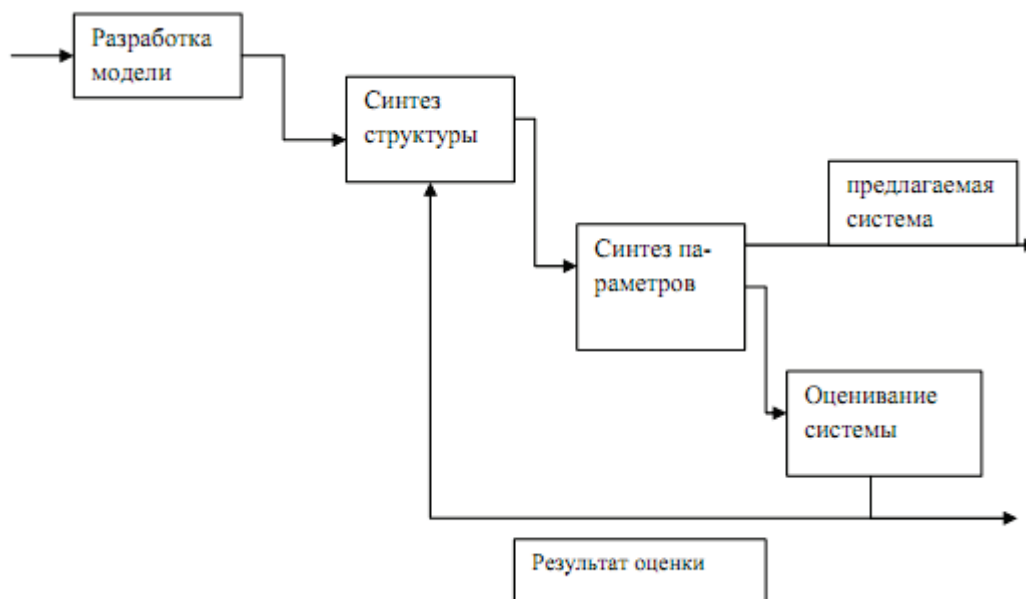


Рис. 9. Функциональная диаграмма этапа синтеза системы

*На этапе синтеза осуществляется:*

1) *разработка модели требуемой системы* (выбор математического аппарата; моделирование; оценка модели по критериям: адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей);

2) *синтез альтернативных структур системы, снимающий проблему;*

3) *синтез параметров системы, снимающий проблему;*

4) *обоснование вариантов синтезированной системы* (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка и анализ результатов оценивания, выбор наилучшего варианта).

### **Контрольные вопросы**

1. Идеи, используемые в методологии системного анализа.
2. Принципы системного анализа.
3. Виды проблем, решаемых с помощью системного анализа.
4. Как определяется степень структуризации проблем?
5. Какие методы и в каких ситуациях используются для решения неструктурированных проблем?
6. Какие методы используются для решения слабо структурированных проблем? Какие характерные особенности имеют эти проблемы?
7. В чем заключаются основные концепции системного анализа?
8. Какие методы используются для решения хорошо структурированных проблем?

9. Какие основные этапы выделяются в операционном исследовании?
10. Каким требованиям должен удовлетворять критерий эффективности операции?
11. Из каких этапов состоит системное исследование? Дайте краткую характеристику этих этапов.
12. Назовите и дайте характеристику наиболее часто применяемым стратегиям декомпозиции.
13. За счет выполнения каких действий происходит формирование детального представления системы на этапе анализа?
14. В чем заключается задача синтеза системы? Какие действия выполняются на этапе синтеза системы?

## ЛЕКЦИЯ № 4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ

1. Основные этапы и методы системного анализа.
2. Методы экспертных оценок.
3. Метод мозговой атаки (штурма).
4. Дельфийский метод.
5. Методы типа сценариев и дерева целей.
6. Морфологические методы.

### 1. Основные этапы и методы системного анализа

Системный анализ (СА) предусматривает *разработку системного метода решения проблемы, т. е. логически и процедурно организованную последовательность операций*, направленных на выбор предпочтительной альтернативы решения. СА реализуется практически в несколько этапов, однако в отношении их числа и содержания пока еще нет единства, т. к. имеется большое разнообразие прикладных проблем.

Можно выделить три основных этапа системного анализа:

- 1) построение модели исследуемого объекта;
- 2) постановка задачи исследования;
- 3) решение поставленной математической задачи.

*В научный инструментарий СА входят следующие методы:*

- метод сценариев (пытаются дать описание системы);
- метод дерева целей (есть конечная цель, она разбивается на подцели, подцели на проблемы и т. д., т. е. декомпозиция до задач, которые мы можем решить);
- метод морфологического анализа (для изобретений);
- методы экспертных оценок;
- вероятностно-статистические методы (теория массового обслуживания, теория игр и т. д.);
- кибернетические методы (объект в виде черного ящика);
- методы исследования операций;
- методы векторной оптимизации;
- методы имитационного моделирования;
- сетевые методы;
- матричные методы;
- методы экономического анализа и др.

Приведем таблицу, которая иллюстрирует основные закономерности СА трёх различных научных школ (таблица 1).

Таблица 1 – Основные закономерности СА трёх различных научных школ

Основные этапы системного анализа		
Ф. Хансман ФРГ, 1978 год	Д. Джеферс США, 1981 год	В. В. Дружинин СССР, 1988 год
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Общая ориентация в проблеме (эскизная постановка проблемы)</li> <li>2. Выбор соответствующих критериев</li> <li>3. Формирование альтернативных решений</li> <li>4. Выделение существенных факторов внешней среды</li> <li>5. Построение модели и ее проверка</li> <li>6. Оценка и прогноз параметров модели</li> <li>7. Получение информации на основе модели</li> <li>8. Подготовка к выбору решения</li> <li>9. Реализация и контроль</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выбор проблемы</li> <li>2. Постановка задачи и ограничение степени ее сложности</li> <li>3. Установление иерархии, целей и задач</li> <li>4. Выбор путей решения задачи</li> <li>5. Моделирование</li> <li>6. Оценка возможных стратегий</li> <li>7. Внедрение результатов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выделение проблемы</li> <li>2. Описание</li> <li>3. Установление критериев</li> <li>4. Идеализация (предельное упрощение, попытка построения модели)</li> <li>5. Декомпозиция (разбивка по частям, нахождения решений по частям)</li> <li>6. Композиция («склеивание» частей вместе)</li> <li>7. Принятие наилучшего решения</li> </ol>

В процессе СА на разных его уровнях применяются различные методы, в которых эвристика сочетается с формализмом. СА выполняет роль методологического каркаса, объединяющего все необходимые методы, исследовательские приемы, мероприятия и ресурсы для решения проблем.

#### *Классификация методов анализа систем*

Для анализа систем применяются методы двух типов: качественные методы и количественные.

К первому типу методов анализа сложных систем относятся методы активного применения опыта и интуиции специалистов:



- методы типа мозговой атаки или коллективной генерации идей;
- метод типа сценариев;
- метод экспертных оценок;
- метод типа Дельфи;
- морфологические методы;
- метод дерева целей и т. п.

*Качественные методы* используются на начальных этапах моделирования, если реальная система не может быть выражена в количественных характеристиках, отсутствует описание закономерностей систем в виде аналитических зависимостей. В результате такого моделирования разрабатывается *концептуальная модель системы*.

*Количественные методы* используются на последующих этапах моделирования для количественного анализа вариантов системы.

К *второму типу методов* относятся: аналитические, статистические, теоретико-множественные, логические графические методы и т. п.

Между этими крайними методами имеются и такие, с помощью которых стремятся охватить все этапы моделирования от постановки задачи до оценки вариантов, но для представления задачи оценивания привлекают разные исходные концепции и терминологию с разной степенью формализации. К ним относят:

- *кибернетический подход* к разработке систем управления, проектирования и принятия решений (который исходит из теории автоматического управления применительно к организационным системам);
- *информационно-гносеологический подход* к моделированию систем, основанный на общности процессов отражения, познания в системах различной физической природы;
- *структурный и объектно-ориентированные подходы* системного анализа;
- *метод ситуационного моделирования*;
- *метод имитационного динамического моделирования*.

Эти методы позволяют разрабатывать как концептуальные, так и строго формализованные модели, обеспечивающие требуемое качество оценки систем.

Во всех методах смысл задачи оценивания состоит в сопоставлении рассматриваемой системы (альтернативе) вектора из критериального пространства, координаты точек которого рассматриваются как оценки по соответствующим критериям.

Простейшей формой задачи оценивания является обычная задача измерения, когда оценивание есть сравнение с эталоном, а решение задачи находится путем подсчета числа эталонных единиц в измеряемом объекте.

Более сложные задачи оценивания разделяются на задачи: *парного сравнения, ранжирования, классификации, численной оценки*.

Задача *парного сравнения* заключается в выявлении лучшего из двух имеющихся объектов.

Задача *ранжирования* – в упорядочении объектов, образующих систему, по убыванию (возрастанию) значения некоторого признака.

Задача *классификации* – в отнесении заданного элемента к одному из подмножеств.

Задача *численной оценки* – в сопоставлении системе одного или нескольких чисел.

## 2. Методы экспертных оценок

*Экспертные оценки* – группа методов, наиболее часто используемых в практике оценивания сложных систем на качественном уровне.

Не претендуя на полноту, можно указать следующие технико-экономические задачи, в которых их использование дает определенную практическую пользу:

- выбор целей исследования;
- выбор и построение критериев в задачах векторной оптимизации;
- принятие решений при управлении производством и выбор наилучшего варианта решения любой другой достаточно сложной проблемы в условиях неопределенности;
- задачи идентификации (математическое описание);
- построение эвристических механизмов управления;
- эргонометрические исследования;
- оценка качества продукции и пр.

*Сущность метода экспертных оценок* заключается в проведении экспертами *интуитивно-логического анализа проблемы* с количественной оценкой суждений и формальной обработкой результатов. Получаемое в результате обработки обобщенное мнение экспертов принимается как решение проблемы. Комплексное использование интуиции (неосознанного мышления), логического мышления и количественных оценок с их формальной обработкой позволяет получить эффективное решение проблемы.

*Характерными особенностями метода экспертных оценок* как научного инструмента решения сложных неформализуемых проблем являются, *во-первых*, научно обоснованная организация проведения всех этапов экспертизы, обеспечивающая наибольшую эффективность работы на каждом из этапов, и, *во-вторых*, применение количественных методов как при организации экспертизы, так и при оценке суждений экспертов и формальной групповой обработке результатов. Эти две особенности отличают метод экспертных оценок от обычной давно известной экспертизы, широко применяемой в различных сферах человеческой деятельности.

Область применения метода экспертных оценок весьма широка. Перечислим *типовые задачи, решаемые методом экспертных оценок*:

- 1) составление перечня возможных событий в различных областях за определенный промежуток времени;
- 2) определение наиболее вероятных интервалов времени свершения совокупности событий;
- 3) определение целей и задач управления с упорядочением их по степени важности;

4) определение альтернативных вариантов решения задачи с оценкой их предпочтения;

5) альтернативное распределение ресурсов для решения задач с оценкой их предпочтительности;

6) альтернативные варианты принятия решений в определенной ситуации с оценкой их предпочтительности.

Для решения перечисленных типовых задач в настоящее время применяются различные разновидности метода экспертных оценок. *К основным видам относятся: анкетирование и интервьюирование; мозговой штурм; дискуссия; совещание; оперативная игра; сценарий.*

Каждый из этих видов экспертного оценивания обладает своими преимуществами и недостатками, определяющими рациональную область применения. Во многих случаях наибольший эффект дает комплексное применение нескольких видов экспертизы.

*Анкетирование и сценарий* предполагают индивидуальную работу эксперта. *Интервьюирование* может осуществляться как индивидуально, так и с группой экспертов. *Остальные виды* экспертизы предполагают коллективное участие экспертов в работе. Независимо от индивидуального или группового участия экспертов в работе целесообразно получать информацию от множества экспертов. Это позволяет получить на основе обработки данных более достоверные результаты, а также новую информацию о зависимости явлений, событий, фактов, суждений экспертов, не содержащуюся в явном виде в высказываниях экспертов.

При использовании метода экспертных оценок возникают свои проблемы. Основными из них являются: подбор экспертов, проведение опроса экспертов, обработка результатов опроса, организация процедур экспертизы.

### **3. Метод мозговой атаки (штурм)**

Метод мозгового штурма появился в Соединенных Штатах Америки в конце 30-х годов. В это время совладелец крупной рекламной фирмы Алекс Ф. Осборн начал практиковать среди своих сотрудников новый подход к поиску идей. Метод окончательно оформился и стал известен широкому кругу специалистов с выходом книги А. Осборна «Управляемое воображение: принципы и процедуры творческого мышления» в 1953 году.

*Основная направленность метода – выявление новых идей и решений.* Для этой цели организаторы экспертизы создают атмосферу, наиболее благоприятствующую генерированию идей (благожелательности, поддержки), освобождающую эксперта от излишней скованности. Обсуждаемая проблема должна быть четко сформулирована.

Метод мозговой атаки характерен открытым высказыванием мнений специалистов (на специальном заседании) по решению конкретной задачи. При этом должны соблюдаться два условия: во-первых, запрещается критика чужих мнений; во-вторых, предполагается высказывать любые идеи по решению данного вопроса без учета сиюминутной ценности или возможности реализации.

Все высказанные идеи фиксируются и после обсуждения детально прорабатываются. При этом выявляются рациональные моменты в каждом из высказанных предположений и на основе их обобщения формулируются решения. Достоинством метода мозговой атаки является возможность принятия решения за сравнительно короткий срок.

Структурно метод довольно прост. Он представляет собой двухэтапную процедуру решения задачи: *на первом этапе выдвигаются идеи, а на втором они конкретизируются, развиваются.*

*Правила этапа генерации:*

1. Запрет критики.
2. Запрет обоснований выдвигаемых идей.
3. Поощрение всех выдвигаемых идей, включая нереальные и фантастические.

*Правило аналитического этапа:*

Выявление рациональной основы в каждой анализируемой идее.

Наилучшие результаты метода мозговой атаки достигаются при разработке новой продукции, совершенствовании выпускаемой продукции и существующих способов работы, при содействии маркетингу и продажам, улучшении технических конструкций, а также при построении дерева целей.

#### **4. Дельфийский метод**

*Дельфийский метод* – метод экспертных оценок на основе:

- 1) опроса мнений специально подобранных экспертов;
- 2) их математико-статистической обработки;
- 3) корректировки экспертами своих оценок.

В общем случае для получения согласованной обобщенной оценки могут потребоваться несколько туров опроса экспертов.

*Дельфийский метод* (Delphiapproach) – метод экспертной оценки будущего (экспертного прогнозирования). Этот метод разработан американской исследовательской корпорацией РЭНД. Суть его состоит в организации систематического сбора мнений специально подобранных экспертов (экспертных оценок), их математико-статистической обработки, корректировки экспертами своих оценок на основе каждого цикла обработки. При этом используется строгая процедура обмена мнениями, обеспечивающая по возможности беспристрастность выводов.

Процедура экспертного опроса по методу «Дельфи» строится в несколько этапов.

*Этап 1. Формирование рабочей группы*

Задача рабочей группы заключается в организации процедуры экспертного опроса.

*Этап 2. Формирование экспертной группы*

В соответствии с методом «Дельфи» группа экспертов должна включать 10–15 специалистов в данной области. Компетентность экспертов определяется

путем анкетирования, анализом уровня реферирования (количества ссылок на работы данного специалиста), использованием листов самооценки.

### *Этап 3. Формулирование вопросов*

Формулировки вопросов должны быть четкими и однозначно трактуемыми, предполагать однозначные ответы.

### *Этап 4. Проведение экспертизы*

Метод «Дельфи» предполагает повторение нескольких шагов проведения опроса. По итогам первого опроса выделяются крайние, так называемые «еретические» мнения, и авторы этих мнений обосновывают свою точку зрения с последующей дискуссией. Это позволяет, с одной стороны, всем экспертам принять во внимание аргументы сторонников крайних точек зрения, с другой – дает возможность последним еще раз продумать свою точку зрения и или дополнительно обосновать ее, или отказаться от нее. После дискуссии опрос проводится снова с целью предоставления возможности экспертам принять во внимание итоги обсуждения. И так повторяется 4 – 5 раз до тех пор, пока точки зрения экспертов не сблизятся.

### *Этап 5. Подведение итогов опроса*

По методу «Дельфи» за итоговое мнение экспертов принимается медиана, то есть среднее в упорядоченном ряду мнений значение. Если ряд, упорядоченный по величине ответов (например, ответов на вопрос о цене инновационного продукта), включает в себя  $n$  значений:  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , то в качестве итоговой оценки по результатам опроса принимается мнение  $M$ , определяемое следующим образом:

$$M = P_k, \text{ если } n = 2k - 1$$

$$M = (P_k + P_{k+1})/2, \text{ если } n = 2k,$$

$$\text{где } k = 1, 2, 3, \dots$$

В 60-е гг. область практического применения метода Дельфи значительно расширились, однако присущие ему ограничения привели к возникновению других методов, использующих экспертные оценки. Среди них особого внимания заслуживают методы QUEST, SEER, PATTERN.

Метод QUEST (Qualitative Utility Estimates for Science and Technology – количественные оценки полезности науки и техники) был разработан для целей повышения эффективности решений по распределению ресурсов, выделяемых на исследования и разработки. В основу метода положена идея распределения ресурсов на основе учета возможного вклада (определяемого методом экспертной оценки) различных отраслей и научных направлений в решение какого-либо круга задач.

## **5. Методы типа сценариев и дерева целей**

*Методы подготовки и согласования представлений о проблеме или анализируемом объекте, изложенные в письменном виде, получили название сценария.* Первоначально этот метод предполагал подготовку текста, содержащего логическую последовательность событий или возможные варианты решения проблемы, упорядоченные во времени. Однако требование временных координат позднее было снято, и сценарием стали называть любой

документ, содержащий анализ рассматриваемой проблемы или предложения по ее решению независимо от того, в какой форме он представлен.

Сценарий не только предусматривает содержательные рассуждения, которые помогают не упустить детали, обычно не учитываемые при формальном представлении системы (в этом и заключалась первоначально основная роль сценария), но и содержит результаты количественного технико-экономического или статистического анализа с предварительными выводами, которые можно получить на их основе.

Группа экспертов, подготавливающих сценарии, пользуется правом получения необходимых справок от организаций, консультаций специалистов. Понятие сценариев расширяется в направлении как областей применения, так и форм представления и методов их разработки: в сценарий не только вводятся количественные параметры и устанавливаются их взаимосвязи, но и предлагаются методики составления сценариев с использованием ЭВМ.

На практике по типу сценариев разрабатывались прогнозы в некоторых отраслях промышленности. В настоящее время разновидностью сценариев можно считать предложения к комплексным программам развития отраслей народного хозяйства, подготавливаемые организациями или специальными комиссиями. Весьма перспективной представляется разработка специализированных информационно-поисковых систем, накапливающих прогнозную информацию по данной отрасли и по смежным отраслям.

Сценарий является предварительной информацией, на основе которой проводится дальнейшая работа по прогнозированию или разработке вариантов проекта. Таким образом, сценарий помогает составить представление о проблеме, а затем приступить к более формализованному представлению системы в виде графиков, таблиц для проведения других методов системного анализа.

*Методы типа дерева целей.* Идея метода впервые была предложена Черчменом в связи с проблемами принятия решений в промышленности.

Термин «дерево целей» подразумевает использование иерархической структуры, полученной путем деления общей цели на подцели, а их, в свою очередь, на более детальные составляющие (новые подцели, функции и т. д.). Как правило, этот термин используется для структур, имеющих отношение строгого порядка, но метод дерева целей используется иногда и применительно к «слабым» иерархиям, в которых одна и та же вершина нижележащего уровня может быть одновременно подчинена двум или нескольким вершинам вышележащего уровня.

Этот метод включает в себя все общие принципы планирования, простые и лёгкие для изучения. По сути, это граф, отражающий план решения той или иной задачи.

Дерево целей имеет стандартную структуру. «Стволом» дерева целей является главная проблема, для которой требуется найти решение. «Ветки» – это задачи второго, третьего, четвертого и так далее уровней.

При планировании решения задачи, как правило, используют графическое изображение дерева. В таком изображении дерево имеет перевернутый вид, где

«ствол» представляет собой вершину графа и находится на самом верху. А из неё, вершины, растут стремления последующих уровней, образуя крону.

Графическое изображение задач в таком виде помогает человеку чётко продумать план достижения намеченного. Изобразив свои планы в виде графа, человек видит, с какими проблемами он столкнется и какие дополнительные ресурсы ему потребуются, чтобы достичь задуманного.

Также по графу приблизительно оценивается срок достижения целей. При таком представлении решения проблемы становятся видны связи и зависимости одних задач от других. Сегодня методом дерева целей пользуются в научном прогнозировании менеджеры при ведении проектов, а также для планирования личных вопросов.

*Правила, используемые при построении дерева целей, весьма просты.*

1. Вначале определяется главная задача, которую необходимо решить. Она-то и будет вершиной или «стволом» дерева. Обычно такую задачу называют генеральной. Она, как правило, не может быть достигнута сразу. Для того чтобы её достичь, необходимо решение других подцелей, результат которых нужен для выполнения генеральной. Они, подцели, будут называться «ветвями». Ветвь тоже может иметь подцели.

2. При построении дерева целей нужно чётко и детально описывать каждую ветвь. Каждая цель также должна иметь нужное количество подцелей, для того чтобы быть реализованной. В итоге должно получиться такое дерево, которое полностью соответствует решению той или иной проблемы. Оно должно содержать все необходимые шаги и ресурсы для решения главной задачи.

Разновидностью методов дерева целей и Дельфи является *метод PATTERN* (Planing Assistance Technical Evaluation of Relevance Numbers – помощь планированию посредством относительных показателей технической оценки), разработанный для повышения эффективности процессов принятия решений в области долгосрочной научно-технической ориентации крупной промышленной фирмы.

Сущность метода PATTERN заключается в следующем. Исходя из сформулированных целей потребителей продукции фирмы на прогнозируемый период осуществляется построение дерева целей. Для каждого уровня дерева целей вводится ряд критериев. С помощью экспертной оценки определяются веса критериев и коэффициенты значимости, характеризующие важность вклада целей в обеспечение критериев.

Значимость некоторой цели определяется коэффициентом связи, представляющим сумму произведений всех критериев на соответствующие коэффициенты значимости. Общий коэффициент связи некоторой цели (относительно достижения цели высшего уровня) определяется путем перемножения соответствующих коэффициентов связи в направлении вершины дерева.

Система ПАТТЕРН явилась важным инструментом анализа трудно решаемых проблем с большой неопределенностью прогнозирования и планирования их выполнения. Основные идеи методики применялись в различных областях, таких как научные исследования, проектирование и

создание систем различной сложности в научно-исследовательских организациях и на предприятиях, расширение рынков сбыта военно-космической продукции и т. д.

Методика ПАТТЕРН обеспечивала возможность прогнозирования на срок 10–15 лет, что соответствовало «жизненному циклу» становления и старения техники. Главное достоинство методики ПАТТЕРН состоит в том, что в ней определены классы критериев оценки *относительной важности, взаимной полезности, состояния и сроков разработки*.

## 6. Морфологические методы

Термином «*морфология*» в биологии и языкознании определяется учение о внутренней структуре исследуемых систем (организмов, языков) или сама внутренняя структура этих систем.

Морфологический способ мышления восходит к *Аристотелю* и *Платону*, к известной средневековой модели *Р. Луллия*. С историей развития морфологического подхода можно познакомиться в книге *В. М. Обрина* по морфологическому анализу технических систем, который систематизировал и развил методы морфологического анализа сложных проблем.

Основная идея морфологических методов заключается в систематическом нахождении всех мыслимых вариантов решения проблемы или реализации системы путем комбинирования выделенных элементов или признаков. В систематизированном виде морфологический подход был разработан и применен впервые швейцарским астрономом *Ф. Цвикки* и долгое время был известен как метод Цвикки.

Цвикки предложил *три метода морфологического исследования*:

1. *Метод систематического покрытия поля* (МСПП), основанный на выделении так называемых опорных пунктов знания в любой исследуемой области и использовании для заполнения поля некоторых сформулированных принципов мышления.

2. *Метод отрицания и конструирования* (МОК), заключающийся в том, что на пути конструктивного прогресса стоят догмы и компромиссные ограничения, которые есть смысл отрицать, и, следовательно, сформулировав некоторые предложения, полезно заменить их затем на противоположные и использовать при проведении анализа.

3. *Метод морфологического ящика* (ММЯ), нашедший наиболее широкое распространение. Идея ММЯ состоит в том, чтобы определить все мыслимые параметры, от которых может зависеть решение проблемы, представить их в виде матриц-строк, а затем определить в этой морфологической матрице-ящике все возможные сочетания параметров по одному из каждой строки. Полученные таким образом варианты могут снова подвергаться оценке и анализу в целях выбора наилучшего. Морфологический ящик может быть не обязательно двухмерным.

Построение и исследование по методу морфологического ящика проводится в пять этапов:



Этап 1. *Формулировка поставленной проблемы.*

Этап 2. *Выделение показателей  $P_n$ , от которых зависит решение проблемы.* По мнению Ф. Цвикки, при наличии точной формулировки проблемы выделение показателей происходит автоматически.

Этап 3. *Сопоставление показателю  $P_i$  его значений  $p_i^j$  и сведение этих значений в таблицу,* которую Цвикки и называет **морфологическим ящиком**. Набор значений различных показателей (по одному значению из каждой строки) представляет собой возможный вариант решения данной проблемы (например, вариант  $(p_1^1, p_2^2, \dots, p_n^2)$ ). Такие наборы называются вариантами решения или просто вариантами. Общее число вариантов, содержащихся в морфологической таблице, равно  $N = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$ , где  $k_i (i = 1, 2, \dots, m)$  – число значений  $i$ -го показателя.

Этап 4. *Оценка всех имеющихся в морфологической таблице (ящике) вариантов.*

Этап 5. *Выбор из морфологической таблицы наиболее желательного варианта решения проблемы.*

Морфологические ящики Цвикки нашли широкое применение для анализа и разработки прогноза в технике. Для организационных систем и систем управления такой ящик, который в данном случае является многомерным, практически невозможно построить.

Поэтому, используя идею морфологического подхода для моделирования организационных систем, разрабатывают языки моделирования или языки проектирования, которые применяют для порождения возможных ситуаций в системе, возможных вариантов решения и часто как вспомогательное средство формирования нижних уровней иерархической структуры при моделировании структуры целей и моделировании организационных структур. Примерами таких языков являются системно-структурные языки (язык функции и видов структуры, номинально-структурный язык), язык ситуационного управления, языки структурно-лингвистического моделирования.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие методы входят в научный инструментарий системного анализа?
2. Какие типы методов применяются для анализа систем? Дайте их краткую характеристику.
3. В чем заключается сущность метода экспертных оценок? Перечислите типовые задачи, решаемые методами экспертных оценок?
4. Изложите содержание метода мозговой атаки.
5. На чем строится процедура экспертного опроса по методу «Дельфи»?
6. Методы морфологического исследования Цвики, краткая характеристика.
7. Как осуществляется исследование по методу морфологического ящика?

## ЛЕКЦИЯ № 5. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИСТЕМ. ПРОЦЕДУРЫ ЭКСПЕРТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Ранжирование.
2. Парное сравнение.
3. Множественные сравнения. Непосредственная оценка.
4. Последовательное сравнение (метод Черчмена Акоффа).
5. Методы Неймана-Моргенштерна и согласования оценок.

К наиболее используемым процедурам экспертных измерений относятся:

- ранжирование;
- парное сравнение;
- множественное сравнение;
- непосредственная оценка;
- последовательное сравнение (метод Черчмена-Акоффа);
- метод фон Неймана-Моргенштерна;
- метод согласования оценок.

Целесообразность применения того или иного метода определяется характером анализируемой информации. *Если оправданы лишь качественные оценки объектов по тем или иным качественным признакам, то используются методы ранжирования, парного и множественного сравнения.*

*Если характер анализируемой информации таков, что целесообразно получить численные оценки объектов, то используют методы численной оценки от непосредственных численных оценок до более тонких методов Черчмена-Акоффа и Неймана-Моргенштерна.*

В дальнейшем будем предполагать, что имеется конечное число измеряемых или оцениваемых альтернатив (объектов)  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , и сформулированы один или несколько признаков сравнения, по которым осуществляет сравнение свойств объектов.

Следовательно, *методы измерения будут различаться лишь процедурой обработки результатов сравнения свойств объектов.* Эта процедура включает построение отношений между объектами эмпирической системы, выбор преобразования и определение типа шкалы измерения.

### 1. Ранжирование

*Метод представляет собой процедуру упорядочения объектов, выполняемую экспертом.* На основе знаний и опыта эксперт располагает объекты в порядке предпочтения, руководствуясь одним или несколькими выбранными показателями сравнения. В зависимости от вида отношений между объектами возможны *различные варианты упорядочения объектов.*

1) Пусть среди объектов нет одинаковых по сравниваемым показателям, то есть нет эквивалентных объектов. В этом случае между объектами существует только отношение строгого порядка. В результате сравнения всех объектов по отношению строгого порядка составляется

упорядоченная последовательность  $a_1 > a_2 > \dots > a_N$ , где объект с первым номером является наиболее предпочтительным из всех объектов, объект со вторым номером менее предпочтителен, чем первый объект, но предпочтительней всех остальных объектов, и т. д. Полученная система объектов с отношением строгого порядка при условии сравнимости всех объектов по этому отношению образует полный строгий порядок. Для этого отношения доказано существование числовой системы, элементами которой являются действительные числа, связанные между собой отношением неравенства «>».

Это означает, что упорядочению объектов соответствует упорядочение чисел  $x_1 > x_2 > \dots > x_N$ , где  $x_i = \varphi(a_i)$ . Возможна и обратная последовательность  $x_1 < x_2 < \dots < x_N$ , в которой более предпочтительному объекту приписывается наименьшее число, и по мере убывания предпочтения объектам приписываются большие числа.

Соответствие последовательностей  $\{a_i\}$  и  $\{x_i\}$ , то есть их гомоморфизм, можно осуществить, выбирая любые числовые представления. Единственным ограничением является монотонность преобразования. Следовательно, допустимое преобразование при переходе от одного числового представления к другому должно обладать свойством монотонности. Таким свойством допустимого преобразования обладает шкала порядков, поэтому ранжирование объектов есть измерение на порядковой шкале.

*Рассмотрим понятие шкалы порядка.* Шкала называется *шкалой порядка* или иначе ранговой шкалой, если множество  $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$  допустимых преобразований  $x_i \rightarrow y_i$  состоит из всех монотонно возрастающих допустимых преобразований шкальной системы.

В практике ранжирования чаще всего применяется числовое представление последовательности в виде натуральных чисел:  $x_1 = \varphi(a_1) = 1$ ,  $x_2 = \varphi(a_2) = 2$ , ...,  $x_N = \varphi(a_N) = N$ , т. е. используется числовая последовательность. Числа  $x_1, x_2, \dots, x_N$  называются рангами и обычно обозначаются буквами  $r_1, r_2, \dots, r_N$ .

2) Применение строгих численных отношений больше, меньше или равно не всегда позволяет установить порядок между объектами. Поэтому наряду с ними используются отношения для определения большей или меньшей степени какого-то качественного признака (отношения частичного порядка, например, полезности) используются отношения типа «более предпочтительно» (>), «менее предпочтительно» (<), «равноценно» ( $\approx$ ) или «безразлично» ( $\sim$ ). Упорядочение объектов при этом может иметь следующий вид:

$$a_1 > a_2 > a_3 \approx a_4 \approx a_5 > a_6 > a_7 > \dots > a_{n-1} \approx a_n.$$

Такое упорядочение образует нестрогий линейный порядок. Для отношения нестрогого линейного порядка доказано существование числовой системы с отношениями неравенства и равенства между числами, описывающими свойства объектов. Любые две числовые системы для нестрогого линейного порядка связаны между собой монотонным преобразованием. Следовательно, *ранжирование при условии наличия эквивалентных объектов также представляет собой измерение на порядковой шкале.*

В практике ранжирования объектов, между которыми допускаются отношения как строгого порядка, так и эквивалентности, *числовое представление выбирается следующим образом.*

Наиболее предпочтительному объекту присваивается ранг, равный единице, второму по предпочтительности – ранг, равный двум, и т. д. Для эквивалентных объектов удобно с точки зрения технологии последующей обработки экспертных оценок назначать одинаковые ранги, равные среднеарифметическому значению рангов, присваиваемых одинаковым объектам. Такие ранги называют *связанными рангами.*

Для приведенного примера упорядочения на основе нестрогого линейного порядка при  $N = 10$  имеем:

$$a_1 > a_2 > a_3 \approx a_4 \approx a_5 > a_6 > a_7 > \dots > a_9 \approx a_{10}.$$

Ранги объектов  $a_3, a_4, a_5$  в данном случае равны 4 ( $r_3 = r_4 = r_5 = \frac{3+4+5}{3} = 4$ ). В этом же примере ранги объектов  $a_9, a_{10}$  также одинаковы и равны среднеарифметическому  $r_9 = r_{10} = \frac{9+10}{2} = 9,5$ . Связанные ранги могут оказаться дробными числами. Удобство использования связанных рангов заключается в том, что сумма рангов  $N$  объектов равна сумме натуральных чисел от единицы до  $N$ . При этом любые комбинации связанных рангов не изменяют эту сумму. Данное обстоятельство существенно упрощает обработку результатов ранжирования при групповой экспертной оценке.

При групповом ранжировании каждый  $S$ -й эксперт присваивает каждому  $i$ -му объекту ранг  $r_{iS}$ . В результате проведения экспертизы получается матрица рангов  $[r_{iS}]$  размерности  $N \times k$ , где  $k$  – число экспертов;  $N$  – число объектов;  $S = 1, \dots, k$ ;  $i = 1, \dots, N$ . Результаты группового экспертного ранжирования удобно представить в виде таблицы 2:

Таблица 2 – Табличное представление результатов группового ранжирования

Объекты	$\dot{Y}_1$	$\dot{Y}_2$	...	$\dot{Y}_k$
$a_1$	$r_{11}$	$r_{12}$	...	$r_{1k}$
$a_2$	$r_{21}$	$r_{22}$	...	$r_{2k}$
...	...	...	...	...
$a_n$	$r_{n1}$	$r_{n2}$	...	$r_{nk}$

Аналогичный вид имеет таблица в том случае, если осуществляется ранжирование объектов одним экспертом по нескольким показателям сравнения. При этом в таблице вместо экспертов в соответствующих графах указываются показатели.

Необходимо помнить, что ранги объектов определяют только порядок расположения объектов по показателям сравнения. Ранги как числа не дают возможности сделать вывод о том, на сколько или во сколько раз предпочтительнее один объект по сравнению с другим. Если, например, ранг

объекта равен трем, то отсюда не следует делать вывод о том, что этот объект в три раза более предпочтителен, чем объект, имеющий ранг, равный единице.

*Достоинство ранжирования* как метода экспертного измерения – простота осуществления процедур, не требующая трудоемкого обучения экспертов.

*Недостатком ранжирования* является практическая невозможность упорядочения большого числа объектов. Как показывает опыт, при числе объектов большем 10 – 15, эксперты затрудняются в построении ранжировки. Это объясняется тем, что в процессе ранжирования эксперт должен установить взаимосвязь между всеми объектами, рассматривая их как единую совокупность.

При увеличении числа объектов количество связей между ними растет пропорционально квадрату числа объектов. Сохранение в памяти и анализ большой совокупности взаимосвязей между объектами ограничиваются психологическими возможностями человека. Психологи утверждают, что оперативная память человека позволяет оперировать в среднем не более чем 7+2 объектами одновременно. Поэтому при ранжировании большого числа объектов эксперты могут допускать существенные ошибки.

## 2. Парное сравнение

Этот метод представляет собой процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар. В отличие от ранжирования, в котором осуществляется упорядочение всех объектов, парное сравнение объектов является более простой задачей. При сравнении пары объектов возможно либо отношение строгого порядка, либо отношение эквивалентности. Из этого следует, что *парное сравнение, так же, как и ранжирование, есть измерение на порядковой шкале.*

В результате сравнения пары объектов  $a_i, a_j$  эксперт упорядочивает ее, высказывая либо  $a_i > a_j$ , либо  $a_i < a_j$ , либо  $a_i \approx a_j$ . Выбор числового представления  $\varphi(a_i)$  можно произвести так: если  $a_i > a_j$ , то  $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$ ; если предпочтение в паре обратное, то знак неравенства меняется. Наконец, если объекты эквивалентны, то  $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$ .

В практике парного сравнения используются следующие числовые представления:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } a_i > a_j \text{ или } a_i \approx a_j \\ 0, \text{ если } a_i < a_j; i, j = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases}, \quad (1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 2, \text{ если } a_i > a_j \\ 1, \text{ если } a_i \approx a_j; i, j = 1, 2, 3, \dots, N \\ 0, \text{ если } a_i < a_j \end{cases}, \quad (2)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i > a_j \\ 0, & \text{если } a_i \approx a_j; i, j = 1, 2, 3, \dots, N. \\ -1, & \text{если } a_i < a_j \end{cases} \quad (3)$$

Результаты сравнения всех пар объектов удобно представить в виде матрицы. Пусть, например, имеются пять пар объектов  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  и проведено парное сравнение этих объектов по предпочтительности. Результаты сравнения представлены в виде:

$$a_1 > a_2, a_1 > a_3, a_1 > a_4, a_1 > a_5, a_2 > a_3, a_2 > a_4, a_4 > a_5, a_2 > a_5, \\ a_3 \approx a_4, a_3 < a_5 \quad (4)$$

Используя числовое представление (1), составим матрицу измерения результатов парных мнений (таблица 3).

В таблице 3 на диагонали всегда будут расположены единицы, поскольку каждый объект эквивалентен сам себе.

Представление (2) характерно для отображения результатов спортивных состязаний. За выигрыш даются два очка, за ничью – одно и за проигрыш – ноль очков. Предпочтительность одного объекта перед другим трактуется в данном случае как выигрыш одного участника турнира у другого. Таблица результатов измерения при использовании числового представления не отличается от таблиц результатов спортивных турниров, за исключением диагональных элементов (обычно в турнирных таблицах диагональные элементы заштрихованы).

Таблица 3 – табличное представление сравнения (4) по правилу (1)

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$a_1$	1	1	1	1	0
$a_2$	0	1	1	1	0
$a_3$	0	0	1	1	0
$a_4$	0	0	1	1	0
$a_5$	1	1	1	1	1

В качестве примера в таблице 4 результаты измерения пяти объектов с использованием представления (2).

Таблица 4 – Табличное представление сравнения (4) по правилу (2)

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$a_1$	1	2	2	2	0
$a_2$	0	1	1	2	0
$a_3$	0	0	1	1	0
$a_4$	0	0	1	1	0
$a_5$	2	2	2	2	1

Если сравнение пар объектов производится отдельно по различным показателям или сравнение осуществляет группа экспертов, то по каждому показателю или эксперту составляется своя таблица результатов парных сравнений. Сравнение во всех возможных парах не дает полного упорядочения объектов, поэтому возникает задача ранжирования объектов по результатам их парного сравнения.

Однако, как показывает опыт, эксперт далеко не всегда последователен в своих предпочтениях. В результате использования метода парных сравнений эксперт может указать, что объект  $a_1$  предпочтительнее объекта  $a_2$ ,  $a_2$  предпочтительнее объекта  $a_3$  и в то же время  $a_3$  предпочтительнее объекта  $a_1$ . Такая непоследовательность эксперта может объясняться различными причинами: сложность задачи, неочевидность предпочтительности объектов или разбиения их на классы, недостаточной компетентностью эксперта, недостаточно четкой постановкой задачи, многокритериальностью рассматриваемых объектов и т. д.

Непоследовательность эксперта приводит к тому, что в результате парных сравнений при определении сравнительной предпочтительности объектов мы не получаем ранжирования и даже отношений частного порядка – не выполняется свойство транзитивности.

### **3. Множественные сравнения. Непосредственная оценка**

*Множественные сравнения* отличаются от парных сравнений тем, что экспертам последовательно предъявляются не пары, а тройки, четверки, ...,  $n$ -ки ( $n < N$ ) объектов. Эксперт их упорядочивает по важности или разбивает на классы в зависимости от целей экспертизы.

Множественные сравнения занимают промежуточное положение между парными сравнениями и ранжированием. С одной стороны, они позволяют использовать больший, чем при парных сравнениях, объем информации для определения экспертного суждения в результате одновременного соотнесения объекта не с одним, а с большим числом объектов. С другой стороны, при ранжировании объектов их может оказаться слишком много, что затрудняет работу эксперта и сказывается на качестве результатов экспертизы. В этом случае множественные сравнения позволяют уменьшить до разумных пределов объем поступающей к эксперту информации.

*Непосредственная оценка.*

Метод непосредственной оценки заключается в присваивании объектам числовых значений *на шкале интервалов*.

Шкала интервалов применяется для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка, аддитивности.

Шкала интервалов (интервальная шкала) является количественной шкалой. Эта шкала применяется, когда упорядочивание значений измерений можно выполнить настолько точно, что известны интервалы между любыми двумя из них (рис. 10).

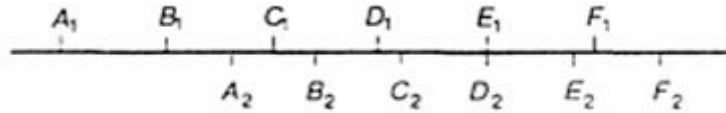


Рис. 10. Соотношение шкал интервалов для одной и той же физической величины

В шкале интервалов присутствуют упорядоченность и интервальность, но нет нулевой точки. Шкалы могут иметь произвольные начала отсчета, а связь между показаниями в таких шкалах является линейной.

*Принципы построения шкалы интервалов:*

1. Выбираются две реперные точки, которые назначаются условно, обычно они связаны с каким-то событием или состоянием.
2. Интервал между этими точками делится на несколько частей, причем количество частей может быть произвольным.
3. Единица/интервал получают естественно (год, сутки) или условно (неделя, градус Цельсия, градус по Фаренгейту), «0» – устанавливается условно (это одна из реперных точек).

*Математические операции, выполняемые с величинами:*

= или  $\neq$  (эквивалентность); > или < (порядок);

+ $\Delta$  или - $\Delta$  (аддитивность), но складывать и вычитать имеет смысл только интервалы значений, а не значения целиком.

Например:

$1941\text{г} + 4\text{г} = 1945\text{г}$  – это выражение имеет смысл,

а  $1945\text{г} + 1945\text{г} = 3990\text{г}$  – смысла не имеет.

В этой шкале *только интервалы значений обладают всеми свойствами «настоящих чисел» и только над интервалами следует выполнять арифметические операции.* Если произвести арифметические операции над самими отсчетами по шкале, забыв об их относительности, то имеется риск получить бессмысленные результаты.

*Пример.* Нельзя сказать, что температура воды увеличилась в два раза при ее нагреве от  $10^\circ\text{C}$  до  $20^\circ\text{C}$  по шкале Цельсия, поскольку для того, кто привык пользоваться шкалой Фаренгейта, это будет звучать весьма странно, так как в этой шкале температура воды в том же опыте изменится от  $50^\circ\text{F}$  до  $68^\circ\text{F}$ .

*Эксперту необходимо* поставить в соответствие каждому объекту точку на определенном отрезке числовой оси. При этом необходимо, чтобы эквивалентным объектам приписывались одинаковые числа.

Измерения на шкале интервалов могут быть достаточно точными при полной информированности экспертов о свойствах объектов. Эти условия на практике встречаются редко, поэтому для измерения применяют *балльную оценку*. При этом вместо непрерывного отрезка числовой оси рассматриваются участки, которым приписываются баллы.



Эксперт приписывает объекту балл, тем самым измеряет его с точностью до отрезка числовой оси. Применяются 5-, 10- и 100-балльные шкалы.

#### 4. Последовательное сравнение (метод Черчмена-Акоффа)

Этот метод относится к числу наиболее популярных при оценке альтернатив. В нем предполагается последовательная корректировка оценок, указанных экспертами. Основные предположения, на которых основан метод, состоят в следующем:

- каждой альтернативе  $a_i, (i = 1, \dots, N)$  ставится в соответствие действительное неотрицательное число  $\varphi(a_i)$ ;
- если альтернатива  $a_i > a_j$ , то  $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$ , если же  $a_i \approx a_j$ , то  $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$ ;
- если  $\varphi(a_i)$  и  $\varphi(a_j)$  – оценки альтернатив  $a_i$  и  $a_j$ , то сумма  $\varphi(a_i) + \varphi(a_j)$  соответствует совместному осуществлению альтернатив  $a_i$  и  $a_j$ .

Наиболее сильным является последнее предположение об аддитивности оценок альтернатив.

Согласно методу Черчмена-Акоффа, альтернативы ранжируются по предпочтительности. Пусть альтернатива  $a_1$  наиболее предпочтительна, за ней следует  $a_2$  и т. д. Эксперт указывает предварительные численные оценки  $\varphi(a_i)$  для каждой из альтернатив. Иногда наиболее предпочтительной альтернативе приписывается оценка 1, остальные оценки располагаются между 0 и 1 в соответствии с их предпочтительностью. Затем эксперт производит сравнение альтернативы  $a_1$ , и суммы альтернатив  $a_2, \dots, a_N$ . Если  $a_1$  предпочтительнее, то эксперт корректирует оценки так, чтобы

$$\varphi(a_1) > \sum_{i=2}^N \varphi(a_i).$$

После того как альтернатива  $a_1$  оказывается предпочтительней суммы альтернатив  $a_2, \dots, a_k (k > 2)$ , она исключается из рассмотрения, а вместо оценки альтернативы  $a_1$  рассматривается и корректируется оценка альтернативы  $a_2$ . Процесс продолжается до тех пор, пока откорректированными не окажутся оценки всех альтернатив.

При достаточно большом  $N$  применение метода Черчмена-Акоффа становится трудоемким. В этом случае целесообразно разбить альтернативы на группы, а одну из альтернатив, например, максимальную, включить во все группы. Это позволяет получить численные оценки всех альтернатив с помощью оценивания внутри каждой группы. Данный метод считается одним из самых эффективных.

#### 5. Методы Неймана-Моргенштерна и согласования оценок

*Метод Неймана-Моргенштерна* заключается в получении численных оценок альтернатив с помощью так называемых вероятностных смесей. В основе

метода лежит предположение, согласно которому эксперт для любой альтернативы  $a_j$ , менее предпочтительной, чем  $a_i$ , но более предпочтительной, чем  $a_1$  ( $a_1 < a_j < a_i$ ), может указать число  $a_p$  ( $0 \leq p \leq 1$ ) такое, что альтернатива  $a_j$  эквивалентна смешанной альтернативе (вероятностной смеси)  $[pa_i, (1-p)a_1]$ .

Смешанная альтернатива состоит в том, что альтернатива  $a_i$  выбирается с вероятностью  $p$ , а альтернатива  $a_1$  – с вероятностью  $(1-p)$ . Очевидно, что если  $p$  достаточно близко к 1, то альтернатива  $a_j$  менее предпочтительна, чем смешанная альтернатива  $[pa_i, (1-p)a_1]$ .

Если указанная система предпочтений выполнена, то для каждой из набора основных альтернатив  $a_1, a_2, \dots, a_N$  определяются числа  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , характеризующие численную оценку смешанных альтернатив.

Численная оценка смешанной альтернативы  $[p_1 a_1, p_2 a_2, \dots, p_N a_N]$  равна:

$$p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_N x_N.$$

Таким образом, устанавливается существование функции полезности, значение которой характеризует степень предпочтительности любой смешанной альтернативы. Более предпочтительна та смешанная альтернатива, для которой значение функции полезности больше.

*Метод согласования оценок.* Этот метод обычно применяется при обработке индивидуальных экспертных оценок. Метод имеет много вариантов, различающихся способами, при помощи которых из индивидуальных оценок получается обобщенная. При этом используют различные *методы согласования оценок*:

1) простейшие, основанные на получении средней вероятности,

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i,$$

или средневзвешенного значения вероятности

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n k_i p_i}{\sum_{i=1}^n k_i},$$

где  $k_i$  – веса, приписываемые оценке каждого эксперта;

2) специальные методы оценки измерения и повышения коэффициентов согласованности (или коэффициентов непротиворечивости) мнений экспертов;

3) методы, основанные на отборе экспертной группы с высоким коэффициентом согласованности мнений.

Наиболее часто при обработке материалов коллективной экспертной оценки используются *методы теории ранговой корреляции*. Для количественной оценки степени согласованности мнений экспертов применяется *коэффициент конкордации*  $W$ , который позволяет оценить, насколько согласованы между собой ряды предпочтительности, построенные каждым экспертом. Его значение находится в пределах  $0 \leq W \leq 1$ .

$W = 0$  – полную противоположность,  $W = 1$  – полное совпадение ранжировок. Практически достоверность считается хорошей, если  $W = 0,7 - 0,8$ . Небольшое значение коэффициента конкордации,

свидетельствующее о слабой согласованности мнений экспертов, является следствием следующих причин:

- в рассматриваемой совокупности экспертов действительно отсутствует общность мнений;
- внутри рассматриваемой совокупности экспертов существуют группы с высокой согласованностью мнений, однако обобщенные мнения таких групп противоположны.

Для наглядности представления о степени согласованности мнений двух любых экспертов  $A$  и  $B$  служит коэффициент парной ранговой корреляции  $r$ , он принимает значения от  $-1$  до  $+1$ . Значение  $r = +1$  соответствует полному совпадению оценок в рангах двух экспертов (полная согласованность мнений двух экспертов), а  $r = -1$  – двум взаимно противоположным ранжировкам важности свойств (мнение одного эксперта противоположно мнению другого).

Рассмотренные выше методы экспертных оценок обладают различными качествами, но приводят в общем случае к близким результатам. Практика применения этих методов показала, что наиболее эффективно комплексное применение различных методов для решения одной и той же задачи.

Сравнительный анализ результатов повышает обоснованность выводов. При этом следует учитывать, что методом, требующим минимальных затрат, является ранжирование, а наиболее трудоемким – метод последовательного сравнения (Черчмена-Акоффа). Метод парного сравнения без дополнительной обработки не дает полного упорядочения объектов.

### Контрольные вопросы

1. Назовите и поясните варианты упорядочения объектов при реализации метода ранжирования.
2. Какая измерительная шкала используется при реализации метода парного сравнения.
3. В чем состоит отличие метода множественных сравнений от метода парных сравнений?
3. Назовите принципы построения шкалы интервалов. При использовании какого метода анализа систем она применяется?
4. Какие математические операции выполняются на шкале интервалов?
5. На каких предположениях основывается метод Черчмена-Акоффа?
6. В чем заключается метод Неймана-Моргенштерна?
7. В каких случаях используются метод согласования оценок? Какие методы согласования оценок используются при его реализации?
8. Для какой оценки применяется коэффициент конкордации  $W$ ?

## ЛЕКЦИЯ № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

1. Основные понятия и этапы моделирования систем.
2. Принципы и подходы к построению моделей.
3. Классификация моделей систем.

### 1. Основные понятия и этапы моделирования систем

Моделирование является неотъемлемым этапом синтеза систем. Процесс познания любой системы неразрывно связан с ее моделированием, т. е. с приближенным представлением системы или в нашем сознании, или в форме математических формул, знаков, графических изображений, или в виде других материальных систем. Моделирование предполагает наличие трех систем:

- 1) моделируемой (объект исследования);
- 2) моделирующей (сам исследователь);
- 3) непосредственно самой модели.

Моделирующая система, как правило, включает человека-исследователя, познающего объект исследования и создающего в соответствии с этим его модели.

*Моделью системы* (объекта, процесса, явления) называется другая материальная или абстрактная система (объект, процесс, явление), конструируемая исследователем, и имеющая сходство с моделируемой системой (объектом, процессом, явлением) по некоторым свойствам, существенным для поставленной цели исследования, и служащая средством познания моделируемой системы (объекта, процесса, явления). Исходя из приведенного определения, можно дать формулировку понятия «математическая модель».

*Математической моделью системы* называется совокупность математических соотношений, описывающих исследуемые закономерности, присущие моделируемой системе, определяемые целью исследования и служащая средством познания моделируемой системы.

Используются и другие определения модели, но в любом случае подчеркивается, что изучается не сама система-оригинал, а некоторая другая естественная или искусственная система, обладающая следующими свойствами:

- соответствует исследуемой системе;
- способна замещать исследуемую систему в некоторых интересующих исследователя отношениях;
- обеспечивает получение информации о моделируемой системе.

Каждая система может иметь значительное число моделей, вид которых определяется целями исследования, а также требуемой глубиной и точностью познания моделируемой системы.

*Моделирование* – это теоретическое или практическое исследование систем путем построения и изучения их моделей с целью определения или уточнения характеристик и рациональных способов построения вновь конструируемых или совершенствуемых систем. Процесс моделирования, как правило, включает следующие этапы:

- осмысление вновь создаваемой или совершенствуемой системы с целью получения некоторых знаний о ней;
- описание системы, ее структурных и функциональных элементов, их свойств и состояний, а также связей, отношений, взаимодействий между элементами системы на естественном языке;
- описание системы и вышеперечисленных характеристик с помощью математических соотношений, специальных символов и знаков с целью обеспечения более компактного, глубокого и эффективного исследования системы;
- конструирование естественных или искусственных материальных систем, аналогичных моделируемой системе по изучаемым свойствам.

Данные этапы взаимосвязаны и образуют циклическую последовательность, приводящую в итоге к познанию системы на достаточном для исследователя уровне. Словесному описанию всегда предшествует осмысливание системы в человеческом сознании. После словесного описания при необходимости следует этап формализации системы с помощью специальных знаков и математических символов. Затем на основании исследования полученных словесных описаний и математических зависимостей вновь повторяется этап отражения системы в человеческом сознании, но глубже и более конкретно. После этого математические зависимости при необходимости корректируются и т. д.

Этап создания материальных систем, аналогичных по свойствам исследуемой, может следовать сразу же после первого этапа, когда исследователь создает системы без их предварительного описания в виде слов и знаков. На этом этапе также могут выполняться исследования, которые приводят к уточнению мысленных, описательных и знаковых представлений о системе. Причем по отношению к моделям исследователь является экспериментатором, только эксперимент проводится не с объектом, а с моделью.

## **2. Принципы и подходы к построению моделей**

Процессы моделирования, создания моделей не имеют формализованного алгоритма их проведения. Исследование любой, достаточно сложной, системы имеет свои особенности, требует творческого, индивидуального подхода. Тем не менее существует большой опыт построения разнообразных моделей, который позволяет сформулировать основные принципы и подходы, определяющие требования, которым должна удовлетворять удачно построенная модель. Суть и назначение некоторых из этих принципов рассмотрим ниже.

1. *Адекватность (тождественность) модели.* Этот принцип определяет требование соответствия модели системе-оригиналу по совокупности исследуемых свойств, по уровню их сложности и организации. Естественно говорить не просто об адекватности модели, а о большей или меньшей адекватности. Адекватность следует рассматривать только по определенным признакам – свойствам, принятым в данном исследовании.

2. *Соответствие модели решаемой задаче.* Этот принцип подчеркивает целесообразность конструирования специализированных моделей для решения конкретной задачи. Разработка универсальной модели для решения многих разнообразных задач в большинстве случаев оказывается трудновыполнимой, а сама модель оказывается практически непригодной.

3. *Соответствие сложности модели и требований исследования существенных свойств системы-оригинала, а также точности результатов моделирования.* Этот принцип определяет целесообразность уменьшения сложности модели за счет абстрагирования от несущественных деталей, поскольку модель в общем случае должна быть проще исследуемой системы.

Однако модель может быть упрощена только до уровня, обеспечивающего оценку существенных свойств системы с требуемой точностью. Таким образом, имеется два противоречивых требования: с одной стороны, необходимо понижать сложность модели, а с другой – обеспечивать необходимую точность исследования существенных свойств системы.

*Выходом из этого противоречия может явиться выполнение следующих рекомендаций:*

- исключение несущественных переменных, объединение нескольких переменных, чем достигается сокращение их общего числа;
- изменение природы рассматриваемых параметров и (или) функциональной зависимости между ними. Например, некоторые переменные параметры рассматривать как постоянные, дискретные – как непрерывные, нелинейные зависимости – как линейные;
- изменение пределов ограничений, а также их возможное исключение, модификация или включение дополнительных ограничений;
- установление разумной точности модели. Например, точность результатов моделирования не может быть выше точности исходных данных.

4. *Конструирование модели в виде отдельных достаточно самостоятельных, законченных элементов (блоков).* Использование этого принципа облегчает разработку сложных систем за счет многократного использования одних и тех же блоков и обеспечения связей между ними. Структуризация блоков в основном осуществляется в соответствии с выполняемыми ими функциями.

5. *Многовариантность построения элементов (блоков) модели, исходя из предъявляемых к ним требований, прежде всего, по точности выходных параметров.* Многовариантность элементов обеспечивает рациональное построение модели системы в целом.

Говоря о подходах к построению моделей систем, необходимо иметь в виду, что к созданию модели можно приступать на основе исходных данных, которые либо уже известны, либо могут быть получены тем или иным способом. В зависимости от конкретной ситуации это может быть:

- непосредственный анализ создаваемой или совершенствуемой системы;
- проведение эксперимента на функционирующей системе или на ее фрагменте;
- анализ систем-аналогов.

Построение моделей, как правило, носит итеративный характер. Процесс конструирования модели начинается с создания достаточно простых моделей, позволяющих глубже понять исследуемую систему. Кроме того, на их создание затрачиваются сравнительно небольшие материальные и временные ресурсы. Создаваемые затем более сложные модели используются для учета влияния гораздо более широкого числа параметров на результаты моделирования. Для моделирования сложных систем необходимо разрабатывать целый ряд иерархических моделей, различающихся уровнем отображаемых функций и точностью определения выходных параметров модели.

### 3. Классификация моделей систем

Классификация видов моделей может быть проведена по различным признакам.

По признаку *полноты* можно выделить *полные, неполные и приближенные модели*.

*Полные модели* должны быть полностью идентичны исследуемой системе, т. е., по сути, являются точной ее копией. В *неполных* и *приближенных* моделях только некоторые стороны реальной системы (объекта, процесса, явления), существенные для поставленной цели исследования, являются идентичными модели. При этом исследователи стремятся к тому, чтобы модель адекватно отображала только исследуемые аспекты системы.

В зависимости от *формы реализации* носителя модели классифицируются на *мысленные и реальные*. Рассмотрим мысленные модели.

*Мысленные модели* применяются тогда и только тогда, когда реальные модели не могут быть реализованы в заданном интервале времени либо отсутствуют условия для их физического создания. Мысленные модели являются отражением или воображением в человеческом сознании моделируемой системы. В зависимости от требуемой глубины исследования данный класс моделей может принимать различные виды, которые отражают или представляют и воображают систему на уровне понятий, суждений, умозаключений. Мысленные модели реальных систем реализуются в виде *наглядных, символических и математических моделей*.

*Наглядные модели* отображают явления и процессы, протекающие в системе. Примеры таких моделей – учебные плакаты, рисунки, схемы, диаграммы, топографические карты и т. д.

*Символические модели* являются некоторыми искусственно созданными логическим объектами, замещающими реальные объекты и выражающими их основные свойства с помощью определенной системы знаков и символов. К этому виду моделей относятся словесные (вербальные, концептуальные) модели, которые, по сути, представляют собой отдельные мысленные модели, выраженные в форме речи или словесной записи.

В основе *словесных моделей* лежит некоторый тезаурус, который образуется из набора понятий исследуемой предметной области. Под тезаурусом понимается словарь, отражающий связи между словами или иными элементами данного

языка, предназначенный для поиска слов по их смыслу. Тезаурус отличается от обычного словаря тем, что в нем исключена неоднозначность, т. е. в нем каждому слову соответствует лишь единственное понятие, хотя в обычном словаре одному слову может соответствовать несколько понятий. Если обозначить каждое из используемых понятий операции знаками и определить операции между ними, то можно реализовать знаковое моделирование. Оно заключается в составлении отдельных цепочек из понятий, над которыми выполняются операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств и математической логики. В результате можно получить описание исследуемой реальной системы.

*Математические модели*, как уже отмечалось, представляют собой системы математических символов, между которыми установлены математические отношения, описывающие свойства моделируемой системы. Наибольший эффект от применения математических моделей может быть достигнут в том случае, если система достаточно хорошо осмыслена, предварительно изучена и описана на вербальном уровне. Также определены цель исследования и доступные для измерения показатели свойств системы. В противном случае применение математической модели может оказаться не полезным, а вредным. Она будет отвлекать внимание от главных вопросов исследования к второстепенным вопросам и сводиться к бессмысленному жонглированию математическими символами. *Математические модели могут иметь различные формы записи. Основными из них являются инвариантная, аналитическая и алгоритмическая формы.*

*Инвариантная форма* реализуется с помощью обычного математического языка. В этом случае модель реализуется как совокупность входов, выходов системы, переменных ее состояния и математических отношений между ними.

*Аналитическая форма* является результатом решения исходных уравнений модели. В этой форме реализуются зависимости выходных параметров как функций входов и переменных состояния. Для аналитического моделирования характерно то, что в основном моделируется только функциональный аспект системы. При этом зависимости, описывающие алгоритм функционирования исследуемой системы, записываются в виде некоторых алгебраических, интегрально-дифференциальных, конечно-разностных и других уравнений или логических условий. *Математически эта форма записи модели может быть исследована различными методами:*

- *аналитическим* – в том случае, когда возможно получить в общем виде зависимости искомых характеристик от параметров и переменных, описывающих состояния системы;
- *численным* – когда отсутствуют методы аналитического решения математических зависимостей, заложенных в модели. Результаты исследования получаются за счет применения различных численных методов решения математических задач, при заданных начальных условиях;
- *качественным* – когда также невозможно получить решение в явном виде, а требуется лишь оценить некоторые свойства решения (например, устойчивость решения или область применения полученных характеристик и т. д.).



*Алгоритмическая форма* математической модели обеспечивает получение числовых значений характеристик исследуемой системы за счет разработки и реализации соответствующего алгоритма.

*По цели моделирования* следует различать *имитационные (анализирующие)* и *оптимизационные (синтезирующие)* модели.

*Имитационные модели* представляют собой математические зависимости, описывающие структуру и поведение системы при различных воздействиях окружающей среды. Данный тип моделей используется для анализа и выявления существенных системных свойств, недоступных непосредственному наблюдению, для прогнозирования поведения системы в различных ситуациях. Использование метода имитационного моделирования позволяет оценивать, сравнивать и выбирать варианты структуры системы, оценивать эффективность различных алгоритмов функционирования системы, а также влияние изменения различных параметров системы на ее выходные характеристики.

*Преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим* является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как нелинейность характеристик элементов системы, многочисленные случайные воздействия со сложными законами распределения вероятностей их характеристик, наличие сложных комбинаций дискретных и непрерывных элементов и др., которые часто создают трудности при аналитических исследованиях.

При имитационном моделировании воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени, причем поэтапно имитируются состояния системы, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить сведения о состоянии процесса функционирования системы, а, следовательно, оценить характеристики системы. В настоящее время имитационное моделирование является наиболее эффективным методом исследования систем, а часто и единственным практически доступным методом получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования. Как правило, имитационные модели реализуются на компьютере, чему предшествует составление необходимых алгоритмов и программ, описывающих поведение систем.

Одним из наиболее часто используемых методов имитационного моделирования является метод статистических испытаний (Метод Монте-Карло). Этот метод состоит в многократном воспроизведении случайных процессов, которые формируются таким образом, чтобы их вероятностные характеристики совпадали с аналогичными характеристиками исследуемой системы. После завершения экспериментов полученная информация обрабатывается методами математической статистики с целью получения оценок требуемых характеристик.

Наряду с имитационными моделями применяются так называемые *комбинированные модели*. Комбинированные (аналитико-имитационные) модели объединяют достоинства аналитического и имитационного моделирования. Для построения комбинированных моделей необходимо произвести предварительную

декомпозицию процесса функционирования системы на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой подход дает возможность охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием аналитического или имитационного моделирования в отдельности.

*Оптимизационные модели* представляют собой математические зависимости, обеспечивающие синтез наилучших в соответствии с предъявляемыми требованиями искусственных систем или выбор наилучшего поведения систем в условиях различных воздействий окружающей среды. Оптимизационные модели создаются на основе установленных критериев эффективности систем и содержат выражения, которые необходимо максимизировать или минимизировать при определенных ограничениях, накладываемых на отдельные переменные, входящие в модель. Построению оптимизационной модели, как правило, предшествует этап создания имитационной модели, описывающей наиболее общие свойства синтезируемой системы при условии возможности варьирования отдельными ее показателями с целью получения оптимального решения. Решение любой задачи на оптимизацию самым существенным образом связано с выбором критерия оптимальности, т. е. целевого функционала. При смене критерия решение может измениться.

*По наличию элементов случайности* модели могут быть *детерминированными и стохастическими (вероятностными)*.

*Детерминированное моделирование* отображает детерминированные процессы, т. е. такие процессы, в которых отсутствуют всякие случайные величины и даже случайные процессы. При использовании детерминированных моделей состояния системы однозначно определяются через состояния элементов и через показатели их свойств.

*Стохастическое моделирование* отображает вероятностные процессы и события. В стохастических моделях устанавливаются отношения между распределениями вероятностей состояний системы и вероятностей состояний элементов и значений показателей свойств системы.

*По видам описываемых процессов* различают *непрерывные и дискретные* математические модели.

*Непрерывные модели* служат для отображения непрерывных процессов в системе, описывают дифференцируемые процессы и используют непрерывные функции, системы дифференциальных и интегральных уравнений.

*Дискретные модели* отображают систему в определенный момент времени, описывают процессы, скачкообразно изменяющиеся через определенные промежутки времени и используют разрывные функции и разностные уравнения.

*По описываемым свойствам* различают: *статические, динамические и структурно-функциональные (агрегативные)* модели.

*Статические модели* служат для описания поведения объекта в какой либо момент времени. Эти модели часто называют структурными. Они отображают совокупность элементов, связи и пространственные отношения между ними, т. е. структуру системы.

*Динамические объекты* отображают поведение объекта во времени.

*Структурно-функциональные модели* описывают функционирование, движение, поведение системы, т. е. процесс изменения состояний с течением времени с учетом состава и структуры системы.

При разработке данных моделей выделяют множества возможных входных и выходных воздействий, а также определяют показатели свойств системы, характеризующие ее состояния. Затем устанавливают математические соотношения между выходными и входными воздействиями с учетом состояний системы. Данные модели используются, как правило, для исследования характера взаимодействия системы с окружающей средой, а также для выбора рациональных или оптимальных показателей отдельных ее свойств. Структурно-функциональные модели, также как и функциональные, описывают функционирование системы, но с учетом состава элементов, внутренних связей и взаимодействий между ними. Данные модели включают функциональные модели элементов и описание связей между ними.

Развитием структурного моделирования является *объектно-ориентированное моделирование*. Этот вид моделирования направлен на формализацию построения и исследования структур разного типа (иерархических, матричных, произвольных графов) на основе теоретико-множественных представлений.

*Информационные модели системы* – это совокупность информации, характеризующая существенные свойства и состояния исследуемой системы, ее входы, выходы, и позволяющая путем подачи на вход модели информации об изменениях входных величин системы моделировать ее возможные выходные состояния. В информационных моделях реальная система рассматривается как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, и моделируются связи между выходами и входами. Для построения информационной модели необходимо выделить исследуемую функцию реальной системы, формализовать эту функцию в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести данную функцию на имитационной модели.

*Ситуационные модели системы* – это модели, представляющие собой описание ситуаций, в которых предстоит функционировать исследуемой системе.

Следующий большой класс составляют *предметные модели* – материальные системы, которые имеют сходство по некоторым свойствам с моделируемой системой. В отличие от словесных и знаковых данный класс моделей воплощается не в виде слов и знаков, а в виде различных макетов или специальных технических средств.

*Предметные модели* включают следующие виды: *предметные модели внешнего подобия, физические, аналоговые и цифровые*.

*Предметные модели внешнего подобия* представляют собой различные статические макеты, отображающие внешние формы моделируемых систем. К ним относятся макеты зданий, транспортных средств, скульптуры, модели атомов и т. п. Макетирование применяется, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются физическому моделированию или могут предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных

макетов также лежат аналогии, обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в самом объекте.

*Физические модели* представляют собой динамические макеты или естественные системы, обладающие физическим подобием, т. е. сохраняющие полностью или хотя бы в основном природу моделируемой системы. В качестве физических моделей можно использовать испытательные стенды, тренажеры, действующие макеты различных технических устройств и систем.

Конструирование *аналоговых моделей* основывается на применении аналогий различных уровней. Для достаточно простых объектов наивысшим уровнем является полная аналогия. С усложнением системы используются аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько или только одну из сторон функционирования объекта.

*Аналоговые модели* представляют собой устройства, у которых соотношения между входными воздействиями и выходными реакциями могут быть описаны математическими выражениями, аналогичными математическим выражениям, описывающим такие же соотношения моделируемой системы. При аналоговом моделировании физика исследуемой системы не сохраняется (в отличие от физической модели), а моделирование основывается на изоморфизме математических соотношений, т. е. их способности описывать различные по своей природе явления. Модель и моделируемую систему в этом случае называют системами-аналогами.

*Цифровые модели* также представляют собой в определенном смысле системы-аналоги, фиксирующие и преобразующие математические выражения, которые описывают моделируемую систему дискретно с помощью набора цифр по специальным программам. Цифровые модели могут быть специализированными и универсальными.

*Специализированные цифровые модели* предназначены для описания и решения определенного вида математических соотношений, например, дифференциальных уравнений (цифровые дифференциальные анализаторы). Процесс ввода в эти модели величин, аналогичных входным воздействиям моделируемой системы, преобразования их и получения результатов, аналогичных выходным реакциям, представляет собой цифровое моделирование, основанное, так же как и аналоговое, на изоморфизме явлений, которые имеют разную природу. В качестве универсальной цифровой модели используется компьютер с введенной в него программой преобразования соответствующих переменных, описывающих поведение исследуемой системы.

Аналоговые и цифровые модели основаны, как правило, на использовании реализации математических выражений, и поэтому их также называют математическими моделями.

Одними из важнейших моделей являются *натурные модели*. В качестве натурной модели используется либо вся система целиком, либо ее части, при этом в систему не вносят специальных изменений и не создают специальных установок.

*Натурное моделирование* может проводиться как в системах, работающих в нормальных режимах, так и при других значениях входной информации, других

параметрах систем, в другом масштабе времени и т. д. Результаты натурального моделирования регистрируются, обрабатываются и обобщаются и затем используются для анализа или синтеза как моделируемой системы, так и других подобных систем. Натурное моделирование обеспечивает получение наиболее достоверных результатов, но его возможности ограничены материальными, финансовыми, человеческими, временными ресурсами, которые могут быть выделены на проведение исследований на реальной системе.

Для уменьшения степени влияния этих ограничений и повышения качества результатов моделирования во многих случаях осуществляется так называемое *комплексное моделирование*. Суть его заключается в одновременном использовании в процессе моделирования фрагмента реальной системы и имитационных моделей. Имитационная модель обеспечивает возможность «доведения» системы до полного состава, позволяет изменять значения входных воздействий и параметров системы в необходимых для достоверного исследования диапазонах.

Обычно различают два вида натурального моделирования: *научный и производственный эксперимент*.

*Цель научного эксперимента* – выявление общих закономерностей функционирования моделируемой системы, определение границ устойчивости процессов, протекающих в системе, возможность появления критических ситуаций, функциональных зависимостей параметров и характеристик системы и т. д.

*Цель производственного эксперимента* – получение обобщенных характеристик производственного процесса: производительности, энерго- и ресурсоемкости, надежности и т. д.

### **Контрольные вопросы**

1. Понятие модели и математической модели системы.
2. Моделирование и его этапы.
3. Принципы построения моделей, их краткая характеристика.
4. Какие подходы используются к построению моделей системы?
5. Классификация моделей системы по признаку полноты.
6. Классификация моделей системы в зависимости от формы реализации.
7. Классификация моделей системы по видам описываемых процессов.
8. Классификация моделей системы по описываемым свойствам.
9. Предметные модели.

## ЛЕКЦИЯ № 7. МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

1. Многоуровневое моделирование сложных систем.
2. Обобщенная модель элемента.
3. Классификация моделей элементов.

### 1. Многоуровневое моделирование сложных систем

В процессе анализа и синтеза сложных систем необходимо учитывать большое количество свойств, функций и структурных характеристик, в результате чего построение единой математической модели оказывается затруднительным и нецелесообразным. Поэтому при исследовании сложных систем используют множество различных концептуальных, математических и физических объектов, которые позволяют всесторонне раскрыть содержание системы.

Как правило, исследования начинают с построения наиболее общих моделей, позволяющих определить внешние характеристики системы и ее взаимодействие с окружающей средой, а затем осуществляют детализацию системы с последующим построением моделей и исследованием ее отдельных элементов, отношений, связей и взаимодействий между ними, анализируют структуру и поведение системы на уровне взаимодействующих элементов. При необходимости более детального исследования каждый элемент вновь подвергается делению и рассматривается как система, имеющая свои элементы и структуру. Такой принцип многоступенчатости моделирования и исследования, вытекающий из свойств иерархичности любой системы, широко применяется всеми исследователями.

Исследование сложной системы необходимо проводить на каждом уровне деления. На верхнем уровне сложная система может рассматриваться как элемент системы более высокого ранга и исследоваться «в целом» для определения ее внешних характеристик; на последующих уровнях деления будут изучаться различные подсистемы и элементы, выявление свойств которых позволит уточнить внешние характеристики системы.

Из рассматриваемых подходов к декомпозиции систем можно выделить два: *агрегирование и стратификацию*.

*Агрегирование* представляет собой процесс деления системы на отдельные элементы (*агрегаты*), между которыми устанавливаются определенные связи и взаимодействия. Каждый агрегат описывается динамической моделью, характеризующей его свойства. Таким образом исследование систем можно производить как на уровне отдельных агрегатов, так и в комплексе, рассматривая процессы их взаимодействия в системе. Отдельные агрегаты могут объединяться в подсистемы одного уровня, которые затем объединяются в подсистемы более высокого уровня, и т. д. Можно осуществлять обратное последовательное деление системы вплоть до ее элементов.

*Стратификация представляет собой процесс деления системы на отдельные страты (слои), каждая из которых характеризуется определенными признаками и совокупностью частных моделей.*

Данный подход к декомпозиции является более общим, так как позволяет формировать в пределах каждой страты самые различные модели, отличающиеся по физическим закономерностям и математическим зависимостям от моделей других страт.

Рассмотрим *общий подход к стратифицированному описанию сложных систем*. Система задается семейством моделей, каждая из которых описывает отдельные свойства системы с различной степенью абстрагирования. Данное семейство моделей разбивается на уровни, характеризуемые степенью общности описания системы и формальными языками, принятыми для отображения поведения системы на этом уровне. Такое иерархическое описание системы называется стратифицированным описанием, а уровни – стратами. *В дальнейшем вместо понятия «стратифицированное описание» будем использовать понятие «стратифицированная модель».* Таким образом, стратифицированная модель системы представляет собой множество частных моделей системы, разбитых на страты.

Страты и частные модели могут выбираться по различным признакам, поэтому возможно построение различных стратифицированных моделей одной и той же системы. Однако, при разработке всех этих моделей *необходимо придерживаться следующих общих принципов:*

- *выбор страт зависит от исследователя* и определяется целью исследования. Различные исследователи могут изучать разные свойства системы с той или иной степенью детализации, что определяет содержание и количество используемых страт, физические законы и математические зависимости, положенные в основу описания частных моделей;
- *физические закономерности и математические зависимости, положенные в основу разработки частных моделей на различных стратах, в общем случае не связаны между собой*, поэтому принципы и законы, используемые для характеристики системы на любой страте, в общем случае не могут быть выведены из принципов, используемых на других стратах;
- *требования к системе, формируемые в ходе моделирования на любой страте, выступают как условия или ограничения выбора частных моделей и предельных возможностей функционирования системы на нижележащих стратах.*

Например, если компьютер используется для обработки информации с конкретной скоростью и с ограниченным числом действий, то это определяет требования к ее элементной базе, а соответственно, и к частной модели. Этот принцип в основном используется в процессе моделирования проектируемых систем, когда необходимо последовательно принимать решения от общих требований к системе до ее конкретной реализации. Для выполнения всех требований к системе результаты моделирования на нижних стратах должны

быть согласованы с верхними. Это означает наличие в стратифицированных моделях обратной связи;

- на каждой страте имеется собственный набор терминов концепций, математических моделей, позволяющих более подробно изучить систему, переходя на нижерасположенную страту.

Подсистема на данной страте является системой для нижележащей страты и, в свою очередь, рассматривается как элемент для вышестоящей страты. На каждой страте осуществляется исследование структуры и взаимодействий между элементами соответствующих подсистем, в то время как внешние взаимодействия этих подсистем изучаются на вышестоящей страте. Конечно, в идеальном случае для получения оптимального решения необходимо рассматривать систему в целом на одном уровне с учетом всех ее элементов, внешних и внутренних взаимодействий. Однако это сделать невозможно ввиду сложности системы, многообразия ее свойств, показателей и вытекающих из этого различных методологических принципов исследования, приводящих к появлению многоуровневой модели;

- понимание системы возрастает при переходе от одной страты к другой: чем ниже мы опускаемся по иерархии, тем более детальным становится раскрытие системы; чем выше мы поднимаемся, тем яснее становится смысл и значение всей системы. Этот принцип становится следствием предыдущего принципа.

Действительно, на нижних стратах мы детально рассматриваем свойства и функционирование отдельных элементов системы, но не можем иметь представление о функционировании всей системы в целом, ее задачах и контуре системы более высокого ранга. При движении вверх по иерархии представление о системе расширяется, исследователь охватывает большое число подсистем и, как правило, большие периоды времени.

*Изложенные принципы используются при построении стратифицированной математической модели системы с учетом следующих особенностей:*

- при описании модели используются общесистемные понятия, которые являются концептуальной основой разрабатываемой математической модели;
- первой страте соответствует совокупность моделей, описывающих систему как элемент системы более высокого ранга;
- нижележащие страты включают модели элементов системы соответствующего уровня деления, а также модели отношений, связей, взаимодействий между ними, модели, описывающие структуру и движение системы на данном уровне.

Таким образом, для разработки стратифицированной модели системы необходимо иметь комплекс математических моделей элементов, отношений, связей и взаимодействий, а также построенных на этой основе моделей структур и функций, позволяющих всесторонне описать свойства и состояния системы.



## 2. Обобщенная модель элемента

Модель элемента с учетом его неделимости, взаимодействия с другими элементами, существования в пространстве и во времени должна характеризовать:

- влияние окружающей среды на элемент и элемента на окружающую среду;
- состояние элемента совокупностью доступных для наблюдения показателей его свойств;
- движение (функционирование) элемента путем описания или приближенного воспроизведения взаимосвязи его состояний с течением времени;
- предысторию развития элемента и ее влияние на его последующее движение.

Кроме того, модель должна обобщать широкий класс систем и позволять при определенных допущениях формировать различные частные модели.

В соответствии с перечисленными условиями в качестве обобщенной модели элемента целесообразно использовать абстрактную временную систему, у которой установлены входы, состояния и выходы с заданной степенью приближения, соответствующие реальному элементу (рис. 11).

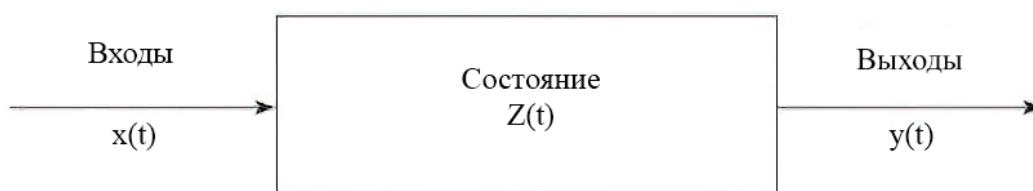


Рис. 11. Элемент системы

Каждый элемент может иметь определенное число входов, которое в общем случае может быть бесконечным. На все входы элемента в текущий момент времени поданы воздействия. Множество входных воздействий на элемент есть совокупность подмножеств воздействий на каждый вход элемента. Обозначим это множество мгновенных входных воздействий в виде

$$x = \{x_j\}, j = \overline{1, m},$$

где  $x_j$  – мгновенное входное воздействие, действующее на  $j$ -й вход элемента;  $m$  – число входов, которое в общем случае может быть бесконечным.

Входные воздействия  $x_j$  определены на множестве возможных значений  $X_j$ . Множество входных воздействий, которые могут действовать на элемент в течение всего времени его существования, можно определить, если брать различные комбинации их множеств.

Входные воздействия изменяются с течением времени, образуя входной процесс. Входной процесс можно задать, если каждому моменту времени

поставить в соответствие по определенному правилу входные воздействия. Обычно производят сужение входной функции на ограниченный интервал времени. Причем на каждом интервале времени могут быть установлены различные правила, по которым каждому моменту времени ставятся в соответствие значения входных воздействий.

Из множества всевозможных функций в соответствии с целью моделирования выбирается множество допустимых функций (входных процессов). Обычно к множеству допустимых функций предъявляется требование, чтобы две различные функции на соседних интервалах времени могли быть заменены одной функцией на суммарном интервале.

Состояние элемента в текущий момент времени можно характеризовать множеством мгновенных значений показателей его свойств. В каждом множестве показателей можно выделить подмножество значений показателей, при которых элемент сохраняет свои свойства, и подмножество значений показателей, при которых теряется некоторое свойство. Следовательно, элемент не выполняет заданные функции, переходит в другой элемент или разрушается.

Изменение состояний элемента происходит с течением времени, образуя движение. Это движение можно задать, если каждому моменту времени по определенному правилу поставить в соответствие его состояние, т. е. движение элемента будет представлять собой функцию состояний элемента от времени, причем эта функция может быть определена для отдельных интервалов времени. В некоторых случаях, когда движение рассматривается с произвольного момента времени, предшествующий отрезок называют начальным движением.

Множество упорядоченных пар состояний элемента и времени образуют график движения элемента. Иногда этот график называют *фазовой траекторией элемента* в фазовом пространстве «время – состояние». В процессе движения траектория в пространстве состояний в какой-то момент времени может выходить за пределы меры качества, т. е. в этот момент элемент теряет одно из существенных свойств, характеризуемых определенным показателем, а затем в другой момент времени может снова восстановить данное свойство.

Воздействие элемента на окружающую среду определяется выходными величинами. Выходные величины определены на множестве возможных значений на каждом выходе элемента. Выходные величины изменяются с течением времени, образуя выходной процесс.

### **3. Классификация моделей элементов**

Классификация моделей элементов в основном соответствует общей классификации моделей. *Рассмотрим некоторые особенности моделей элементов.* Число достаточно глубоко исследованных видов моделей элементов очень велико. Поэтому будем рассматривать отдельные, самые необходимые, как представляется, модели элементов.

*Модели с непрерывным и дискретным временем, бесконечным и конечным числом состояний.*

*Моделью элемента с непрерывным временем или непрерывной моделью* называется такая, у которой множество времени существования входных и выходных процессов есть множество всех вещественных чисел.

*Моделью с дискретным временем* (или дискретной моделью) называется такая модель, у которой аналогичное множество есть множество целых чисел.

Модель с бесконечным числом состояний описывает элементы, у которых показатели свойств являются непрерывными или счетными величинами, задаваемыми, как правило, на множествах вещественных и натуральных чисел. К данному классу моделей относятся, например, непрерывные модели, описываемые дифференциальными уравнениями.

Моделью с конечным числом состояний называется такая, у которой множество состояний конечно. Наиболее изученными моделями с конечным числом состояний являются конечные автоматы.

*Гладкие модели и конечные автоматы.* Гладкой называется модель, у которой множество входных воздействий, выходных величин и состояний есть нормированные (линейные) пространства, переходная и выходная функции непрерывны по всем аргументам. Гладкие модели, описывающие большой класс систем или элементов с помощью дифференциальных уравнений, отличаются большой глубиной, разработанной к настоящему времени теории и численных методов решения.

*Конечным автоматом* называется дискретная модель с конечным числом состояний, у которой множество входных воздействий, выходных величин и состояний есть точечные множества с целочисленными координатами. Конечные автоматы широко используются в процессе моделирования отдельных устройств компьютера и других логических задач.

*Модели с последствием и без последствий.* Моделью с последствием называют такую модель, в которой для определения ее дальнейшего поведения необходимо учитывать предысторию функционирования элемента в виде начального движения. Следует различать модели с последствием для гладких систем и конечных автоматов. Переходные функции конечных автоматов с последствием задаются с помощью таблиц переходов и булевых функций.

*Моделью без последствий* называется модель, у которой ее дальнейшее поведение определяется только ее состоянием в данный момент времени и входным процессом, начинающимся в этот же момент времени, и не зависит от предыстории поведения элемента, т. е. от того, каким образом элемент пришел в рассматриваемое состояние.

Большое количество физических задач, связанных с исследованием систем, сводится к рассмотрению и изучению гладких моделей без последствия, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями. Переходные и выходные функции автоматов без последствия описываются с помощью таблиц, графиков и булевых функций.

*Конечные автоматы с последствием* называют автоматами с памятью, так как их выходные величины в данный момент времени зависят от состояния автомата (памяти) в предыдущий момент времени.

Частным случаем конечных автоматов без последствия являются так называемые комбинационные схемы, или конечные автоматы без памяти, состояние которых будет определяться только входными значениями и выходные величины будут зависеть только от этих входных значений.

*Стационарные и нестационарные модели.* Модель называют *стационарной*, если вид ее функции переходов и функции выходов не меняется с течением времени. Поэтому движение модели будет зависеть только от ее начальных условий, задаваемых начальным движением и входным процессом, и не будет зависеть от того, когда мы начинаем исследование – в данный момент времени или в момент, сдвинутый на некоторый интервал, если в последнем случае также был осуществлен соответствующий сдвиг начальных условий.

Модель, для которой не выполняются вышеуказанные условия, называется *нестационарной*.

*Линейные и нелинейные модели.* Для определения линейных моделей используются понятия линейных пространств и линейных преобразований. При этом будем полагать, что все множества и функции, описывающие модель элемента, заданы на множествах вещественных чисел.

Множество называется *линейным пространством*, если на нем определены операции сложения элементов и умножения их на число (скаляр), удовлетворяющие принятым аксиомам.

*Модель называется линейной*, если множества входных воздействий, выходных процессов, состояний, начальных движений и выходных величин являются линейными пространствами. Если модель не удовлетворяет данным условиям, она является *нелинейной*.

Линейные модели используются значительно шире, чем нелинейные. Это объясняется двумя причинами: во-первых, моделируемые показатели свойств многих систем имеют линейный характер в определенных областях их изменения; во-вторых, детальное математическое исследование линейных моделей достаточно просто, в то время как анализ сложных нелинейных систем в ряде случаев оказывается невозможным.

Все вышеперечисленные виды моделей могут быть *детерминированными и стохастическими*.

*В детерминированных моделях* все величины, заданные на множествах значений, входящих в общую модель элемента, являются *неслучайными* величинами, а переходные и выходные функции – *неслучайными* функциями. В соответствии с этим входной процесс, движение и выходной процесс элемента будут *детерминированными* процессами.

*В стохастических моделях* отдельные или все величины, заданные на множествах, входящих в общую модель, представляют собой *случайные* величины, а переходные и выходные функции могут быть *случайными* функциями. Поскольку данный класс моделей очень широко используется в процессе моделирования и принятия решений на всех этапах жизненного цикла систем, рассмотрим более подробно применяемые в настоящее время различные виды стохастических моделей.

### *Виды стохастических моделей*

В зависимости от сочетаний случайных и неслучайных величин и функций можно выделить следующие виды моделей:

- со случайными входными процессами и неслучайными функциями переходов и выходов;
- с неслучайными входными процессами и случайными функциями переходов и выходов;
- со случайными входными процессами и функциями переходов и выходов.

*Модели со случайными входами.* В моделях со случайными входами входной процесс является случайным и представляет собой совокупность отдельных случайных процессов на каждом входе элемента. Сечение этого процесса в произвольный момент времени представляет собой систему случайных величин. Каждая случайная величина задается законом распределения в виде соотношения, устанавливающего связь между возможными значениями входных величин и соответствующими им вероятностями (ряд, функция, плотность распределения).

Система случайных величин задается совместным многомерным законом распределения. Случайный процесс преобразуется моделью элемента, в результате чего движение элемента и выходные переменные будут также случайными процессами. Процедура преобразования зависит от вида неслучайных функций переходов и выходов, а также от вида и характеристик входного случайного процесса. Эти признаки, по сути, и определяют разновидности стохастических моделей со случайными входами.

Различают следующие *виды случайных процессов*:

1. *Непрерывный процесс.* Этот процесс характеризуется тем, что любая ее реализация – непрерывная функция. В соответствии с этим областью определения входной функции является непрерывное время, и случайная входная величина в любом сечении функции принимает множество непрерывных значений.
2. *Дискретный процесс с непрерывным временем.* В этом случае множество значений случайных входных величин для любого времени есть множество целых чисел, а время непрерывно.
3. *Процесс с непрерывным множеством значений и дискретным временем (случайная последовательность).* В данном случае множество значений каждой входной случайной величины непрерывно, а время задано на множестве целых чисел.
4. *Дискретный процесс с дискретным временем.* Для этого процесса множество значений входных случайных величин есть множество целых чисел и время также задано на множестве целых чисел.
5. *Стационарный процесс.* Вероятностные характеристики этого процесса не меняются при любом сдвиге аргументов, от которых они зависят по оси времени. Этот процесс соответствует понятию стационарности функций. математическое ожидание и дисперсия стационарного случайного процесса являются постоянными величинами. Корреляционная функция, определяющая степень зависимости между двумя любыми сечениями

процесса, зависит от величины сдвига и не зависит от выбранного момента времени.

6. *Процесс со стационарными приращениями.* Этот процесс характеризуется тем, что совместный закон распределения разности двух случайных входных величин в двух различных моментах времени остается неизменным при одновременном сдвиге этих моментов времени.

7. *Процесс без последствия (Марковский процесс).* Случайный процесс  $f(t)$  называется процессом без последствий, или Марковским, если для любых  $k + 1$  моментов времени  $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < t_{k+1}$  условная функция распределения случайной величины  $f(t_{k+1})$  при фиксированных значениях  $f(t_0), f(t_1), \dots, f(t_k)$  зависит только от  $f(t_k)$ .

Таким образом, *характерное свойство Марковских процессов* состоит в следующем. Если точно известно значение процесса в настоящий момент времени, то будущее значение не зависит от прошлых значений.

*Точечный процесс* – это частный случай дискретного процесса с непрерывным временем. Этому процессу соответствует, как правило, случайный поток однородных событий, происходящих в случайные моменты времени. Величины  $f(t)$  будут определять случайное число событий, попавших в полуинтервал  $(1, t]$ . Ясно, что значения функции являются дискретными, принимающими только целочисленные значения, и могут лишь возрастать.

В процессе моделирования систем обычно *используются следующие виды точечных процессов:*

- простейший поток;
- потоки Эрланга;
- процесс восстановления.

*Простейший поток* является точечным процессом со стационарными приращениями, без последствий и ординарным. Применительно к потоку случайных событий стационарность приращений означает, что вероятность попадания того или иного числа событий на участок времени определенной длины зависит только от длины участка и не зависит от того, где расположен этот участок. Такой поток однородных событий называют стационарным. Для потока без последствия числа событий и непересекающихся интервалов времени – независимые случайные величины.

*Ординарность потока* означает, что вероятность попадания на достаточно малый участок двух или более событий пренебрежительно мала по сравнению с вероятностью попадания на этот участок одного события.

*Потоки Эрланга* образуются своеобразным «просеиванием» простейших потоков. *Различают потоки Эрланга первого, второго, порядков и более.* Эти потоки образуются следующим образом:

*Поток первого порядка* – путем исключения каждой второй точки (события) из простейшего потока;

*Поток второго порядка* – путем сохранения каждой третьей точки и исключения двух промежуточных;

*Поток k-го порядка* – путем сохранения каждой  $(k+1)$ -й точки и исключения  $k$  промежуточных.

*Процесс восстановления* соответствует потоку однородных событий, в котором интервалы между последовательными событиями взаимно независимы и распределены по некоторому закону, в общем случае отличающемуся от экспоненциального. Иногда процесс восстановления называют рекуррентным потоком однородных событий или потоком Пальма. В отдельных случаях рассматривают другие, более сложные, процессы восстановления, которые имеют другие законы распределения.

*Модели со случайными переходами.* В моделях со случайными переходами переходная и выходная функции, характеризующие свойства моделируемого элемента, являются случайными функциями. При этом входной процесс может быть детерминированным. Движение и выходной процесс будут случайными процессами вследствие случайности переходной и выходной функций. При этом процесс функционирования элемента будет описываться переходной функцией, которая будет иметь многомерную плотность распределения.

Задавать такую многомерную плотность очень сложно и практически нецелесообразно. Поэтому на практике используются процессы без последствия. Подобные случайные процессы относятся к классу Марковских процессов.

Различают также непрерывные и дискретные Марковские процессы, Марковские случайные последовательности и Марковские цепи, представляющие собой дискретные процессы с дискретным временем.

### **Контрольные вопросы**

1. Многоуровневое моделирование сложных систем.
2. Обобщенная модель элемента.
3. Классификация моделей элементов.
4. Агрегирование и стратификация, определения и характеристика.
5. Общие принципы разработки различных стратифицированных моделей.
6. Особенности построения стратифицированной математической модели.
7. Требования к модели элемента.
8. Модели с непрерывным и дискретным временем, бесконечным и конечным числом состояний.
9. Гладкие модели и конечные автоматы.
10. Модели с последствием и без последствия.
11. Стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные модели.

## ЛЕКЦИЯ № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

1. Определение и формирование жизненного цикла.
2. Структура жизненного цикла.
3. Классификация жизненных циклов.
4. Система управления жизненным циклом.

### 1. Определение и формирование жизненного цикла

Понятие «цикл» несет в себе несколько смысловых нагрузок, оно отражает:

- законченность определенного процесса предполагаемым результатом;
- повторяемость определенных процессов развития;
- передачу информации, «памяти» системы от одного поколения результатов к другому;
- замкнутость упорядоченность составных частей процесса, стадий.

Под теорией циклов понимается системная теория, исследующая закономерности в формировании структуры циклов в процессах «жизни» различного типа систем живой и неживой природы. *Цикл* – это повторяющийся законченный замкнутый процесс, переводящий цель, замысел, потребность в определенный результат, продукцию, предмет потребности.

Ориентированность на конечный результат цикла составляет содержание принципа целевого подхода к построению информационного представления цикла исследований и разработок. Фаза цикла связана с определенным временным разделением цикла, его стадийностью. Как правило, первой фазой цикла является цикл нижнего уровня, т. е. цикл подсистемы первого уровня.

Оценка фазы как цикла связана с проверкой наличия таких признаков цикла, как конечность и завершенность, повторяемость. Цикл характеризуется повторяемостью за определенный промежуток времени взаимосвязанных стадий. Время (длительность) цикла – характеристика, определяющая временную масштабность цикла. Временная масштабность цикла одновременно определяет временную структуру, «временной спектр» процессов, соответствующих систем-носителей указанных циклов и соответственно их «временную инерцию». Носителем цикла является непосредственно та система, системообразующим фактором которой является продукция цикла.

Правильная соотношенность цикла и системы-носителя – один из важнейших принципов анализа и проектирования сложных систем и комплексов. Например, носителем проектного цикла объекта  $N$  является проектная система, непосредственно осуществляющая проектирование объекта (проектирующая система). Носителем «цикла жизни» любого материального или идеального объекта, создаваемого человеком, является система, объединяющая в себе проектную, производственную и эксплуатационную или потребительские системы. Циклы определяют временной ритм, цикличность функционирования систем-носителей:



- проектные циклы – временной ритм функционирования соответствующих проектных систем;
- производственные циклы – временной ритм функционирования соответствующих производственных систем (производственных организаций);
- жизненные циклы объектов техники – временной ритм функционирования соответствующих технических систем.

Процессы изменения, развития объекта цикла являются одновременно процессами становления, формирования и реализации соответствующей системной эффективности. Одновременно эти процессы отражают трансформацию потребности  $\Pi$  в результат:

$$\Pi \rightarrow R_e \leftrightarrow R_{\Pi} \rightarrow R_{Re},$$

где  $R_e$  – результат;  $R_{\Pi}$  – прогнозируемая эффективность;  $R_{Re}$  – реальная эффективность.

При определении жизненного цикла технической или другой создаваемой человеком системы используются понятия состояния и движения системы. Система от момента замысла до окончания существования (снятия с эксплуатации, расформирования, описания, утилизации и т. п.) принимает ряд состояний, причем переход ее из одного состояния в другое осуществляется путем выполнения различных работ в ходе взаимодействия с окружающей средой и внутренних взаимодействий между элементами системы. Если теперь развернуть во времени совокупность состояний системы и работ, обеспечивающих переход из одного состояния в другое, то получится жизненный цикл системы.

Таким образом, *жизненный цикл (ЖЦ)* – упорядоченная во времени совокупность состояний системы и работ (процессов), обеспечивающих изменение состояний от момента замысла системы до окончания ее существования. Один из возможных вариантов формирования ЖЦ системы можно представить следующим образом. ЖЦ формируется под воздействием окружающей среды в результате синтеза (соединения) трех составляющих: материальных объектов (материалов), информации и энергии (рис. 12).

*Материальные объекты* – это различные элементы, устройства, подсистемы и оборудование, входящие в состав системы. При формировании человеко-машинных систем к материальным объектам можно отнести людей, рассматриваемых как элемент системы.

Под *информацией* понимаются сведения о материальных объектах, требуемых для создания системы, о связях между ними и окружающей средой, о порядке взаимодействия элементов системы и другие необходимые данные.

*Энергия* – это совокупность воздействий окружающей среды на систему, осуществляемых с целью ее организации на основе имеющихся материальных объектов и информации. В свою очередь, в процессе развития и функционирования системы окружающая среда получает от системы:

- материальные объекты (производимую продукцию, отходы);
- информацию о ее параметрах и результатах функционирования;

- энергию – ответное воздействие системы (производимую энергию, различные излучения, шумы, механические воздействия и др.).



Рис. 12. Формирование жизненного цикла системы

Процесс формирования всех состояний системы путем синтеза трех указанных составляющих тесно связан с учетом и раскрытием неопределенности. То есть с постепенным накоплением сведений о системе и в соответствии с этим зарождением системы из равновероятной, в предельном случае хаотической, смеси различных материальных объектов и сведений об аналогичных системах, а также изучения нормативно-правовых документов, во многом определяющих облик будущей системы. Начальному моменту времени  $t_0$ , когда только возникает предварительный замысел о создании системы, соответствует состояние  $S_0$  с высоким уровнем неопределенности  $H = H_{max}$ .

Материальные объекты  $M$ , требуемые для создания системы, находятся в разобщенном виде, информация о системе  $I = I_{min}$  представляет собой весьма неопределенную мысленную модель, а энергетические затраты  $\mathcal{E}$  фактически равны нулю, не считая затрат на формулировку цели создания и общих требований к системе. После окончательного принятия решения о создании системы и формировании уточненных требований к ней к моменту времени  $t_1$  уровень неопределенности падает, и система принимает состояние  $S_1$ , представляющее собой описание требований к разрабатываемой системе. Промежуточные состояния  $S_0$  и  $S_1$  формируются, как правило, с помощью информации, поступающей от окружающей среды с небольшими косвенными затратами материалов и энергии, в основном на проведение расчетов и экспериментов по обоснованию характеристик системы.

При проектировании системы продолжает накапливаться информация  $I$  и при достижении требуемого уровня к моменту времени  $t_2$  утверждается окончательный вариант проекта в виде конструкторской документации для изготовления опытного образца (состояние  $S_2$ ). При этом начинает формироваться материальная часть системы, увеличиваются непосредственные энергетические затраты на ее создание (разработка и испытание различных устройств, подсистем, вариантов опытного образца).

В процессе изготовления средств системы в основном заканчивается формирование ее материальной части при высоких энергетических затратах, возрастает информация и уменьшается неопределенность (состояние  $S_3$  к

моменту времени  $t_3$ ). В ходе эксплуатации средств системы и применения ее по назначению продолжает возрастать суммарное потребление энергии, несколько снижается рост материальных затрат, продолжает накапливаться информация, необходимая для функционирования, доработок и технического обслуживания средств системы, соответственно уменьшается уровень неопределенности. При этом система испытывает энергетические и информационные воздействия окружающей среды, приводящие к ее разрушению и деградации (физическое старение) или неспособности выполнять дополнительные требования (моральное старение). В итоге наступает состояние  $S_m$  к моменту времени  $T$ , когда система снимается с эксплуатации. Этому моменту соответствуют максимальная информация о системе, максимальные суммарные энергетические и материальные затраты.

Системы создаются людьми и так же, как люди, рождаются, живут и умирают. Жизнь системы может быть и длиннее, и короче жизни ее создателя. Система понятий, представлений, жизненного опыта и навыков отдельного человека умирает вместе с ним, если он не позаботится о передаче своих знаний и опыта потомкам. Даже системы научных знаний, кристаллизующие обобщенный универсальный опыт нескольких поколений, достигнув своего расцвета, исчезают почти бесследно, уступая место новым системам. Если системам знаний угрожает только новое знание, то судьба материальных систем подчинена суровым законам реального мира: им приходится непрерывно бороться с разрушением тех материалов, из которых они сделаны.

Материальное воплощение системы не является начальным этапом – это логическое завершение пути ее развития, без которого система осталась бы чисто умозрительной конструкцией. Одновременно материализация служит мощным толчком возникновения новых идей, дающих жизнь новым системам.

Таким образом, жизнь системы протекает по замкнутому кругу, в чередовании этапов идеального – в виде идей или знаний – и материального существования (для развития системы уместнее использовать образ спирали, что, однако, не изменяет последовательности основных этапов жизненного цикла системы). С момента возникновения новой идеи в голове одного человека или группы людей начинается идеальный цикл жизни системы. Вначале идея может быть довольно смутной, может не получить признания, что обычно объясняется отсутствием ясно выраженных, назревших потребностей, связанных с ее использованием.

Полное время цикла складывается из временных затрат каждой его фазы. Затягивание процессов проектирования и строительства может поставить систему в условия, когда самая высокопроизводительная эксплуатация не сможет компенсировать потерю эффективности. Чтобы исследовать зависимость эффективности системы от характера и длины ее жизненного цикла, используют развертку «круга жизни», или «спирали развития», системы в тех или иных координатах. Рассмотрим вначале развертку жизненного цикла в экономических координатах «время – стоимость». Реальный цикл экономической жизни системы можно разделить на четыре этапа.

*На первом этапе* (строительство или изготовление системы) кривая экономического эффекта падает вниз, отражая нарастающие затраты на создание системы. С момента ввода в строй объекта строительные затраты сменяются эксплуатационными, к которым со временем добавляются затраты на ремонт, замену и обновление элементов системы. С этого же момента начинается отдача возможных средств за счет экономической оценки обществом результатов деятельности системы – кривая эффекта начинает подниматься вверх.

*Второй этап жизни системы* заканчивается в тот момент, когда сумма накопленного экономического результата работы системы сравнивается с суммой всех сделанных затрат (точка пересечения кривой оси времени), т. е. когда будут возвращены вложенные средства. Длительность этого этапа называется сроком окупаемости. Следует отметить, что срок окупаемости отражает лишь часть общего времени жизненного цикла системы. Однако два первых этапа жизненного цикла, даже взятые в совокупности, еще не определяют эффективности системы. С экономической точки зрения в тот самый момент, когда заканчивается срок окупаемости, система и приобретает интерес для её создателей. Только с этого момента она начинает вносить свой вклад в развитие экономики, способствовать процессу экономического роста.

*Начинается третий этап*, в котором созданный объект вносит свой вклад в экономику, способствует росту производительности труда. Именно в этот период система дает обществу средства сверх возмещения затрат. Теоретически этот период жизни системы неограничен, однако на практике физический и моральный износ оборудования, изменение структуры общественных потребностей, возрастающие требования к качеству ставят жесткие границы целесообразности существования системы. Поэтому существует определенный срок, за который система успевает внести весомый вклад в развитие народного хозяйства и в интересах этого развития должна уступить место более совершенным системам.

В это время *начинается последний, четвертый, период*, когда отдача системы постепенно падает. В итоге это приводит к тому, что система ложится грузом на экономику и во избежание излишних затрат должна быть своевременно и поэтапно ликвидирована.

Разумеется, граница между третьим и четвертым этапами жизненного цикла чисто условна. Определяется она достаточно точно: для этого нужно сопоставить кривую экономического эффекта системы с эталонной кривой, характеризующей средний по народному хозяйству темп экономического роста. Когда кривая экономического эффекта системы вторично пересекает эталонную кривую роста, «отставая» от нее, эффективность системы становится меньше, чем в среднем по народному хозяйству. Следует отметить, что экономическая развертка жизненного цикла не является единственно возможной.

## 2. Структура жизненного цикла

Для целенаправленного исследования ЖЦ с использованием существующих научных теорий и методов множество состояний системы, формируемых в процессе ее создания и применения, разбивают на подмножества по различным признакам, например:

- подмножество состояний на начальном этапе проектирования, когда система еще не имеет материального воплощения и описывается только с помощью концептуальных и математических моделей, используемых для ее исследования на этом этапе;
- подмножество состояний, когда система уже воплощается в виде физических моделей ее отдельных устройств или опытного образца на этапах изготовления и испытаний;
- подмножество состояний, принимаемых системой в процессе ее функционирования и т. д.

Целесообразной является группировка состояний по временному признаку – по стадиям и этапам, а также по работам, выполняемым на каждой стадии в процессе разработки и применения системы. В соответствии с этим иерархическую структуру ЖЦ представим в виде, изображенном на рисунке 13.

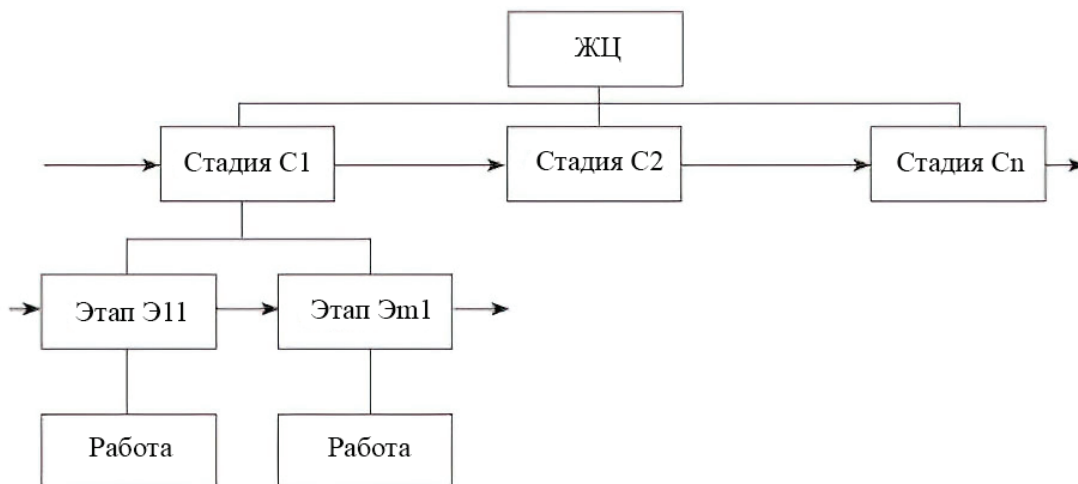


Рис. 13. Общая структура жизненного цикла

ЖЦ включает стадии  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , каждая из которых включает этапы. Например, в составе стадии  $C_1$  входят этапы  $\text{Э}11, \dots, \text{Э}m1$ , которые, в свою очередь делятся на работы. Возможно последующее деление работ на отдельные операции и т. д. В настоящее время нет общепринятых обозначений и наименований стадий, этапов и работ ЖЦ всех создаваемых систем.

Часто ЖЦ сложной системы представляется следующими стадиями:

$C_1$  – выбор облика системы;

$C_2$  – проектирование системы;

С3 – изготовление элементов системы;

С4 – эксплуатация системы, включая поэтапное снятие с эксплуатации элементов системы и их утилизацию;

С5 – непосредственное применение системы.

Содержание перечисленных этапов сводится к следующему.

С1 – *выбор облика системы*. Этот этап начинается с замысла (формирования концепции), осознания потребностей в развитии или замене существующих технических систем, в связи с расширением и изменением характера задач или созданием принципиально новых систем на базе новых открытий либо изобретений.

Замысел формируется рядом действий, основными из которых являются следующие:

- анализ новых задач и выявление требований к системам, предназначенным для решения задач;
- выдвижение первоначальных тактико-технических требований к новым техническим системам, связанных с поставленными задачами и прогнозируемыми на ближайший период достижениями науки, техники и производства;
- поиск научных и технических принципов решения новых задач;
- разработка нескольких вариантов первоначального проекта в целях выявления «облика» технических систем, основных взаимосвязей ее элементов, путей решения важных технических проблем и определения необходимых ресурсов для создания и функционирования такой системы;
- исследование эффективности и оптимизация ее параметров при выборе предпочтительного варианта.

Конечным результатом замысла являются предложения или рекомендации по решению изучаемой проблемы в виде характеристик системы, объема и источников ресурсов для ее разработки и функционирования, а также оценка сроков ее создания и эксплуатации. Для выбора оптимальной системы требуется разработка нескольких принципиально различных вариантов технической системы, отвечающих единому замыслу. Основная задача – определение типа каждого элемента системы на основе анализа соответствия целей, поставленных перед системой, и её характеристик.

В результате этого можно предположить, что цели создания системы и ее общие характеристики также должны формироваться на данной стадии. Стадия включает этапы и работы, направленные на решение поставленной задачи. Для выполнения этапов и работ используются методы анализа систем с широким привлечением методов экспертных оценок и прогнозирования. Результатом работ стадии являются общие требования к системе и последующим стадиям ЖЦ. Значительное влияние на формирование облика системы оказывают нормативно-правовые документы.

С2 – *проектирование*. Основная задача – определение конкретных параметров каждого проектируемого элемента, исходя из оценки эффективности системы в целом в интересах разработки проектно-конструкторской

документации. Стадия включает ряд этапов, обеспечивающих решение данной задачи. Для большинства создаваемых систем выделяются следующие этапы проектирования:

Э21 – разработка эскизного проекта;

Э22 – разработка технического проекта;

Э23 – разработка рабочего проекта или рабочей конструкторской документации.

Для выполнения этапов и работ стадии используются методы проектной эффективности с привлечением методов системного анализа, математических методов исследования операций и других системных направлений исследования. Работы стадии выполняются головными проектно-конструкторскими организациями и организациями, проектирующими отдельные элементы системы. Результатом проектирования является проектно-конструкторская документация, используемая для изготовления элементов системы.

*С3 – изготовление.* Основная задача – создание элементов системы, соответствующих требованиям конструкторской документации при ограничениях на используемые материальные ресурсы и время в условиях конкретной производственной базы. Для серийно проводимых элементов стадия может включать следующие этапы:

Э31 – постановка на производство;

Э32 – серийное производство;

Э33 – поставка элемента эксплуатирующим организациям.

При выполнении этапов и работ стадии используются методы исследования производственных процессов (планирования и организации разработок, технико-экономического анализа, надежности и т. п.). Работы стадии выполняются заводами-изготовителями совместно с проектно-конструкторскими организациями, разрабатывающими элементы системы.

*Основная задача С4 – обеспечение работоспособности элементов системы.* Стадия может включать следующие чередующиеся этапы:

Э41 – ввод в эксплуатацию;

Э42 – приведение в готовность;

Э43 – поддержание в готовности;

Э44 – снятие с эксплуатации и утилизация.

При выполнении этапов и работ стадии используются методы исследования операций, методы теории эксплуатации и надежности сложных систем и др. Работы стадии в основном выполняются организациями, занимающимися техническим обслуживанием и ремонтом средств систем при научно-техническом сопровождении организациями-разработчиками или фирмами-интеграторами.

*С5 – применение.* Основная задача – определение вариантов наилучшего использования элементов системы в конкретной сложившейся обстановке. Данную стадию можно разделить на два этапа:

Э51 – подготовка к применению;

Э52 – непосредственное применение по назначению.

Для решения поставленной задачи используются методы исследования эффективности применения элементов в составе системы и планирования операций. Стадия реализуется организациями, применяющими системы по назначению, для которых, собственно, и создаются технические системы.

Возможны и другие варианты деления ЖЦ произвольной сложной системы на стадии и этапы, которые будут рассмотрены несколько позже.

Рассмотренное позволяет сделать общий вывод о том, что жизненный цикл включает упорядоченную во времени последовательность стадий, этапов и работ, между которыми существуют определенные связи, отношения и взаимодействия. В итоге он представляет собой сложную систему, для исследования которой можно использовать основные понятия и закономерности общей теории систем. ЖЦ обладает системными свойствами. Ему присуща целостность, обуславливающая необходимость комплексного рассмотрения всех стадий и этапов при изучении интегративных свойств ЖЦ. Он имеет иерархическую структуру и может подвергаться делению на стадии, этапы, работы, вплоть до элементарных операций, выполняемых в процессе создания и функционирования системы.

ЖЦ обладает эквивиальностью, т. е. имеет предельные значения своих показателей, характеризующих затраты на создание и эксплуатацию системы, сроки ее разработки, эффективность в процессе применения, продолжительность всего периода существования системы. ЖЦ присуща также историчность, выражающаяся в том, что при создании и эксплуатации последующих систем учитывается опыт, приобретенный в процессе формирования ЖЦ предшествующих аналогичных систем. Он обладает коммуникативностью, так как процесс его формирования осуществляется в ходе непрерывного взаимодействия с окружающей средой.

*ЖЦ имеет следующие характеристики и особенности:*

- элементами жизненного цикла являются отдельные стадии, этапы и работы, рассматриваемые на соответствующих уровнях иерархии;
- между элементами ЖЦ существуют информационные и материальные связи, причем информация и материальные объекты, получаемые на предыдущих стадиях и этапах, используются для формирования последующих стадий и этапов;
- между элементами жизненного цикла существуют отношения подчинения;
- цели, достигаемые на каждой из стадий низшего иерархического уровня, подчинены целям стадий более высокого уровня;
- стадии и этапы ЖЦ имеют суперпозицию во времени, поэтому продолжительность ЖЦ не равна сумме продолжительности его стадий и этапов.

Длительность цикла современных систем зависит от типа и специфики системы. Например, для многих сложных технических систем время от стадии фундаментальных и поисковых исследований до производственной и коммерческой реализации составляет 10 – 15 лет. По статистическим данным, время выполнения фундаментальных научно-исследовательских работ составляет 4 – 5 лет, а прикладных – 3 года. Эти оценки являются весьма



приблизительными, но подчеркивают их довольно существенные величины и нацеливают на необходимость их сокращения. Продолжительность работ по созданию новых видов технических систем сокращается медленно. Оптимизация полного ЖЦ системы может привести к уменьшению этих сроков, а, следовательно, и к сокращению соответствующих полных затрат.

Большие сложные системы состоят из большого количества разнотипных, пространственно-разнесенных подсистем, звеньев и других средств, выполняющих различные функции, имеющих разнообразные связи и отношения между собой. Отдельные подсистемы могут автономно решать целый ряд задач и имеют возможность наращивания путем ввода в строй новых элементов и функций.

### **3. Классификация жизненных циклов**

Жизненные циклы целесообразно классифицировать: по полноте, числу очередей разработки и внедрения систем, уровням сложности систем, виду разрабатываемых систем и продолжительности.

*По полноте* различают полные и усеченные ЖЦ, которые, в свою очередь, делятся на ЖЦ уникальных и бракованных систем.

*Полные ЖЦ* содержат все стадии разработки, серийного производства, эксплуатации, применения, снятия с эксплуатации и утилизации систем или их элементов. Они характерны для новых технических изделий и систем серийного производства.

*ЖЦ уникальных систем* не содержат стадий серийного производства, так как работы по изготовлению в них выполняются в процессе создания опытного образца, который для данных систем является единственным.

*ЖЦ бракованных систем*, т. е. систем, которые по каким-либо причинам сняты с разработки, могут не содержать стадий и этапов производства и применения.

*По числу очередей* можно выделить ЖЦ одной очереди и много очередные. *ЖЦ одной очереди* имеет определенные границы и последовательность однократно выполняемых этапов по разработке, внедрению и эксплуатации системы. Такие ЖЦ характерны для относительно несложных пространственно сосредоточенных изделий и систем.

*Многоочередные ЖЦ* включают первую очередь разработки и опытной эксплуатации основной части системы, а затем с определенным сдвигом вторую, третью и последующие очереди. Такой подход позволяет на основе опыта разработки и эксплуатации первой очереди исключить возможные дефекты и обеспечить последовательное эволюционное развитие подсистем последующих очередей и системы в целом. Многоочередной ЖЦ характерен для сложных территориально распределенных систем связи и передачи данных, информационно-вычислительных систем, больших автоматизированных систем управления и других подобных систем.

*Многоочередные ЖЦ* могут иметь несколько моделей.

*Каскадная модель.* Каскадная модель ЖЦ системы предусматривает поэтапное выполнение всех работ проекта в строгой логической последовательности. Переход на следующий этап осуществляется после полного выполнения и документального оформления всех предусмотренных работ предыдущего этапа. Требования к системе, определенные на начальной стадии разработки, строго документируются в виде технического задания и фиксируются на все время разработки проекта. Каскадная модель имеет положительные стороны:

- на каждом этапе формируется законченный набор проектной документации;
- выполняемые в логической последовательности этапы работ позволяют планировать сроки их завершения и соответствующее финансирование.

Каскадная модель подходит при создании относительно простых систем, когда в самом начале разработки можно достаточно точно и полно сформулировать все требования к вновь создаваемой или совершенствуемой системе. Однако неточность какого-либо требования или некорректная его интерпретация в результате приводит к тому, что приходится возвращаться к предыдущим этапам и уточнять или пересматривать ранее принятые решения. Требуемая переработка часто приводит к качественному росту затрат и, не исключено, к прекращению проекта в той форме, в которой он изначально задумывался. Кроме того, поскольку требования к системе зафиксированы в виде утвержденного технического задания на время создания системы, пользователь получает систему, не полностью удовлетворяющую его реальным требованиям.

Таким образом, каскадная модель для крупных проектов мало реалистична и может быть эффективно использована только для создания небольших систем.

*Итеративная модель.* Альтернативой каскадной модели является так называемая модель итеративной и инкрементальной (пошагово увеличивающейся) разработки. Модель предполагает разбиение жизненного цикла проекта на последовательность итераций, каждая из которых напоминает «мини-проект», включая все процессы разработки в применении к созданию меньших фрагментов функциональности по сравнению с проектом в целом.

Цель каждой итерации – получение работающей версии системы, реализующей функции всех предыдущих и текущей итерации. Результат окончательной итерации реализует все функции системы. Таким образом, с завершением каждой итерации система получает приращение – инкремент – к ее возможностям, которые, следовательно, развиваются эволюционно. Вероятность успешного создания сложной системы будет максимальной, если она реализуется в серии небольших шагов и если каждый шаг включает в себе четко определенный успех, а также возможность «отхода» к предыдущему успешному этапу в случае неудачи. При этом разработчики получают возможность оценивать результаты каждого этапа и исправлять возможные ошибки в проекте.

Итеративное наращивание имеет целью повышение гибкости системы и обеспечение возможности адаптировать ее к меняющимся требованиям к проекту.

Итеративная модель не предполагает полного объема требований для начала работ создания системы. Разработка может начинаться с требований к части функций системы, которые могут впоследствии дополняться и изменяться. По результатам каждой итерации принимается решение о том, насколько будут использованы ее результаты для дополнения реализованных функций в качестве входной точки для начала следующей итерации. В конечном счете достигается точка, в которой все требования будут воплощены в системе.

*Таким образом, преимуществами итеративного подхода являются:*

- раннее создание работающего фрагмента системы;
- гибкость – готовность к изменению требований на любом этапе разработки;
- снижение воздействия рисков на ранних стадиях проекта, что ведет к минимизации затрат на их устранение;
- наличие постоянной связи разработчиков с потребителем (заказчиком), что обеспечивает создание системы, отвечающей их потребностям;
- акцент усилий на наиболее важные и критичные направления проекта;
- возможность использования накопленного опыта;
- постоянная оценка текущего состояния проекта и, как следствие, большая уверенность заказчиков и непосредственных участников в его успешном завершении.

*Итеративная модель имеет и отрицательные стороны:*

- отсутствие целостного понимания возможностей и ограничений проекта на его первоначальных этапах;
- наличие вероятности отбрасывания части ранее выполненной работы;
- снижение добросовестности специалистов при выполнении работ из-за возможности все переделать и улучшить позже.

Различные варианты итеративного подхода реализованы в большинстве современных методологий разработки (RUP, MSF, XP).

*Спиральная модель.* Спиральная модель является развитием идеи итераций ЖЦ системы. Название «спиральная» эта модель получила из-за изображения хода работ в «полярных координатах», в которых угол соответствует выполняемому этапу (итерации), а удаление от начала координат – затраченным ресурсам.

При использовании этой модели система разрабатывается в несколько итераций (витков спирали). На каждой итерации создается фрагмент или версия системы. Спиральная модель предлагает каждую итерацию начинать с выделения целей и планирования очередной итерации, определения основных альтернатив и ограничений при ее выполнении, их оценки, а также оценки возникающих рисков и определения способов избавления от них, а заканчивать итерацию оценкой результатов, проведенных в ее рамках работ. Основным ее новым элементом является общая структура действий на каждой итерации – планирование, определение задач, ограничений и вариантов решений, оценка предложенных решений и рисков, выполнение основных работ итерации и оценка их результатов. Отличительная особенность спиральной модели состоит

в том, что специальное внимание уделяется рискам, влияющим на организацию ЖЦ, и контрольным точкам. При реализации сложных систем наиболее распространены следующие риски:

- нехватка квалифицированных специалистов;
- недостаточность финансирования и нереалистичность сроков;
- ошибки в постановке задач;
- ненужная детализация;
- изменение требований;
- недостаток необходимой информации;
- несоответствие получаемых характеристик системы предусмотренным требованиям и т. д.

Основной проблемой спиральной модели является определение момента перехода на следующий этап. Для ее решения вводятся временные ограничения на каждый из этапов ЖЦ, и переход осуществляется в соответствии с планом, даже если не вся запланированная работа закончена.

Планирование производится на основе статистических данных, полученных в предыдущих проектах, и личного опыта разработчиков. Определение числа и содержания очередей – сложная задача, решаемая по-своему для каждой конкретной системы. При определении облика каждой очереди создаваемой системы необходимо учитывать финансовые, производственные, строительные, кадровые ограничения, с одной стороны, а также необходимость получения определенного эффекта от внедрения системы в возможно короткие сроки – с другой. Для сложных систем наметился только общий подход, который состоит в следующем:

- на первой стадии создания системы разрабатываются общие требования к ней, выделяются очереди разработки и внедрения и формируются требования к первой очереди системы;
- в процессе реализации первой очереди уточняются требования на вторую очередь и начинается ее разработка и т. д. Сдвиг во времени между очередями определяется спецификой системы. Он должен составлять не менее одного этапа ЖЦ, а в некоторых случаях начало работ следующей стадии возможно только после опытной эксплуатации и внедрения подсистемы предыдущей очереди.

*По уровню сложности систем целесообразно рассматривать ЖЦ:*

- *первого уровня* – материалы, несложные детали, которые лежат в основе построения систем последующих уровней;
- *второго уровня* – устройства, приборы, которые лежат в основе построения систем последующих уровней и создаются с использованием существующих и вновь разрабатываемых элементов первого уровня;
- *n-го уровня* – многоуровневые сложные системы, состоящие из существующих или вновь разрабатываемых элементов и систем нижестоящих уровней.

Таким образом, ЖЦ *n*-го уровня содержит полностью или частично ЖЦ существующих или вновь разрабатываемых систем нижестоящих уровней.

В настоящее время нет общего подхода к определению количества и содержанию уровней систем. Обычно в сложных технических системах выделяют до четырех-шести уровней по конструктивному или функциональному признаку.

По виду разрабатываемых систем различают ЖЦ технических и человеко-машинных систем. Работы каждой стадии и этапа *ЖЦ технической системы* направлены, в основном, на проектирование, изготовление и эффективную эксплуатацию системы. Человек в этих системах не рассматривается как отдельный элемент, и его роль сводится, в основном, к применению созданной технической системы по назначению и поддержанию ее в исправном состоянии. Причем отдельные технические системы могут в течение длительного времени выполнять свои функции без участия человека.

В *человеко-машинных системах* человек является основным элементом системы и, как правило, выполняет главные функции с использованием технических средств и других видов обеспечения функционирования системы. Отсюда вытекает важность организационных и эргономических факторов на всех этапах жизненного цикла такой системы (определение рациональной численности личного состава, степени подготовки операторов, их функциональных обязанностей, условий работы, оборудования рабочих мест и др.). Большое значение имеет разработка алгоритмов и правил восприятия и переработки информации людьми, работа их с документами, взаимодействие с техническими средствами. Особое значение имеет подготовка людей для работы по этим алгоритмам и правилам (разработка должностных инструкций, обучение, тренировка, контроль работы). Данные особенности обуславливают отличие содержания стадий и этапов ЖЦ человеко-машинной системы от технической системы.

По продолжительности можно выделить *конечные ЖЦ*, когда рассматриваются все состояния системы, начиная от замысла и до окончания существования, и *развивающиеся ЖЦ*, характерные для развивающихся классов систем. К таким развивающимся системам можно отнести элементную базу, транспорт, парк ЭВМ, средства телекоммуникаций и связи, АСУ и другие системы, эволюция которых осуществляется с развитием человеческого общества. Каждый развивающийся ЖЦ включает последовательности конечных ЖЦ отдельных подсистем с чередующимися участками их эволюционного развития и революционными скачками.

Каждому этапу эволюционного развития соответствует одно поколение системы, после революционного скачка следует другое поколение и т. д. Начальному этапу создания такой развивающейся системы соответствует высокий уровень неопределенности, так как разработчик и пользователь имеют очень мало информации о наиболее эффективных путях и методах построения и применения системы. Отсутствие такой информации объясняется недостаточным уровнем развития самой системы. По мере создания и применения отдельных образцов подсистем первого поколения в течение их ЖЦ накапливается информация, система совершенствуется и неопределенность падает. Однако на определенном этапе развития система первого этапа уже не

удовлетворяет потребностям потребителей, и на смену ей приходят подсистемы второго поколения. Второе поколение также характеризуется естественным повышением уровня неопределенности на начальном этапе и постепенным падением уровня на последующих этапах. При переходе к третьему поколению и последующим процесс повторяется. При этом наблюдается общая тенденция к уменьшению неопределенности, так как постепенно накапливается информация о данной системе. Основной проблемой исследования ЖЦ развивающихся систем является прогнозирование сроков смены поколений и технико-экономических характеристик перспективных систем.

#### 4. Система управления жизненным циклом

Система управления ЖЦ представляет собой совокупность органов, средств и методов, обеспечивающих формирование и реализацию управляющих воздействий, направленных на достижение поставленных целей стадий, этапов и работ ЖЦ. Система управления реализует все этапы управления. Для управления продолжительными ЖЦ сложной системы в настоящее время внедряются программно-целевые методы. Основной особенностью организационной структуры системы управления является иерархичность, т. е. деление ее на вертикальные и горизонтальные уровни по степени общности целей и решаемых задач управления ЖЦ. В зависимости от степени подробности анализа структуру можно делить на различное число уровней.

*Высшие органы управления:*

- осуществляют общее руководство научно-технической деятельностью в стране;
- разрабатывают мероприятия, направленные на обеспечение единой научно-технической политики в стране;
- организуют их реализацию;
- руководят разработкой прогнозов развития;
- рассматривают и утверждают основные направления науки и техники и крупные научно-технические программы, определяющие стадии и этапы ЖЦ сложных систем и контролируют их выполнение;
- определяют меры по повышению эффективности научных исследований и применения сложных систем.
- координируют межотраслевые исследования и разработки на этапах ЖЦ.

*Отраслевые органы управления,* а также органы управления крупных корпораций, как государственных, так и частных, осуществляют общее руководство научно-технической деятельностью в соответствующей отрасли или корпорации, согласовывают и утверждают требования на разработку новых систем, управляют деятельностью нижестоящих организаций при выполнении работ на стадиях и этапах ЖЦ, принимают и утверждают результаты этих работ.

*Отдельные предприятия* управляют деятельностью своих подразделений и несут непосредственную ответственность за качество и сроки работ на соответствующих этапах ЖЦ, разрабатывают, согласовывают и утверждают

требования к системе, осуществляют выполнение разработок, серийное производство средств системы и их эксплуатацию.

*Исполнители* непосредственно формируют ЖЦ системы, т. е. целенаправленно действуют на систему или ее отдельные элементы в процессе создания и эксплуатации. Разрабатывают разделы требований к системе по профилю своей работы, проводят исследование соответствующих элементов и подсистем. Разрабатывают опытные образцы и серийные изделия, проводят испытания, непосредственно воздействуют на систему в процессе ее применения.

В зависимости от занимаемого уровня и назначения перечисленные органы системы управления могут выполнять функции *заказчика, исполнителей, изготовителей и потребителей*.

*Заказчик* определяет цель создания системы, совместно с исполнителем исследует и обосновывает разработку, обеспечивает исполнителей необходимыми исходными данными, разрабатывает, согласовывает и утверждает требования к системе, контролирует и принимает результаты работы по этапам ЖЦ.

*Исполнители* совместно с заказчиком исследуют и обосновывают разработки системы, участвуют в разработке требований, выполняют разработку, осуществляют сдачу результатов разработки заказчику, выполняют авторский надзор за серийным производством и эксплуатацией системы.

*Изготовители* участвуют в изготовлении опытного образца, принимают документацию на новую систему, готовят промышленное производство, осуществляют серийное производство системы и гарантийный надзор за ее эксплуатацией. В состав изготовителей входят головной изготовитель и изготовители комплектующих элементов.

*Потребители* (пользователи, эксплуатационники) обеспечивают заказчика и исполнителей необходимыми данными, участвуют в разработке и утверждении требований, осуществляют контрольную разработку и участвуют в приеме результатов разработки и серийной продукции, осуществляют эксплуатацию системы.

Между органами управления различных уровней, а также заказчиком, разработчиками, изготовителем и потребителями могут устанавливаться разные связи, отношения и взаимодействия, которые определяют различные виды организационных структур системы управления ЖЦ. Различают два типа организационных структур: *линейную и матричную* (проектную, тематическую, функциональную).

*При линейной структуре* управление осуществляется по отдельным стадиям ЖЦ:

- научно-исследовательские учреждения заказчика с привлечением планируемых разработчиков и изготовителей системы проводят исследование и обоснование разработки;
- головной исполнитель и соискатели разрабатывают проект и опытный образец системы;
- изготовители выполняют работы на этапе серийного производства и т. д.

Взаимодействие между перечисленными организациями при выполнении и смене работ осуществляет руководство вышестоящего органа системы управления. Достоинствами данной структуры являются высокое качество выполняемых однотипных работ вследствие специализации организаций и персональная ответственность организаций за соответствующие стадии ЖЦ. Однако *линейная структура имеет существенные недостатки:*

- низкая оперативность текущего управления при смене целей и задач, решаемых каждой организацией;
- отсутствие эффективного комплексного системного подхода к управлению ЖЦ, так как при выполнении работ одной стадии слабо учитываются особенности последующей стадии;
- высокая загруженность высшего руководства текущим управлением, особенно при выполнении каждой организацией нескольких тем, проектов различных разрабатываемых систем.

Как правило, специализированные организации выполняют работы, связанные с формированием ЖЦ различных систем, т. е. выполняют одновременно несколько тем, проектов, программ. Поэтому подобная линейная структура при наличии только одного вышестоящего руководителя не обеспечивает эффективного управления и на практике почти не встречается.

*Матричная структура* является развитием линейной структуры и обеспечивает сочетание линейного управления по вертикали, т. е. по отдельным стадиям, с управлением по горизонтали – по всему ЖЦ. Для этой цели назначаются отдельные руководители тем (проектов, программ), отвечающие в целом за весь ЖЦ, а для координации работы этих руководителей создается дополнительный центр управления темами (проектами, программами). Кроме этого, в специализированных подразделениях создаются дополнительные группы, способные решать вопросы на всех этапах ЖЦ. Достоинствами данной структуры являются:

- рациональное сочетание ответственности по вертикали, лежащей на руководителях специализированных организаций, с ответственностью по горизонтали, которую несут руководители тем и дополнительные группы специализированных подразделений;
- возможность наиболее эффективного применения таких прогрессивных методов как программно-целевое управление;
- освобождение высшего руководства от текущей работы, что позволяет усилить контроль за деятельностью специализированных организаций;
- обеспечение комплексного (системного) подхода к ЖЦ системы со взаимной увязкой работ на всех стадиях.

Учет всех этапов жизненного цикла существенно усложняет задачу проектирования и производства продукции. Однако возможность ее решения достигается применением автоматизированных систем управления ЖЦ. Автоматизация проектирования осуществляется системами автоматизированного проектирования (САПР).



## Контрольные вопросы

1. Какую смысловую нагрузку несет в себе понятие цикла?
2. Дайте определение понятия жизненного цикла.
3. На какие стадии разбивается жизненный цикл системы?
4. По каким признакам классифицируются жизненные циклы системы?
5. Дайте характеристику каскадной модели жизненного цикла.
6. Дайте характеристику итеративной модели жизненного цикла.
7. Дайте характеристику спиральной модели жизненного цикла.
8. Какие уровни управления жизненным циклом системы используются на практике? Дайте их характеристику.
9. Дайте характеристику линейной и матричной структуре управления.

## ЛЕКЦИЯ № 9. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ

1. Методика системного исследования социально-экономических проблем.
2. Методика проектирования систем управления организациями.
3. Шкала уровней качества системы.
4. Показатели и критерии эффективности системы.

### 1. Методика системного исследования социально-экономических проблем

Исследования в области экономики практически всегда имеют системный характер. Это объясняется тем, что мы имеем дело с огромным числом взаимосвязанных и очень разных систем: экономических, политических, социальных, экологических и др. В условиях современной информатизации и интеграции все социально-экономические проблемы не могут быть решены лишь с точки зрения одной предметной области, так как в обществе все системы развиваются во взаимодействии.

В настоящее время в экономических исследованиях используют не только предметные методы, но и ряд общенаучных, системных методов исследования, т. е. таких, которые применяют и другие общественные и естественные науки. В экономических исследованиях применяют следующие системные методы: *системный подход, научная абстракция, исторический и логический методы, наблюдение и сбор данных, эксперимент, моделирование* и др.

Существенное отличие системного исследования состоит в *акценте на анализе свойств экономического объекта, которые обеспечивают его целостность*, выявлении связей и отношений между его частями (элементами), особенностей структурной организации, функционирования и развития. Главным инструментом системного подхода является системный анализ, который обеспечивает целостность исследования за счет совокупности двух основных процедур – анализа и синтеза.

Следует отметить, что для научного исследования экономических объектов характерна процедура анализа, но не всегда она заканчивается синтезом. Эта процедура достаточно сложна и трудна для математического описания. Чаще всего в рамках предметного исследования используют односторонние аналитические, линейно-причинные методы, которые не учитывают или не полностью учитывают воздействие всего многообразия внешних и внутренних факторов, которые способствуют изменениям как в состоянии объекта исследования, так и в его поведении. Этим можно объяснить возникающие иногда противоречиями между теорией и практикой решаемых социально-экономических проблем.

Системные исследования любого объекта предполагают не только анализ свойств его целостности, но и наличие системной взаимосвязи с окружающими объектами. Системные исследования выполняют не только познавательную

функцию, но и позволяют ориентироваться в окружающем мире системных событий.

Системный анализ в экономике позволяет выявить целесообразность создания или совершенствования хозяйственной организации, определить, к какому классу сложности она относится, найти наиболее эффективные методы ее организации или управления. Преимущество системного анализа социально-экономических проблем состоит в том, что он позволяет комплексно оценить производственно-хозяйственную деятельность и то, насколько эффективно организован процесс принятия решений в компании.

Особенность социально-экономических проблем состоит в том, что они связаны с задачами разных уровней неопределенности. Например, конфликт интересов различных участников экономической деятельности, недооценка прогнозов будущего развития или последствий принимаемых решений, учет влияния человеческого фактора и институциональной среды и многое другое – то, что практически невозможно прогнозировать.

Наличие в социальных и экономических процессах многих участников, каждый из которых имеет свои цели и интересы, является основной причиной возникновения конфликтов, разрешение которых возможно лишь при достижении консенсуса либо по целям, либо по средствам, либо по тому и другому. Основная причина недооценки будущего развития, как правило, имеет субъективный характер и связана с тем, что решение одних проблем порождает новые, если не рассматривать большое число вариантов прогнозных ситуаций развития событий.

Все перечисленные факторы свидетельствуют о том, что универсальной методики проведения системного анализа для решения социально-экономических проблем не существует, и каждая методика имеет авторский характер.

*Системный анализ применяется* в компаниях для достижения следующих целей:

- выявления общих тенденций развития компании, ее места в экономической среде;
- установления специфики деятельности компании и ее подразделений;
- выявления условий, необходимых для достижения поставленных целей и решения задач;
- сбора информации для проведения анализа и реализации мероприятий по усовершенствованию системы управления;
- изучения и применения опыта других компаний;
- определения последствий принимаемых управленческих решений и их влияния на производительность, эффективность, конкурентоспособность и т. п.

Системный анализ в компаниях требует от специалистов не только выявления проблем, формулирования задач, оценки состояния и диагностики системы, но и разработки обоснованных предложений и рекомендаций для проведения качественных изменений в области организации и управления деятельностью, т. е. принятия системы взаимосвязанных решений.

Например, при применении системного анализа в маркетинговых исследованиях сначала исследуют параметры «выхода» из системы, т. е. производимые товары или услуги. Затем определяются «входные» параметры системы, т. е. анализируется потребность системы в ресурсах (материальных, финансовых, трудовых, информационных, интеллектуальных и др.) для производства. Исследуется организационно-технический уровень системы, параметры внешней среды, процессов и т. п.

## **2. Методика проектирования систем управления организациями**

Понятие «организационно-управленческая система» объединяет две важные категории, характеризующие любое производство или организацию.

Если «*организация*» предполагает форму объединения людей для совместной деятельности в рамках определенной структуры, то «*управление*» является универсальным атрибутом любой организации. Оно состоит в целенаправленном воздействии на систему с целью ее перевода в новое качественное состояние на основе присущих этой системе объективных закономерностей. Эти две категории всегда дополняют друг друга. Организация является одной из функций управления, а без целенаправленного управления не может функционировать ни одна организационная структура. Поэтому проектирование организационно-управленческой системы является определяющим этапом в создании, функционировании и развитии любого социально-экономического объекта с каналами внутреннего взаимодействия, согласованием функций, соподчинением отдельных частей и формированием некоего единого целого.

Проблема проектирования организационно-управленческой системы производства или учреждения актуальна в условиях постоянного изменения факторов внешней среды, которые требуют адекватных изменений внутри самой системы. Эти проблемы становятся особенно актуальными в процессе перехода предприятия на инновационные технологии. Процесс проектирования в данном случае связан с «поиском компромисса между целостностью представления сложного объекта и детализацией описания его компонентов в процессе разработки и реализации проекта».

Решение о проектировании организационно-управленческой системы принимается только тогда, когда действующая система становится неэффективной или не отвечает требованиям и потребностям надсистемы (например, состоянию экономики или технологии управления производством). В ходе проектирования ставится задача создавать такие системы, которые бы не только наиболее полно отражали цели и задачи организации, но и наилучшим образом позволяли организовать взаимодействие с внешней средой, продуктивно направлять усилия работников на инновационную деятельность и, таким образом, удовлетворять потребности общества.

Процесс проектирования организационно-управленческой системы включает создание моделей организационной и управленческой структур, объединенных многоуровневой методикой проектирования. Выделяют пять

основных уровней (этапов) проектирования: *теоретико-методологический, или концептуальный; научно-исследовательский; проектный; инженерно-конструкторский; технологический; реализации.*

*На концептуальном этапе* применения методики создается концептуальная модель описания системы, которая включает все факторы внешней и внутренней среды, влияющие на функционирование и управление предприятием (организацией), цели функционирования и принципы управления. Результатом концептуального моделирования является:

- разработка принципов формирования и анализа целей и функций системы управления;
- выбор подходов и разработка принципов формирования и анализа вариантов организационной структуры и системы управления;
- разработка принципов создания системы нормативно-методического обеспечения управления (СНМОУ).

Кроме того, на данном этапе формулируются цели проектирования, определяются задачи и требования к проекту, его ресурсное обеспечение – иными словами, разрабатывается технико-экономическое обоснование проекта.

*На втором этапе* проводится научно-исследовательская работа, в рамках которой разрабатываются модели анализа факторов окружающей среды и рынка, методика формирования и оценки структуры целей и функций управления, методики формирования и анализа вариантов организационных структур, методики создания и совершенствования СНМОУ и др.

*На третьем этапе* осуществляются опытно-конструкторские разработки (ОКР), в рамках которых создается ряд программных разработок, позволяющих автоматизировать полностью или частично процедуры управления.

*На четвертом этапе* происходит технологическая реализация информационных технологий, обеспечивающих процедуры анализа и моделирования организационных структур (автоматизированные системы управления (АСУ), автоматизированная система управления предприятием (АСУП), автоматизированная система нормативно-методического обеспечения управления (АСНМОУ) и т. п.).

*На пятом этапе* происходит материальное воплощение и начинается эксплуатация информационных систем управления; на этом этапе разрабатываются методики и рекомендации для пользователей.

*На аналитическом этапе* анализируются организационно-управленческие структуры; определяется, в какой мере действующая структура отвечает предъявляемым к ней требованиям, т. е. является ли рассматриваемая структура рациональной согласно установленным критериям, характеризующим ее качество. Можно выделить следующие организационно-управленческие критерии: тип управления (централизованный или децентрализованный); виды функциональных связей между подразделениями (линейные, нелинейные); набор функций управления; характер технического и технологического обеспечения производства продуктов деятельности и т. п. Результатом такого анализа является выявление противоречий (или несоответствий) в деятельности организации. Такими несоответствиями могут оказаться: неадекватно большой

управленческий аппарат, параллелизм в работе подразделений, нарушения взаимосвязей между подразделениями, отсутствие учета изменений, происходящих во внешней среде, и т. п.

*На этапе проектирования* организационных структур управления разрабатываются решения о реструктуризации, реформировании или создании новой системы в соответствии с целями проекта, который может осуществляться с использованием разных методов. Например:

- *метод аналогий* опирается на прошлый опыт проектирования управленческих структур в аналогичных организациях;
- *экспертно-аналитический метод* позволяет проектировать на основе предложений экспертов. Степень участия экспертов может варьироваться от полного участия в проекте до оценки (экспертизы) существующих структур;
- *метод структурирования целей* позволяет разрабатывать систему целей компании с последующим ее внедрением в соответствии с разрабатываемой структурой;
- *моделирование* применяется для создания организационных и функциональных моделей управления. Основой оценки таких моделей является критерий рациональности управленческих решений. Моделирование основано на математических, графических, информационных средствах описания организационной структуры, в рамках которой осуществляется распределение функций, полномочий и ответственности каждого элемента (подразделения) структуры.

Если проектирование организационной структуры управления осуществляется впервые, то следует учитывать следующие принципы: оптимальность структуры управления, надежность и эффективность процесса управления, гибкость, адаптивность и устойчивость к изменениям внешней среды. Следует отметить, что на различных предприятиях с учетом специфики их деятельности могут использоваться другие принципы построения организационных структур, наиболее полно отражающие особенности их функционирования.

*На этапе оценки эффективности* внедрения организационно-управленческого проекта или решения дается оценка результатов (эффектов) его реализации на основе критериев достижения поставленных целей (организационных, социальных, экономических). Например, организационная эффективность решений (проекта) рассматривается как результат достижения целей с меньшим объемом трудозатрат и времени. Социальная эффективность решения (проекта) – достижение всех социальных целей при наименьших финансовых затратах. Экономическая эффективность – всегда соотношение результата(-ов) к затратам на разработку или реализацию проекта.

Чаще всего оценку проекта изменения организационно-управленческой структуры осуществляют комплексно: по конечным результатам производственной деятельности, динамике уровня прибыли, качеству планирования (улучшение показателей бюджетирования), эффективности вложений (отдача на капитал), повышению скорости оборота капитала и другим

параметрам хозяйственной деятельности.

На практике для оценки эффективности управленческих решений могут применяться следующие критерии:

- целевой – оценка по степени достижения поставленных целей;
- ресурсный – оценка эффективности управления ресурсами, т. е. результат сравнивают с затратами;
- эффективности – оценка динамики основных экономических показателей за сопоставимый период времени;
- конкурентоспособности – оценка способности производить продукцию, отвечающую требованиям конкурентного рынка, запросам потребителей;
- комплексный – так или иначе сочетающий все предыдущие.

*Эффективность управления* – специфическая категория, отражающая уровень и динамику развития системы управления, качественную и количественную стороны этого процесса. Методика проектирования организационных структур управления сводится к выработке мероприятий и рекомендаций, направленных на их совершенствование с целью повышения эффективности управленческой деятельности и организации в целом.

### **Выводы**

1. Применение системного анализа с целью проектирования или создания организационно-управленческих систем должно быть связано с исследованием внутреннего устройства системы или эффективной организации системы управления с учетом воздействия внешних факторов окружающей среды или создания эффективных механизмов ее функционирования.

2. Не существует общей, общепризнанной методики проведения системного анализа. Для системного анализа характерно творческое использование всей совокупности приемов и методов неформального (качественного) и формального (количественных) описаний состояния системы и анализа его изменений под воздействием всего разнообразия факторов внешней среды.

3. Разработка методики системного анализа для конкретного объекта исследования должна учитывать те цели, которые ставит ЛПР перед аналитиками. Методика должна содержать три последовательных этапа: аналитический, проектный и оценки эффективности рекомендуемых решений по совершенствованию системы или тем изменениям, которые приведут к качественным результатам.

4. Для социально-экономических систем характерной чертой является открытость и постоянное взаимодействие с факторами внешней среды, поэтому поиск эффективных моделей принятия решения требует многофакторного и ситуационного анализа условий для устойчивого состояния систем и сохранения их целостности. В рамках системного анализа осуществляется полная и всесторонняя проверка различных вариантов решений с точки зрения количественного и качественного сопоставления затраченных ресурсов с получаемыми результатами.

5. Выбор методики применения системного анализа зависит от целей,

поставленных ЛПР, и уровня компетенций системных аналитиков, которые могут не только использовать весь инструментарий СА, но и обосновать наличие вариантов (альтернатив) решений в конкретных условиях, а также описать их возможные последствия. Ответственность за выбор оптимального решения и постановку целей всегда лежит на ЛПР.

### 3. Шкала уровней качества системы

Порядковая шкала уровней качества и дерево свойств систем с управлением приведены на рис. 14.

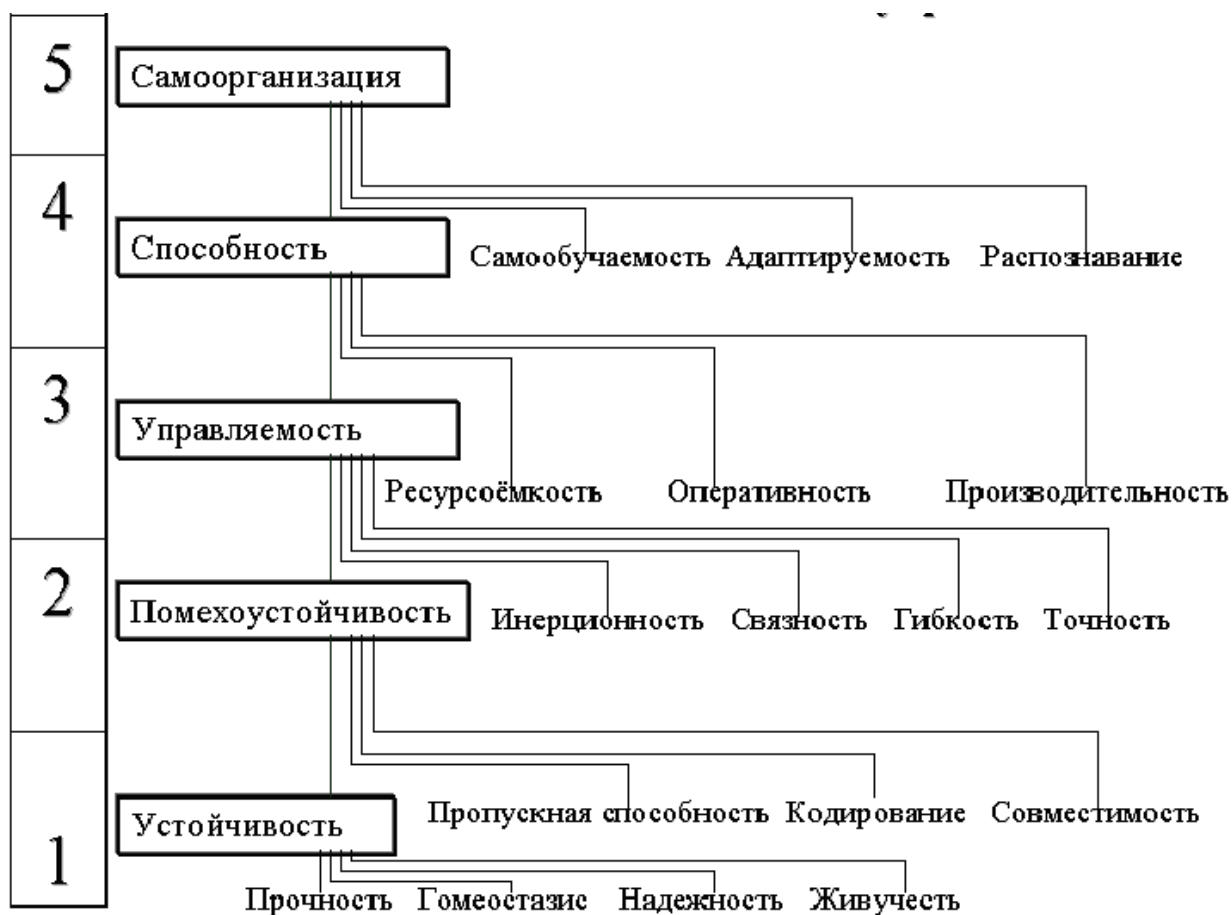


Рис. 14. Шкалы качества систем управления

Система, обладающая качеством данного порядка, имеет и все другие более простые качества, но не имеет качеств более высокого порядка.

Первичным качеством любой системы является устойчивость, как способность системы возвращаться в равновесное состояние при выводе из него внешними воздействиями. Для простых систем устойчивость объединяет такие свойства, как прочность, стабильность, стойкость и т. д. Для сложных характерны различные формы структурной устойчивости, такие, как надёжность, живучесть, и т. д.

Более сложным, чем устойчивость, является помехоустойчивость, понимаемая как способность системы без искажений воспринимать и передавать



информационные потоки. К таким свойствам относятся пропускная способность, кодирование информации, электромагнитная совместимость.

Следующим уровнем шкалы качества системы является управляемость – способность системы переходить за конечное время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий. Управляемость обеспечивается, прежде всего, прямой и обратной связью и объединяет такие свойства системы, как оперативность, точность, инерционность и т. д. На этом уровне качества для сложной системы управляемость включает способность принятия решений по формированию управляющих воздействий.

Следующим уровнем по шкале качеств является способность, определяющая возможность системы по достижению требуемого результата на основе имеющихся ресурсов в заданный период времени. Данное качество характеризуется такими свойствами, как результативность, ресурсоёмкость и оперативность. По сути, это потенциальная эффективность функционирования системы – способность получить требуемый результат при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствие воздействия внешней среды.

Наиболее сложным качеством системы является самоорганизация. Самоорганизующаяся система способна изменять свою структуру, параметры, алгоритм функционирования и т. д. Свойствами самоорганизации является адаптируемость, самообучаемость, способность к распознаванию ситуации.

Уровень качества выбирает исследователь в зависимости от целей исследования, наличия информации и условия применения системы.

#### **4. Показатели и критерии эффективности систем**

Термин «*эффективность*» связывается с системой, операцией и с решением. Эти понятия можно считать эквивалентными.

Будем понимать под эффективностью комплексное свойство процесса функционирования системы как степень приспособленности к достижению цели.

В общем случае оценка функциональных свойств систем проводится в двух аспектах:

- результат функционирования (операции);
- алгоритм, обеспечивающий получение результата.

Результат функционирования и алгоритм, обеспечивающий его получение, оцениваются по показателям результативности, ресурсоемкости и оперативности.

Результативность обуславливает её получаемым целевым эффектом, ради которого функционирует система.

*Ресурсоемкость*  $R$  характеризуется ресурсами всех видов (людскими, техническими, энергетическими, информационными, финансовыми и т. д.), используемыми для получения целевого эффекта.

*Оперативность*  $O$  определяется расходом времени, потребного для достижения цели функционирования системы.

Вектор эффективности системы определяется выражением:

$$Y_{эф} = \langle Y_{э}, Y_R, Y_O \rangle.$$

Выбор критерия эффективности – центральный, самый ответственный момент исследования систем. Процесс выбора критерия является субъективным, творческим процессом. Математическое выражение критерия эффективности называют целевой функцией, поскольку её экстремизация является отражением цели функционирования системы.

Отсюда следует, что формирование критерия эффективности решений требует:

- определить цель решения проблемы;
- найти множество управляемых и неуправляемых характеристик (параметров) системы;
- определить показатели исхода операции.

Хотя конкретные операции достаточно многообразны, существует ряд общих принципов, которыми необходимо руководствоваться при формировании критериев эффективности.

В зависимости от типа систем и внешних воздействий операции могут быть:

- детерминированными;
- вероятностными;
- неопределенными.

В связи с этим выделяют 3 группы критериев эффективности:

1. В условиях определенности, если критерии отражают один строго определенный исход детерминированной операции;

2. В условиях риска, если критерии являются дискретными или непрерывными случайными величинами с известными законами распределения в вероятностной операции;

3. В условиях неопределенности, если критерии являются случайными величинами, законы распределения которых неизвестны.

Критерии пригодности для оценки детерминированных операций

$$K^{приг} : (\forall i) (y_i^j \in \delta / \delta_i \rightarrow y^{дон}, i \in \langle Z, R, O \rangle)$$

определяет правило, по которому операция считается эффективной, если все частные показатели исхода операции принадлежат области адекватности.

Критерий оптимальности для оценки детерминированной операции

$$K^{опт} : (\exists i) (y_i^j \in \delta / \delta_i \rightarrow \delta^{опт}, i \in \langle Z, R, O \rangle)$$

определяет правило, по которому операция считается эффективной, если все частные показатели принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности оптимален.

Критерий пригодности для оценки эффективности вероятностной операции

$$K^{приг} : P_{\partial\epsilon} (Y_{эф}) \geq P_{\partial\epsilon}^{треб} (Y_{эф})$$

определяет правило, по которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по показателям эффективности не меньше требуемой.

Критерий оптимальности для оценки вероятностной операции

$$K^{opt} : P_{\partial c}(Y_{эф}) = P_{\partial c}(Y_{эф}^{opt})$$

определяет правило, по которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по показателям эффективности равна вероятности достижения цели с оптимальными значениями этих показателей.

Методика оценки эффективности систем в неопределенных операциях составляет один из разделов теории принятия решений.

Общие требования к показателям эффективности:

- соответствие цели;
- полнота;
- измеримость;
- ясность физического смысла;
- избыточность;
- чувствительность.

### Контрольные вопросы

1. Какие системные методы применяются в экономических исследованиях?

2. Для достижения каких целей применяется системный анализ в современных компаниях?

3. Что является результатом концептуального проектирования системы управления организацией?

4. Какие уровни входят в состав порядковой шкалы уровней качества? Дайте их характеристику.

5. Какими показателями оценивается результат функционирования системы?

6. Какие группы критериев эффективности вы знаете? Дайте их характеристику.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов А. В. Системный анализ [Текст] : учебник / А. В. Антонов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Инфра-М, 2018. – 366 с. – ISBN 978-5-16-011865-9.
2. Болодурина И. П. Системный анализ [Текст] : учебное пособие / И. П. Болодурина, Т. Н. Тарасова, О.С. Арапова – Оренбург : ОГУ, 2013. – 193 с.
3. Кузнецов В. В. Системный анализ [Текст] : учебник и практикум для академического бакалавриата / под общ. ред. В. В. Кузнецова. – М. : Юрайт, 2017. – 270 с. ISBN 978-5-9916-8591-7.
4. Качала В. В. Теория систем и системный анализ [Текст] : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. В. Качала – М. : Академия, 2013. – 272 с. – ISBN 978-5-7695-9148-8.
5. Романов В. Н. Системный анализ для инженеров [Текст] : учебное пособие / В. Н. Романов – СПб. : СЗГЗТУ, 2006. – 186 с. – ISBN 5-56587-299-0.