

МОДУЛЬ 3. ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Введение

Проблемы взаимодействия человека с биосферой всегда носят системный, междисциплинарный характер. В исследованиях этих проблем не обойтись без культуры моделирования, профессионального использования методов обработки информации, методов определения рисков в исследовании устойчивости биоценозов по отношению к антропогенным воздействиям. С одной стороны, проблемы экологии – это проблемы естественнонаучные и социальные, которые нельзя разделить, с другой – проблемы экологии требуют от исследователя принятия решений, адаптирующих человеческую деятельность к естественным циклам круговорота веществ в природе.

Наука вступила в ту фазу своего развития, когда приходится иметь дело с явлениями не просто сложными, а комплексными, лежащими в различных областях знания. Развитие физики, математики, химии и других наук подготовило почву к комплексному исследованию проблем. Это нашло свое отражение в создании новой технологии исследований – системному подходу, системному анализу процессов и явлений.

Системный анализ – это дисциплина не математическая. Он адаптирует методы, основанные на анализе формализованных моделей, во многом использует методы теорий исследования операций, статистического анализа, графов, игр и других математических методов, но не исчерпывается использованием только этих методов. Как всякая синтетическая дисциплина, он широко использует качественное, вербальное описание.

Что Вы будете изучать:

- Понятие и определение системного анализа.
- Объект и предмет системного анализа.
- Исторический аспект развития системного анализа.
- Связь системного анализа с другими дисциплинами.
- Особенности поведения сложных систем.
- Модели и моделирование.
- Критерии, используемые при принятии решений.

Цели модуля:

- ▶ ознакомить с основными понятиями системного анализа;
- ▶ дать представление об основных закономерностях проведения системного анализа;
- ▶ обучить использованию различных математических методов при изучении экосистем;
- ▶ принимать конкретные решения и делать выводы на основе проведенного анализа.

После изучения модуля Вы сможете:

- систематизировать и структурировать свои знания об изучаемом объекте;
- выделить основные компоненты и элементы системы;
- выбрать метод или методы исследований, наиболее подходящие для данной системы;
- проанализировать полученные результаты;
- сделать конкретные выводы и разработать рекомендации для дальнейшего взаимодействия с экосистемой.

Основная литература



1. *Чепурных Н.В., Новоселов А.Л.* Планирование и прогнозирование природопользования. Уч. пособие. М.: Интерпракс, 1995.
2. *Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л., Чепурных Н.В.* Экология и экономика природопользования. М., 1998.

Дополнительная литература



1. *Пегов С.А., Хомяков П.М.* Моделирование развития экологических систем. Л.: Гидрометеоиздат, 1991.
2. *Чепурных Н.В., Новоселов А.Л.* Экономика и экология: развитие, катастрофы. М.: Наука, 1996.



Ключевые слова

Система, системный анализ, системный подход, цели, ресурсы, модель, устойчивость, прогноз, принятие решений.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

В настоящее время не существует единой точки зрения по поводу содержания понятия *системный анализ* и *область его применения*. Наиболее точно отражающей понятие и цели использования системного анализа в решении конкретных проблем представляется следующая трактовка системного анализа.



Задание 3.1. *Подумайте, с какими системами Вы уже встречались в своей практике? Какие проблемы возникают при их изучении? Какими методами можно их проанализировать?*

Системный анализ – это конкретное теоретико-прикладное направление исследований, основанное на системной методологии и характеризующееся определенными принципами, методами и областью применения.



Какие задачи решают с помощью системного анализа?

Системный анализ – это совокупность определенных научных методов и практических приемов решения разнообразных проблем, возникающих во всех сферах целенаправленной деятельности общества, на основе системного подхода и представления объекта исследований в виде системы.

Характерным для системного анализа является то, что поиск лучшего решения проблемы начинается с определения и упорядочения целей деятельности системы, при функционировании которой возникла данная проблема. При этом устанавливается соответствие между этими целями, возможными путями решения возникшей проблемы и потребными для этого ресурсами.

Системный анализ характеризуется, главным образом, упорядоченным, логическим подходом к исследованию проблем и использованию существующих методов их решения, которые могут быть разработаны в рамках других наук.

Системный анализ предназначен для решения, в первую очередь, слабоструктурированных проблем, т.е. проблем, состав элементов и взаимосвязей которых установлен только частично, задач, возникающих в ситуациях, характеризующихся наличием фактора неопределенности и содержащих неформализуемые элементы, непереводаемые на язык математики.

Одна из задач системного анализа – раскрытие проблем, стоящих перед руководителями, принимающими решения, настолько, чтобы им стали очевидны все основные последствия решений, которые можно было учитывать в своих действиях. Системный анализ помогает ответственному за принятие решения лицу более строго подойти к оценке возможных вариантов действий и выбрать наилучший из них с учетом дополнительных, неформализуемых факторов и моментов.



Какие этапы можно выделить при проведении системного анализа?

Системный анализ – это всесторонний анализ, использующий принцип поэтапности:

- постановка цели,

- определение задач,
- формулировка научной гипотезы,
- всестороннее изучение особенностей оптимального варианта (размещения производства).

При этом критерием оптимальности является эффективность, т. е. наибольшее удовлетворение потребностей населения.



С какими дисциплинами связан системный анализ?
Каковы его специфические методы исследований?

Системный анализ – самостоятельная научная дисциплина, имеющая свою собственную теорию. Это разработанный специфический формальный аппарат и особые методы для практики.

Одна из задач системного анализа – определение всего комплекса мероприятий, необходимых для достижения поставленных целей. При этом выявляются нерешенные проблемы, узкие места, требующие первоочередного внимания и концентрации ресурсов.

Система (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение), множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство.

Претерпев длительную историческую эволюцию, понятие *система* с середины XX в. становится одним из ключевых философско-методологических и специально-научных понятий.

В современном научном и техническом знании разработка проблематики, связанной с исследованием и конструированием систем разного рода, проводится в рамках системного подхода, общей теории систем, теории систем в кибернетике, системотехнике, системном анализе и т. д.

Системный анализ можно охарактеризовать как науку об общих закономерностях строения и поведения сложных систем. Специфическим формальным его аппаратом являются экспертные системы, системно-динамические, дискретные (кибернетические) и интегральные модели. Задачи системного анализа в тех или иных случаях решаются с помощью различных отраслей современной математики: исследования операций, теории игр, оптимального управления, дискретной математики и иных.

Прикладные разделы системного анализа касаются экономики и производственного менеджмента, прикладной экологии и природопользования, политологии, социологии, военного дела, отдельных отраслей медицины и демографии, информатизации, конструирования больших систем производственно-технического назначения.

Привлечение методов системного анализа для решения указанных проблем необходимо прежде всего потому, что в процессе принятия решений приходится осуществлять выбор в условиях неопределённости, которая обусловлена наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке.



Что является объектом системного анализа?

3.1.1. Объект системного анализа

Объект системного анализа в теоретическом аспекте – это процесс подготовки и принятия решений; в прикладном аспекте – это различные конкретные проблемы, возникающие при создании и функционировании систем.

В теоретическом аспекте системный анализ позволяет выделить:

- общие закономерности проведения исследований, направленные на поиск наилучших решений различных проблем на основе системного подхода;
- конкретные научные методы исследований; составные части проблемы; определить взаимосвязи, существующие как между элементами системы, так и между системой и внешней средой и т.п.;
- различные методы и приемы исследований, разработанные в рамках других дисциплин, но применимые для конкретной ситуации.

В прикладном аспекте системный анализ вырабатывает рекомендации по созданию принципиально новых или усовершенствованных систем.



|| *Что является предметом системного анализа?
В чем состоит его двойственность?*

3.1.2. Предмет системного анализа

Выделить предмет системного анализа, т.е. отнести системный анализ к категории наук, не представляется возможным, поскольку решением указанных выше проблем занимается целый ряд наук и научных направлений.

Главная цель системного анализа – выработка конкретных рекомендаций, в том числе и на основе использования достижений теоретических наук в прикладных целях.

Это дает право говорить о двойственной природе системного анализа. С одной стороны, это теоретическое и прикладное научное направление, использующее в своих целях достижения многих других наук (точных: математика, гуманитарных: экономика, социология). С другой – системный анализ – это искусство, сочетающее объективные и субъективные аспекты, присущие как самому процессу анализа, так и процессу принятия решений на основе его данных. В последнем случае индивидуальные особенности лиц, принимающих решения (должностные, профессиональные, возрастные, творческие и жизненные позиции), оказывают непосредственное влияние на окончательное решение проблемы.



|| *Каковы основные закономерности проведения системного анализа?*

3.1.3. Основные закономерности проведения системного анализа

Для системного анализа характерно наличие определенных типов стандартных компонентов, которые практически всегда присутствуют в анализе любой проблемы. Сочетание этих элементов в определенной последовательности, диктуемой структурой проблемы и причинно-следственными связями, приводит к ее системному решению.



При решении задач этой логической цепочки используются различные модели и критерии. Умение правильно использовать логические элементы системного анализа приводит к достижению желаемого результата.

Цели. Это желаемые состояния системы или результаты ее деятельности, достижимые в пределах некоторого интервала времени.

Цели деятельности вытекают из объективных потребностей и имеют иерархический характер. Цели верхнего уровня не могут быть достигнуты, пока не достигнуты цели ближайшего нижнего уровня. По мере перемещения вниз по уровням иерархии системы цели конкретизируются.

Цели должны быть сформулированы конкретно и четко, обеспечивая возможность количественной или порядковой (больше–меньше, лучше–хуже) оценки степени их достижения.

Цели должны быть конкретизированы по времени и исполнителям.

Пути достижения поставленных целей. Проблема нахождения наилучшего пути достижения поставленной цели распадается на две части:

- выбор из множества возможных вариантов наиболее рациональных и доминирующих;
- выбор наилучшего варианта из рациональных.

Потребные ресурсы. Основное свойство ресурсов – это их ограниченность, что требует их приоритетного выделения и экономного расходования. В связи с этим появляется проблема взаимозаменяемости ресурсов.

Ресурсы являются фильтром, через который пропускают принимаемое решение. Цели и стратегии должны соответствовать имеющимся ресурсам. Если ресурсов недостаточно, то цели и стратегии должны быть скорректированы. Этот процесс продолжают до тех пор, пока не будет обеспечена потребность целей и стратегий ресурсами. Однако пересмотр целей и стратегии возможен и в том случае, если один или несколько ресурсов недоиспользуются.



|| В чем сходство и различие системного анализа и системного подхода?

3.1.4. Развитие системного анализа в историческом аспекте

Сейчас очень часто используют выражения "системный анализ", "системный подход", "теория систем". И это не случайно. Наука вступила в ту фазу своего развития, когда приходится иметь дело с комплексными явлениями, в основе их лежат процессы

разной природы, для анализа которых должны использоваться различные, но связанные между собой модели. Системный анализ и возникшая в его рамках технология исследований становятся все более необходимыми. Наука за всю историю своего существования подготовила переход от изучения отдельных фактов к изучению явления в целом на основе анализа комплекса моделей.

Большую роль в изучении любой науки играет осмысление исторических аспектов возникновения того или иного явления.

Первые представления о **системе** возникли в античной философии, выдвинувшей онтологическое истолкование системы как упорядоченности и целостности бытия.

Воспринятые от античности представления о системности бытия развивались в концепциях Спинозы и Лейбница, затем при построении научной систематики XVII–XVIII вв., стремившейся к естественной интерпретации системности мира (например, классификация К. Линнея).

Принципы системной природы знания разрабатывались в немецкой классической философии. Согласно Канту, научное знание есть система, в которой целое главенствует над частями. Шеллинг и Гегель трактовали системность познания как важнейшее требование диалектического мышления.

Большую роль в развитие системного мышления внесла школа русских естествоиспытателей, стремившихся к построению синтетических конструкций на основе детального анализа отдельных фактов.

Достаточно вспомнить Д.И.Менделеева, создавшего "модель химии". В.И.Вернадский создал концепцию синтеза взаимообусловленности развития живых и косных форм материи на Земле. В.И.Вернадский был первым, кто установил единство и взаимосвязь биотического и абиотического и необходимость изучения биосферы как единого целого.

В.Н.Сукачев ввел понятие биогеоценозов. Внутренние связи биогеоценозов преобладают над внешними. Связи между биогеоценозами осуществляются главным образом через геохимические циклы.

Д.Н.Прянишников доказал, что почва – это сложнейшая система или даже организм, созданный почвенной микрофлорой и растениями. Модель биосферы не может быть построена без анализа почвенных процессов.

В трудах Н.В.Тимофеева-Ресовского окончательно было сформулировано определение биогеоценоза, которое используется в настоящее время при построении математических моделей. Биогеоценоз – это часть пространства, через которое не проходят "существенные" геохимические границы.

В настоящее время проблемы взаимоотношения человека и биосферы сделались особенно актуальными. Изучение антропогенных влияний человека на окружающую среду требует совместной деятельности целого ряда специалистов самой разной квалификации, имеющих разные взгляды на один и тот же предмет.

В настоящее время работы в области системного анализа ведутся по следующим главным направлениям:

- ➡ философское;
- ➡ математическое – в рамках теории множеств, исследования операций, автоматического регулирования, методов оптимизации дискретной математики, моделирования на ЭВМ и другие;
- ➡ прикладное (в том числе и информационное обеспечение).

В научной среде распространены близкие термины *системный анализ* и *системный подход* (рис. 3.1). Если первый термин еще можно трактовать как специфическую научную дисциплину, то второй – однозначно понимается как подход, который

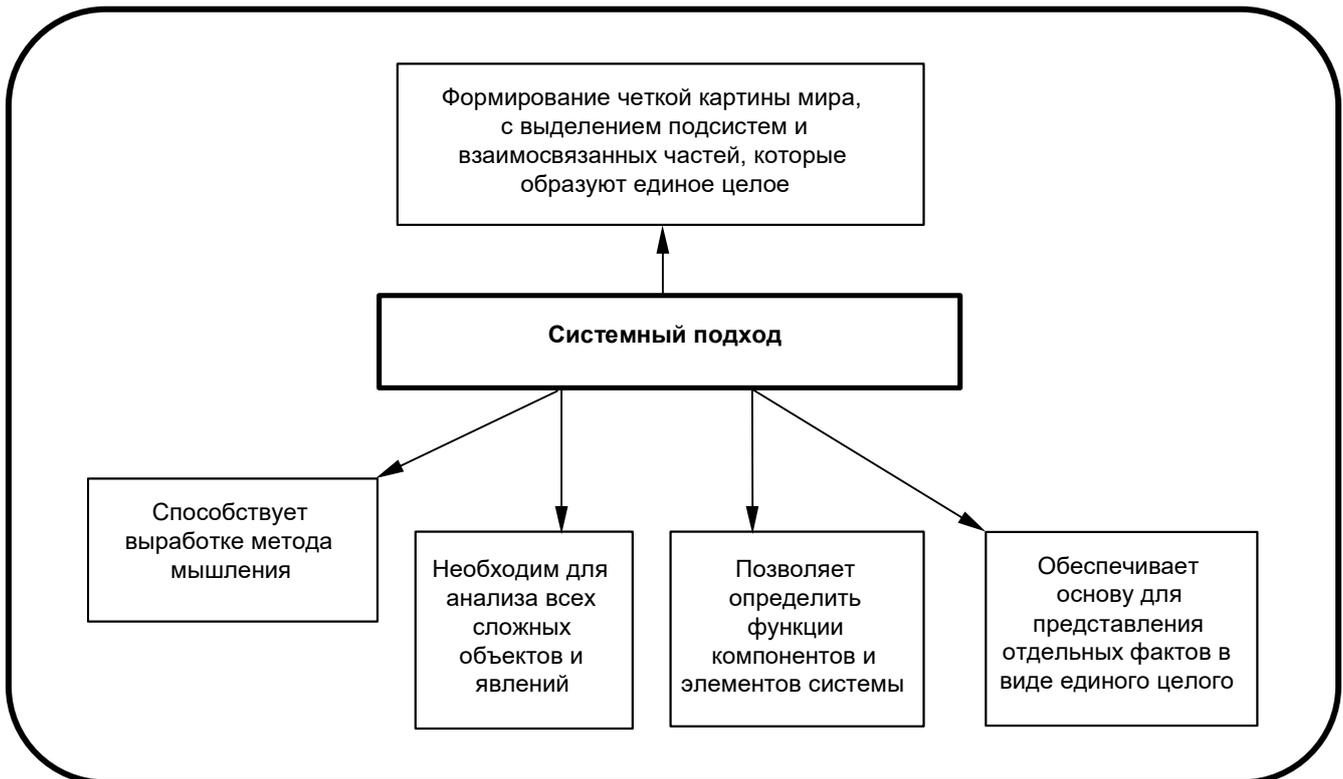


Рис. 3.1. Схема методологии системного подхода

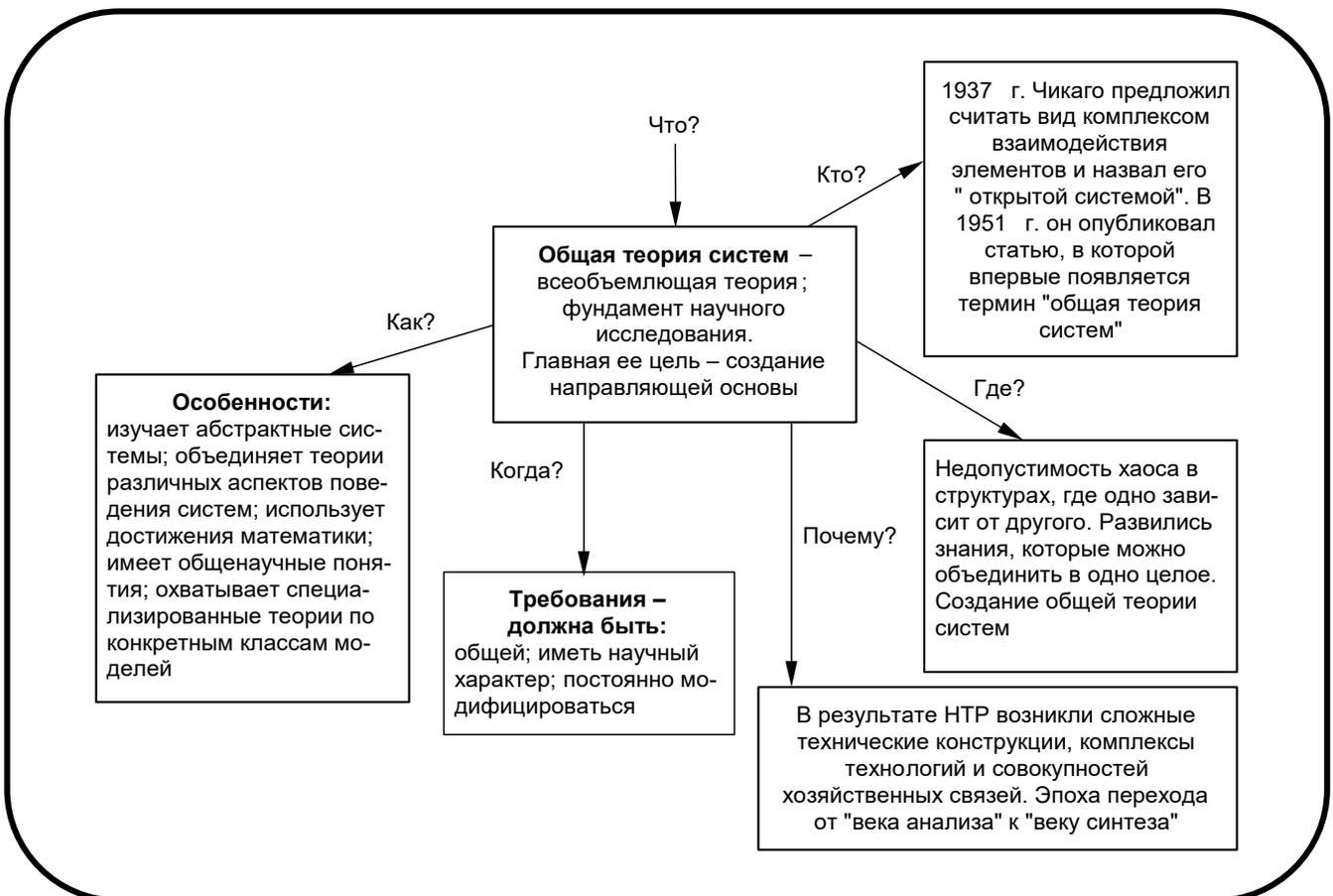


Рис. 3.2. Схема методологии общей теории систем

может быть результативным в любой предметной области. Таким образом, системный анализ можно рассматривать как основу для современного научного мышления.

Системный анализ – это не только методология, но еще и приложение к практике, а именно: специфический комплекс методов и приемов проектирования, прогнозирования, принятия решений, анализа проблемных ситуаций, информационного обеспечения (рис. 3.2).

Любые химические законы, упрощенно говоря, вытекают из уравнения Шредингера, которое практически невозможно решить при описании реакций даже простых соединений. Между тем уравнения гораздо большей степени сложности и размерности надо было решать, чтобы описать поведение биологических, экологических, экономических и социальных систем.

Попытки описать все имеющиеся сложные системы с помощью редукции их к сумме некоторых простых элементов, применить для описания этих систем аппарат классической физики и математики потерпели крах. Перед учеными встала проблема создания новой методологии и конкретных методик, адекватных специфике поведения сложных систем.

Первой попыткой создания такого рода методологии можно считать работы нашего соотечественника А.А.Богданова, который, начиная с 1912 г. и до самого конца своей жизни (1928 г.), разрабатывал основы новой науки – тектологии. Основы тектологии, или всеобщей науки об организации, были изложены им в книге «Всеобщая организационная наука. (Тектология)».

А.А.Богданов настаивал на том, что его подход есть общенаучная методология, а не философия. Изучение и прогнозирование «динамики элементов», свойственных механистическому подходу, заменялись, таким образом, изучением и прогнозированием «динамики структур». Количественные характеристики как таковые не отрицались, они стали носить подчиненный характер.

Занимаясь междисциплинарными исследованиями, Берталанфи убеждался, что объединить различные исследовательские программы в рамках одного проекта чрезвычайно трудно, если пытаться сделать это на основе изучения «физической» специфики отдельных элементов сложной системы (например, типа «человек–машина»). Междисциплинарные исследования гораздо эффективнее протекали, если принимался другой принцип изучения проблемы – поиск общих закономерностей поведения систем принципиально различной природы.

Таким образом, применение современных математических методов, объединенных в рамках математической кибернетики и исследования операций, позволяли найти общий подход к описанию систем различной физической природы.

Подобные проблемы Берталанфи группировал в три вида (три вида системных исследований, соответственно):

- Инженерия систем – научное планирование, проектирование, оценка и конструирование систем «человек–машина»;
- Исследование операций – научное управление существующими системами людей, машин, материалов, веществ, денег и иные;
- Человеческая инженерия – научная адаптация систем и особенно машин для получения максимальной эффективности при минимальных затратах.

Современная наука и практика многократно подтверждали правоту такого подхода. В 70–80-х годах нашего столетия системные исследования в России и странах бывшего СССР идут все интенсивнее. Объектом их становятся отдельные сложные конкретные человеко-машинные системы, большие социально-экономические и экологические системы. Ведущие научные коллективы объединяются во Всесоюзный институт

системных исследований АН СССР (до 1992 г. ВНИИСИ АН СССР) – ныне Институт системного анализа РАН (ИСА РАН). В своих исследованиях ученые широко используют достижения математической кибернетики и исследование операций. Появление быстродействующих вычислительных машин, работающих в диалоге с исследователем, также способствует реализации методологии системного анализа, ибо подавляющее большинство таких математических задач не имеют аналитических решений и разрешимы только численными методами.

Искусство системного анализа – это, прежде всего, умение максимально просто сформулировать проблему, используя наиболее общие свойства сложных систем.

Процедуры и методы системного анализа направлены именно на выдвижение альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределённости по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности.

3.2. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ПОНЯТИЯ

3.2.1. Роль эксперимента в изучении поведения системы

Управление сложными технологическими процессами в настоящее время невозможно осуществлять на основе "здорового смысла". Интенсивные технологии, опирающиеся на сложные системы машин, средства защиты растений, регуляторы роста и другие элементы производства чрезвычайно расширяют межотраслевые связи, обуславливая тем самым необходимость одновременного учета взаимодействия большого количества факторов, предвидения отдаленных последствий принимаемых решений. В этих условиях специалист любого уровня должен овладеть системным мышлением.



Задание 3.2.1. *Опишите известные Вам эксперименты, которые позволили выявить свойства системы с целью улучшения ее функционирования.*

Независимо от конкретной предметной области исследований экспериментатор ставит перед собой задачу управления теми или иными свойствами системы.

Исследование систем с позиций управления ими позволило обнаружить сходство и единство процессов управления, происходящих в системах самой различной природы (экономических, биологических, технических).

Суть единства состоит в подобии процессов передачи, хранения, переработки информации. Общими для всех естественных наук стали понятия *система, системные свойства, информация, обратная связь, модель, управление*. Стало возможным опираться на единые математико-логические методы. Существенно расширилась область применения формализованных методов научного анализа и синтеза на основе алгоритмизации, программирования, моделирования на ЭВМ.

Системный подход предполагает рассмотрение любого явления в качестве сложной динамической системы. С этих позиций *цель эксперимента* – изучение опре-

деленных аспектов поведения системы, выявление ее системных свойств. Эффективность эксперимента определяется глубиной понимания целостности и целенаправленности поведения системы, учетом сложных взаимосвязей в иерархической структуре систем, возможности реализации принципа оптимальности в управлении системой.



Чем определяется эффективность эксперимента? В чем состоит сходство и единство процессов управления, происходящих в системах различной природы?

3.2.2. Определение системы

Система – это относительно обособленная и упорядоченная совокупность обладающих особой связностью и целенаправленностью взаимодействующих элементов, способных реализовать определенные функции.

Система – не механический набор, а совокупность взаимодействующих между собой элементов. Она обязательно предполагает **целенаправленное взаимодействие**, т.е. некоторую цель как результирующее свойство отношений между элементами исследуемого множества. Система в силу этих свойств способна реализовывать определенную функцию. Для таких сложных систем характерны информационные процессы управления.

Элементы, относящиеся к данной системе, обладают особым характером отношений – **связностью**. Система всегда рассматривается как некоторая обособленная часть общего. Элементы системы взаимодействуют друг с другом иначе, чем с другими системами, что обуславливает ее обособление. Все, что не относится к данной системе, рассматривается как **внешняя среда** по отношению к системе.

Элемент системы – условно неделимая, самостоятельно функционирующая часть системы.

Компонент системы – множество относительно однородных элементов, объединенных общими функциями при обеспечении выполнения общих целей развития системы.

Функциональная среда системы – характерная для системы совокупность законов, алгоритмов и параметров, по которым осуществляется взаимодействие между элементами системы и функционирование системы в целом.

Структура системы – совокупность связей, по которым обеспечивается энерго-, массо- и информационный обмен между элементами системы, определяющий функционирование системы в целом и способы ее взаимодействия с внешней средой.



*Дайте определение системы, компонента и элемента системы. Какими свойствами должны обладать элементы системы?
Что такое внешняя среда по отношению к системе?
Что такое функциональная среда системы?
Что такое структура системы?*

3.2.3. Свойства системы



Задание 3.2.2. Назовите основные свойства системы. Дайте их краткую характеристику.

Важнейшим и определяющим свойством системы является ее **целостность**. Свойство целостности обуславливается целесообразным взаимодействием элементов системы в соответствии с общей целью ее функционирования. Но целое всегда обладает и качественно иными свойствами, не выводимыми из свойств отдельных ее элементов. Это свойство называется **эмерджентностью**. Оно присуще всем сложным системам. Лес обладает свойствами, которыми не обладают отдельные деревья. Сельскохозяйственная отрасль отличается от отдельно взятых предприятий и т.д.

Эмерджентность является формой реализации некоторых свойств связности и организованности системы.

Связность – особый характер взаимоотношений между ее элементами. Именно это свойство позволяет вычлнить систему из окружающей среды. Свойство связности проявляется в форме определенной упорядоченности отношений между элементами определенной внутренней структуры.

Со свойством связности тесно связано понятие **разнообразия**. Степень разнообразия зависит от числа элементов системы. Максимальное разнообразие определяется как

$$H = \log_2 N,$$

где N – число элементов системы. Максимальное разнообразие соответствует тому случаю, когда поведение одного элемента не зависит от поведения других, т.е. элементы не связаны между собой. Число независимых характеристик называют числом степеней свободы. Число степеней свободы любой системы ограничено. Целенаправленное функционирование системы возможно только благодаря ограничению ее разнообразия. Ограничение разнообразия лежит в основе управления системой.

Сложность – определяется числом элементов, образующих систему, степенью разветвленности ее внутренней структуры, характером функционирования (одноцелевое или многоцелевое).

Организованность – проявляется в изменении соотношения между нарастающей сложностью системы и совершенствованием ее структуры. Совершенствование структуры осуществляется путем организации новых форм взаимосвязей и взаимодействий между элементами системы.



Что такое разнообразие? Чем оно определяется? Приведите примеры биологических систем и охарактеризуйте их свойства.

3.2.4. Система и окружающая среда

Выделение системы из окружающей среды предполагает разбиение явления на две части: система и внешняя по отношению к ней среда.



Задание 3.2.3. Охарактеризуйте факторы внешней среды для какой-либо биологической системы.

Среда оказывает на систему воздействие через определенные воздействия. Факторы внешней среды, осуществляющие эти воздействия, называются **входными величинами**. Для растения входными величинами являются солнечная радиация, температура воздуха, почвенная влага, минеральное питание, механические воздействия и др.

Факторы, определяющие воздействие системы на среду, называются **выходными величинами**. Выходные величины для системы "растение" – нарастание органической массы, плодоношение, выделение кислорода при фотосинтезе и углекислого газа в процессе дыхания и т.д.

Глубина исследования системы зависит от степени детализации переменных на входе и на выходе. Степень детализации называют разрешающим уровнем исследования системы. Минимальным является разрешающий уровень, при котором исследователь различает один вход и один выход. Например, при изучении влияния удобрений на урожай можно ограничиться рассмотрением одной входной величины – внесением общей дозы удобрений, и одной на выходе – урожайностью. При более глубоких исследованиях можно рассмотреть формы минеральных веществ, сроки и способы их внесения и т.д., а на выходе – изменения в листовой поверхности, форм ветвления, интенсивность процессов фотосинтеза, роста, развития и т.д.



*Что такое входные и выходные величины? Как они влияют на систему?
Что такое разрешающий уровень системы?*

3.2.5. Классификация систем

Существуют различные классификации систем.



Какие классификации систем существуют?

Системы, созданные без участия человека, являются **естественными**, системы, созданные людьми – **искусственными**.

По характеру взаимодействия с внешней средой различают системы **открытые** и **замкнутые**. Открытая система находится во взаимодействии со средой. В закрытых системах элементы взаимодействуют друг с другом без взаимодействия с окружающей средой. Строго говоря, таких систем быть не может. Однако в ряде случаев можно рассматривать некоторые системы, абстрагируясь от внешней среды. Например, вычислительная машина, выполняющая вычисления в автоматическом режиме.

Если в процессе взаимодействий последовательность событий "причина–следствие" predetermined заранее, говорят о **детерминированных** системах. Связи в них носят жесткий, функциональный характер. С точки зрения управления эти системы интереса не представляют, хотя и в детерминированных системах могут происходить сбои. Например, при нажатии на выключатель должен загореться свет. Но в некоторых случаях это может не произойти.

Чаще встречаются **вероятностные** системы. Последовательность событий в таких системах носит вероятностный характер. Поведение таких систем предсказать точно невозможно, только с некоторой вероятностью.

По степени сложности системы делят на простые, сложные и очень сложные.

Простыми называют системы, состоящие из небольшого числа элементов, с простыми взаимосвязями, неразветвленной структурой и предназначенные для выполнения элементарных функций (например, чередование культур в севообороте).

Сложной называется система с большим числом элементов, взаимосвязей и взаимодействий, характер их разветвленный, выполняемые функции разнообразны (например, сельскохозяйственное предприятие).

Очень сложными системами принято называть системы, сущность взаимосвязей в которых не вполне понятна, недостаточно изучена. Очень сложными системами являются мозг, вселенная, общество.

Границы приведенных классификаций весьма условны. Жестких критериев дифференциации систем по сложности нет.

3.2.6. Иерархические структуры систем

Для любых сложных систем характерны многоуровневые (**иерархические**) структуры. Структуры в зависимости от выбранной точки отсчета и критерия разбиения могут быть вертикальными и горизонтальными.

Иерархические структуры распространены повсеместно и носят универсальный характер. Наличие такой структуры обеспечивает системе высокую надежность функционирования, благодаря возможности создания элементной избыточности. Эффективность функционирования иерархической структуры зависит от ее структуры, формы связей в иерархии.



|| Чем определяется эффективность функционирования иерархической структуры?

3.2.7. Динамические системы

При рассмотрении отношений системы со средой входные и выходные величины выступают как переменные, которые могут принимать различные значения. Найти значения наиболее существенных переменных системы – значит охарактеризовать ее состояние.

В некоторых системах значения переменных изменяются постепенно с течением времени. В других – изменения происходят скачками, между которыми система остается неизменной в течение некоторого времени. Такие системы называют **статическими**. Реально статические системы существуют только на определенном отрезке времени.

Если переход из одного состояния системы в другое происходит не скачкообразно, а на протяжении некоторого периода времени, системы называют **динамическими**.

Последовательное изменение состояний системы называется **движением**. Движение включает в себя любое изменение состояния системы во времени.

Если при изучении состояний системы рассматривают только входные и выходные величины, без учета протекающих при этом процессов, говорят, что систему изучают методом **"черного ящика"**.

Абстрагирование от структуры системы позволяет изучать одними и теми же методами системы совершенно различной структуры – методом моделирования.



|| Что такое динамические системы и в чем состоит их движение?

3.2.8. Устойчивость динамических систем

Динамическая система в процессе движения может находиться в трех различных состояниях: равновесном, переходном и периодическом.



Задание 3.2.4. Охарактеризуйте состояния динамической системы.

Состояние системы называется **равновесным**, если ни одна из существенных характеристик не изменяется во времени.

Переходным называется такой тип поведения системы, когда она находится в состоянии перехода из некоторого начального состояния в какое-либо установившееся. Этот тип характерен для экономических систем.

Если система через равные интервалы времени возвращается в одни и те же состояния, то данный режим называется **периодическим**. Например, тенденция урожайности в зависимости от солнечной активности имеет 11-летний цикл.

Важнейшей характеристикой поведения динамических систем является их устойчивость. **Устойчивость** – это постоянство состояния системы или постоянство последовательности некоторых ее состояний во времени в процессе ее преобразований. Понятие устойчивости в живых организмах связано с понятием гомеостаза (способность живых организмов обеспечивать оптимальный режим внутренней среды путем поддержания постоянства существенных переменных: температура, состав клеточной жидкости и т.д.). Обеспечение постоянства существенных параметров системы достигается за счет процессов саморегулирования в живых организмах, благодаря чему устраняются последствия воздействия случайных влияний среды на отдельные подсистемы организма.

Понятие устойчивости относится не к системе в целом, а к какому-либо свойству ее поведения, причем поведения системы в целом, а не отдельных ее частей.

Понятие устойчивости динамических систем связано с тем, что отклонения некоторых параметров системы от заданных не превышает допустимых значений.

Система, устойчивая по одному признаку, может быть неустойчивой по другому.



Что такое устойчивость динамической системы? С каким биологическим понятием оно связано? Чем определяется устойчивость?

3.2.9. Особенности биологических систем

Важнейший метод изучения биологических систем – моделирование. Биологические системы характеризуются сложной иерархической структурой. Например, если в качестве отправного уровня рассматривать биоценоз (совокупность систем организмов), то иерархия будет выглядеть следующим образом:

биоценоз–вид–организм–орган–ткань–клетка–субклеточные структуры.

Фундаментальная особенность биологических систем – способность к самоорганизации. Только живым системам присущи такие свойства, как раздражимость, размножение, обмен веществ.



Что такое положительная и отрицательная обратная связь? Чем определяется стабильность биологических систем?

Основная форма управления в биологических системах – целесообразная **саморегуляция**. Оптимизация поведения биологических систем в изменяющемся окружающем мире осуществляется в форме саморегулирования. Целесообразность поведения биологических систем заключается в их стремлении к повышению организованности, совершенствованию внутренней структуры, надежности функционирования.

Биологическая система обладает свойством **стабилизации**, т.е. может поддерживать некоторые свои параметры при возмущении внешней среды.

При длительном возмущении внешней среды биологическая система может перестраивать свою структуру, т.е. обладает свойством **адаптивности**.

При систематических изменениях окружающей среды биологическая система приспособляется к ним, т.е. она обладает свойством **эволюции**.

Биологические системы обладают свойством **самовосстановления** и **самовоспроизводства**.

Механизм обратной связи в биологических системах также специфичен. В процессе эволюции происходят определенные изменения в наследственности. Эти свойства закрепляются в процессе размножения. Если новые поколения оказываются более приспособленными, то реализуется положительная обратная связь. Если же новые особи менее приспособлены, то они погибают, т.е. срабатывает механизм отрицательной обратной связи, а система стабилизируется на исходном состоянии.

Стабильность биологических систем не означает постоянного равновесия их состояния. Наиболее характерным типом поведения биологических систем является переходный режим. При характеристике поведения биологических систем обычно говорят об "устойчивом равновесии".

3.3. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Сохранение целостности системы при постоянно меняющихся внешних условиях можно представить как достижение некоего равновесия со средой ее обитания. Это равновесие в общем случае подвижно. Устойчивость подвижного равновесия выражается в обобщенном **принципе Ле Шателье**. Этот принцип известен из химии и характеризует изменения равновесия химических реакций в смесях различных веществ при оказании на них различных влияний – изменения температуры смеси, давления, удаления (накопление) в смеси реагентов и продуктов отдельных реакций, а также иных превращений. Если такая реакция идет с поглощением тепла, то нагревание смеси увеличивает скорость реакции, а охлаждение уменьшает. В смесях различных веществ, когда одновременно могут идти реакции образования (распада) какого-либо соединения, внешние воздействия приводят к соответствующим изменениям скоростей этих реакций и концентрации данного соединения в смеси.



Задание 3.3.1. Сформулируйте закон адаптации для сложных систем. Приведите примеры адаптации экологических систем.

Обобщение принципа Ле Шателье применительно к любым сложным системам называется **законом адаптации**. Согласно этому закону, всякая система стремится измениться таким образом, чтобы свести к минимуму эффект внешнего воздействия.

При этом, если интегральные показатели системы при отсутствии изменений внешней среды остаются постоянными, наблюдается состояние **гомеостаза**. Если же они колеблются около некоего среднего положения, оставаясь в определенных рамках, то это – состояние **гомеокинеза**.

Гомеостаз сложных систем достигается посредством целого комплекса механизмов. Примером выраженного состояния гомеостаза могут быть сформировавшиеся зональные геоэкосистемы, содержащие биотические и абиотические компоненты, находящиеся в квазистационарном состоянии, имеющие определенный почвенный покров, растительные сообщества, типы режимов функционирования.

Однако абсолютный гомеостаз недостижим. В природе наиболее часто встречается гомеокинез, так как даже в отсутствие резких изменений интегральные показатели систем колеблются во времени случайным образом. Такие колебания незначительны, поэтому при описании систем можно использовать средние характеристики интегральных показателей на некотором отрезке времени.

Гомеостаз и гомеокинез возможны только при сохранении системы как единого целого с сохранением ее структуры, при этом важен рассматриваемый интервал времени.

Свойство самосохранения сложных биологических систем в соответствии с законом адаптации в первую очередь направлено на то, чтобы уменьшить неблагоприятные воздействия на систему окружающей среды. Сохранение биологической системы в целостном виде осуществляется посредством обратной связи. *Реакции живого организма, способствующие уменьшению влияния окружающей среды – отрицательные обратные связи.*

Положительные обратные связи вызывают изменения в системах по типу цепной реакции. Если бы они встречались часто, т.е. система меняла бы свои параметры от каждого небольшого воздействия, то биологические системы не могли бы существовать физически.

Дублирование систем обратной связи повышает устойчивость работы систем, их эффективность и надежность. Эффективность обратных связей повышает целостность системы. Возможности обратных связей не безграничны. Например, температура воздуха может изменяться очень сильно, однако температура теплокровного животного будет постоянной, но до определенного предела. Такое состояние в биологии называют срывом адаптации. Система либо гибнет, либо вынуждена существенно (скачкообразно) измениться, чтобы соответствовать этим изменениям.

В экологии примером смен состояния системы может быть замена лесных насаждений степными и наоборот.

Состояние системы – это режим ее функционирования, когда интегральные показатели находятся в гомеостазе (или гомеокинезе) с окружающей средой, а обобщенная структура системы находится неизменной во времени и в пространстве. Можно доказать математически, что количество состояний системы ограничено.

Конечность числа состояний системы не позволяет добиваться от системы не свойственных ей (произвольных) состояний. Ограниченный, строго оцененный через определенные промежутки времени характер интегральных показателей и внешних воздействий и характер состояний системы определяются ее внутренней структурой.

Смена состояний системы сопровождается изменениями ее интегральных показателей и структурными перестройками разного масштаба. При этом система может сохранить ряд своих наиболее важных показателей, остается целостной и продолжает входить в качестве компонента в другую систему более высокого уровня, в которую она входила и ранее. Физические и иные потери могут наблюдаться на уровне элементов гетерогенной системы.

Подобная смена состояний называется **кризисом**. Кризис не ведет к разрушению системы, но ведет к ее существенной перестройке. Фактически кризис для большинства систем есть механизм обновления, экстраординарный механизм адаптации к новым условиям (например, экономический кризис). Потери в системе происходят на уровне ликвидации отдельных предприятий или отраслей. Компоненты системы (энергетика, транспорт, сельское хозяйство) при этом остаются неизменными.

Более глобальные изменения в системе называются **катастрофой**. Радикальные изменения в этом случае навязываются системе извне. Катастрофа характеризуется радикальным изменением структуры системы. Отдельные ее компоненты исчезают. На их месте могут возникать новые. Идет повсеместное уничтожение старых и появление новых элементов. Морфология системы изменяется. Интегральные показатели системы меняются значительно и резко. Пример экологической катастрофы – радикальное преобразование природы в регионе (бассейн Арала, Братск, Череповец, Среднее Приобье).

Еще более радикальные изменения системы называются **катаклизмами**. Катаклизм по существу есть разрушение системы. Подавляющее большинство звеньев ее структуры разрушается. Исчезает основная часть компонентов и элементов. Воссоздание системы после катаклизма, по сути, является построением новой системы с использованием элементов старой. Интегральные показатели системы после катаклизма условно принимают равными нулю, которые характеризуют отсутствие данной системы в прежнем качестве.

Приведенная градация изменений системы характеризует глубину этих изменений, имеющих для системы как отрицательные, так и положительные воздействия. Например, в случае глобального потепления тундра может быть заменена тропиками. Произойдет катастрофа для тундры, но не для всей экосистемы. Будет реализована способность живых систем к сохранению результата при решительном изменении путей его достижения. Реализуется общесистемный принцип "выживания через кризис".

*Минимальный отрезок времени, в течение которого происходит смена состояний системы, называется **характерным временем развития системы***. Измерять интегральные показатели системы на интервалах времени, меньших, характерных некорректно. Например, измерение плодородия почвы формируется в течение вегетационного периода.

Методология построения интегральных показателей базируется на построении некоторых математических моделей, опирающихся на изучении реальной структуры системы и имитирующих реальные процессы массо-, энерго- и информационного обмена между компонентами системы.

Эта модель должна быть достаточно компактной, адекватно передавать эффекты состояний. При имитации режима поведения системы результаты моделирования и работы экспертной системы, описывающей данный объект, должны совпадать.



|| *Что такое состояние системы? Какими состояниями может характеризоваться система? Как происходит смена состояний?*

3.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ

Прикладная экология исследует взаимоотношения Человека и Природы методами точных и естественных наук. Включает в себя биологию, гидрологию, экологию и дру-

гие науки. В решении задач прикладной экологии главная роль принадлежит математике (математическому моделированию).



Задание 3.4.1. *Сформулируйте суть балансового метода моделирования экологических систем. Приведите пример балансов.*

Один из методов, используемых при решении задач прикладной экологии, – это балансовый метод. Суть его была изложена еще в учении Вернадского. Основная мысль учения Вернадского состоит в том, что все процессы в биосфере являются звеньями того или иного геохимического цикла. Задача использования математического аппарата состоит в том, чтобы найти критические воздействия, за пределами которых возможно разрушение сложившихся в биосфере взаимоотношений. Это можно сделать, решив задачу о балансах основных химических элементов и их соединений, балансе энергии; установить имеющиеся нарушения в этих балансах, выявить тенденции скорости увеличения этих нарушений и найти пути их устранения.

Баланс:

$$\sum_{i=1}^k A_i - \sum_{l=1}^m A_l = \Delta,$$

где A_i – приходные статьи баланса; A_l – расходные статьи баланса; Δ – сальдо. Если $\Delta = 0$ – баланс соблюдается; $\Delta > 0$ – приходная часть превышает расходную; $\Delta < 0$ – расходная часть превышает приходную.

Антропогенная деятельность (уничтожение лесов, загрязнение океана, уничтожение растительности) сокращает приходную часть баланса. В то же время расширение химических производств, строительство ТЭЦ, широкое использование двигателей внутреннего сгорания приводят к увеличению расходной статьи баланса.

Однако балансовые соотношения глобального масштаба не несут в себе достаточной информации о нарушениях равновесия биосферы. Причины этого следующие.

1. При удовлетворительном состоянии глобального баланса могут наблюдаться существенные нарушения в отдельных биогеоценозах.
2. Последствия от вмешательства человека в природу требуют изучения балансов в динамике.



Почему балансовые соотношения глобального масштаба не несут в себе достаточной информации о нарушениях равновесия биосферы?

Для описания динамики используют аппарат дифференциальных уравнений:

$$A_i' = \frac{dA_i}{dt}; A_l' = \frac{dA_l}{dt}, \text{ – скорости изменения } A_i \text{ и } A_l.$$

Вектор \bar{A} – включает в себя компоненты приходной и расходной частей баланса, а также внешние факторы U_i (в частности, воздействия со стороны человека), т.е.

$$\frac{d}{dt} A_i = f_i(A_1, A_2, \dots, A_n, U_1, U_2, \dots, U_m).$$

Отсюда можно получить скорость изменения Δ :

$$\frac{d}{dt} \Delta = \sum_{i=1}^k f_i(\bar{A}, \bar{U}) - \sum_{i=k}^n f_i(\bar{A}, \bar{U}).$$

В явном виде Δt выражается так:

$$\Delta t = \Delta(0) + \int_0^t \left(\sum_{i=1}^k f_i(\bar{A}, \bar{U}) - \sum_{i=k}^n f_i(\bar{A}, \bar{U}) \right) dt.$$



Задание 3.4.2. Сформулируйте суть использования аппарата дифференциальных уравнений для решения задач прикладной экологии.

Если нам известны значения каждой из компонент вектора \bar{A} в каждый момент времени t , то мы можем точно узнать Δt . Построив на графике поведение всех компонент, мы получим фазовое пространство, в котором выполняются балансы. Введя ограничения для отдельных компонент вектора \bar{A} , для которых приходная часть баланса не может превышать расходную, получим критическую область фазового пространства. Попадание в эту область свидетельствует о том, что изменение величин превосходит предельно допустимое значение.

Такая постановка задачи значительно расширяет первоначальную, так как к критической области можно отнести и те точки фазового пространства, в которых биосфера приходит в нежелательное состояние, что устраняет недостатки балансового подхода.

Однако в своих рассуждениях мы сделали важное предположение о том, что нам известны функции, находящиеся в правой части уравнения. На самом деле, о характере этих функций мы можем судить только отчасти по характеру поведения всей системы. А суждение о характере поведения всей биосферы сделать еще труднее. Но возможно сделать достаточно точные предположения о характере поведения отдельных хорошо изученных биогеоценозов. Для введения в анализ таких функций используют аппарат математического моделирования.



Какие недостатки балансового метода устраняет аппарат дифференциальных уравнений?

3.5. ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

Рассмотрим популяцию, пользующуюся для своей жизнедеятельности каким-либо внешним источником энергии. Будем считать, что популяция не испытывает никаких внешних воздействий. Пусть количественной мерой популяции в конкретный момент

времени является $x(t)$. (Например, $x(t)$ – численность животных). За интервал времени Δt – численность популяции изменится как $x(t + \Delta t) - x(t)$. Пусть в популяции происходят два противоположных процесса: размножение и естественная смерть. Скорость изменения биомассы популяции – производная $x'(t) = a_1 p_1 - a_2 p_2$, где a_1 и a_2 – коэффициенты; p_1 и p_2 – соответственно интенсивность естественного размножения и естественной смерти.

Какой должна быть функция p_1 – функция интенсивности размножения? Пусть внешний источник энергии (пища) таков, что в момент времени t он может обеспечить нормальную жизнедеятельность количеству особей $= E(t)$. Тогда, если число особей $x(t) < E(t)$, они не испытывают недостатка в пище, и интенсивность размножения можно считать эквивалентной $x(t)$. Если $x(t) > E(t)$, то только $E(t)$ особей может вести нормальный образ жизни и p_1 эквивалентно $E(t)$.

Таким образом, $p_1 = \min \{x(t), E(t)\}$.

Будем считать, что процесс естественного отмирания идет с интенсивностью, эквивалентной их численности $x(t)$, т.е. $p_2(t) = x(t)$. Тогда

$$x'(t) = \begin{cases} a_1 x(t) - a_2 x(t), & x(t) \leq E(t), \\ a_1 E(t) - a_2 x(t), & x(t) > E(t). \end{cases}$$

Причем правые части уравнений, хотя и записаны в виде двух разных функций, являются непрерывной функцией. Решение этого уравнения дает в общем виде

$$x'(t) = \begin{cases} x_0 e^{(a_1 - a_2)t}, & x(t) \leq E(t), \\ x_0 e^{-a_2 t} + \int_0^t a_1 E(\tau) e^{-a_2(t-\tau)} d\tau, & x(t) > E(t). \end{cases}$$

Если функция $E(t) = \text{const}$ и не зависит от t , тогда решение будет записано в более простом виде

$$x'(t) = \begin{cases} x_0 e^{(a_1 - a_2)t}, & x(t) \leq E(t), \\ x_0 e^{-a_2 t} + \frac{a_1 E}{a_2} (1 - e^{-a_2 t}), & x(t) > E(t). \end{cases}$$

Из смысла слагаемых $a_1, a_2 > 0$.

Если $a_1 < a_2$, то популяция вымирает, ее численность уменьшается по показательному закону.

Если $a_1 > a_2$ и в начальный момент времени численность популяции не была равна 0, то при $x(t) \rightarrow a_1 E / a_2$ монотонно возрастает, если $x_0 < a_1 E / a_2$, и монотонно убывает, если $x_0 > a_1 E / a_2$.

Таким образом, величина $a_1 E / a_2$ является равновесным состоянием, определяемым как внутренними законами развития, так и внешним фактором E . Скорость изменения функции E ограничена во времени и не превышает определенной величины.

В рассмотренном примере предполагалось, что динамика численности популяции определяется процессами жизнедеятельности. В свою очередь, интенсивность этих

процессов определяется некоторыми факторами, каждый из которых является узким местом.

Таким образом, численность всей популяции будет определяться тем фактором, который находится в минимуме (закон минимума Либиха). Мы не рассматривали случай, когда $a_1 = a_2$, так как он соответствует неустойчивому состоянию популяции.



Какими должны быть соотношения между интенсивностью естественного размножения и естественной смерти, чтобы простейшая популяция находилась в равновесном состоянии?

3.5.1. Сложная модель

Имеются две популяции – хищников и жертв.

N_1 – численность жертв; N_2 – численность хищников.

Процессы, протекающие в таком сообществе:

- размножение жертвы,
- естественная смерть жертвы,
- поедание жертвы хищником,
- естественная смерть хищника,
- размножение хищников.

Имеется множество самых различных факторов, влияющих на интенсивность этих процессов.

Будем считать, что процесс размножения жертв P_1 лимитируется либо общей численностью жертв N_1 , либо неким внешним фактором E . Процесс размножения хищника P_3 будет лимитироваться либо численностью популяции хищников N_2 , либо численностью съедаемых жертв $= \lambda N_1 N_2$ (возможность встречи между хищником и жертвой), либо внешним фактором F . Процесс уменьшения численности популяции жертв зависит от аналогичных факторов. Процессы вымирания жертв и хищников P_2 и P_4 от естественной смерти будем считать зависимыми только от численности жертв и хищников. Скорости изменения численности популяций будут записаны в виде дифференциальных уравнений. Решение уравнений можно показать на графике (рис. 3.3).

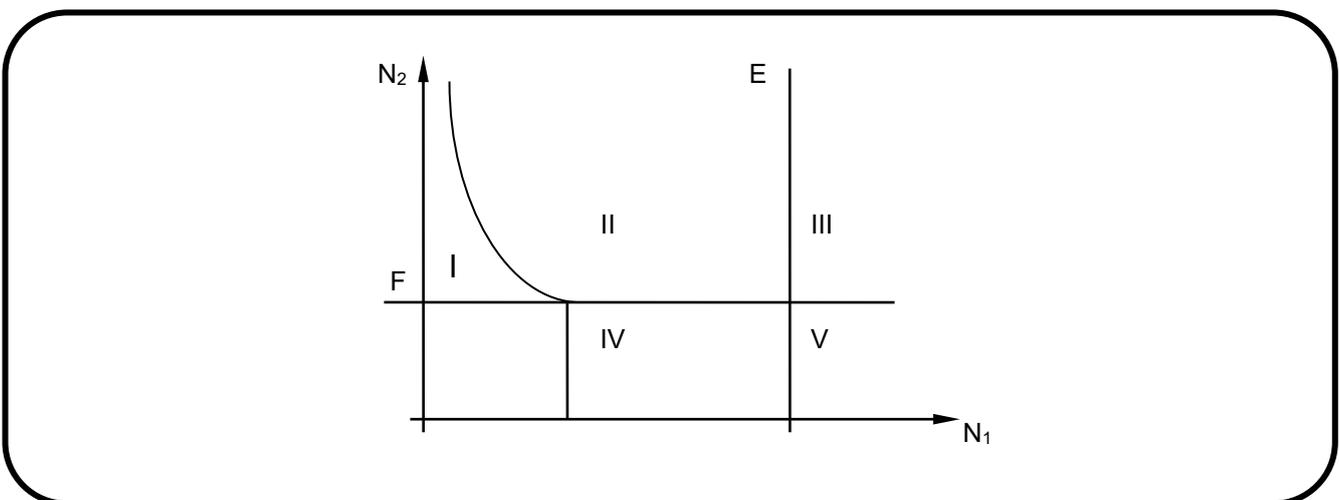


Рис. 3.3.

Область I описывает взаимодействие хищников и жертв без учета внешних факторов (эти уравнения изучал В.Вольтерра в 1925 г.). Траекторией такой системы уравнений будут "вольтерровские эллипсы" – замкнутые кривые с центром в точке равновесия (рис. 3.4).

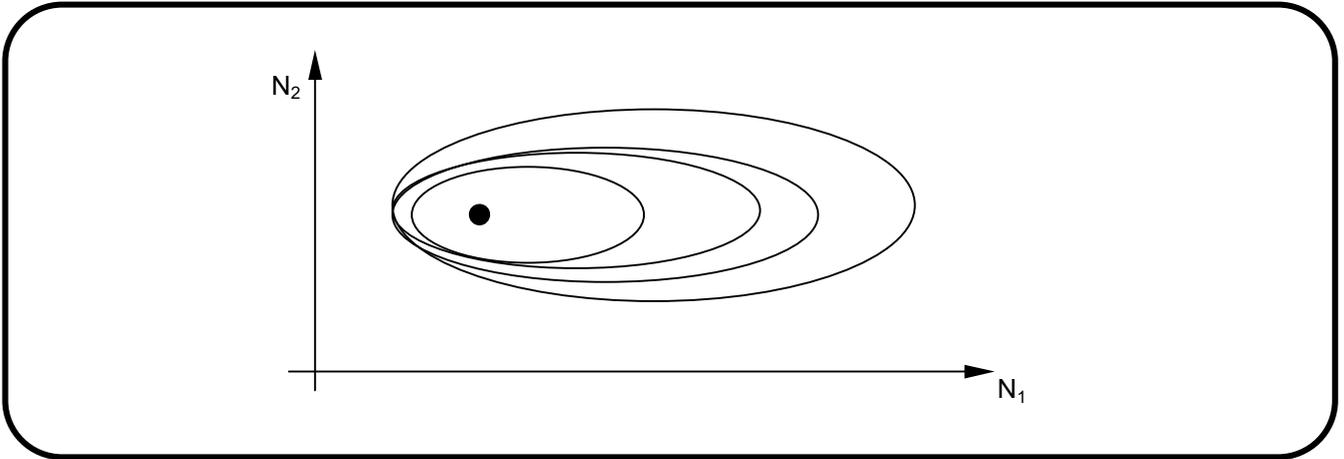


Рис. 3.4.

Общая картина всех фазовых точек представлена на рис. 3.5.

Почти все точки фазовой плоскости обладают тем свойством, что через каждую из них проходит единственная траектория системы. Точки, в которых это свойство нарушается, – особенные – А и В.

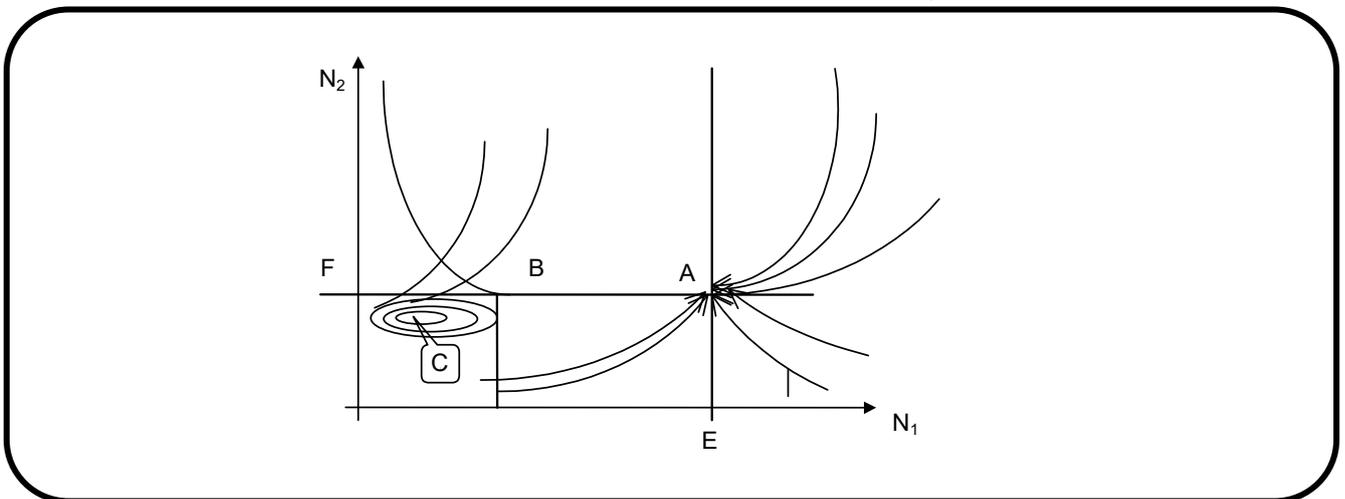


Рис. 3.5. Общая картина всех фазовых точек

Точка А – устойчивая точка (в нее все траектории входят и ни одна не выходит), точка В – неустойчивая (из нее выходят траектории, параллельные оси N_1). Это означает, что, попав или приблизившись достаточно близко к точке В, система уйдет по траектории параллельно оси N_1). Внутри области I существует предельный цикл, т.е. замкнутый овал, по которому происходит движение системы. Точки, лежащие близко от этого овала "наматываются" на него. Внутри эллипса лежит точка С, движение в которой останавливается.



Какими процессами характеризуется популяция, состоящая из хищников и жертв?

3.5.2. Задачи линейного программирования

Методы математического программирования базируются на хорошо разработанной теории математического программирования и позволяют решать широкий спектр задач отыскания экстремума функции (т.е. максимума или минимума), как правило, при наличии ограничений по использованию ресурсов. Наибольшее распространение получили методы линейного программирования, имеющие большое число разнообразных методов, реализованных на компьютерах. Все методы характеризуются линейной записью целевой функции, а также всех ограничений.

К задаче линейного программирования можно свести задачу борьбы с сельскохозяйственными вредителями, которая строится на основе модели хищник–жертва.

Пусть x – численность вредителей в момент времени t ;

y_t – хищник (воробьи, голуби);

u_t – управление, заключающееся в изменении концентрации ядохимикатов, уменьшающих коэффициенты k_1 и k_2 – воспроизводство (функции k_1 и k_2 монотонно убывают), то модель можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} x_{t+1} = (1 + k_1(u_t))x_t - \lambda x_t y_t, \\ y_{t+1} = (1 + k_2(u_t))y_t. \end{cases}$$

Пусть α – ущерб, наносимый одной особью жертвы; β – одной особью хищника. Тогда суммарный ущерб в момент времени t будет $= \alpha x_t + \beta y_t$. Предполагая, что ущерб суммируется, можно поставить задачу выбора такого управления u_t на каждом шаге, при котором суммарный ущерб за T минимизировался бы, т.е.

$$\sum_{t=1}^T (\alpha x_t + \beta y_t) \rightarrow \min.$$

Результат решения такой модели отнюдь не тривиален. Если увеличивать концентрацию ядохимикатов, то, начиная с некоторого u^* , большое количество яда убьет не только жертвы, но и хищников, количество жертв начнет увеличиваться в геометрической прогрессии, и суммарный ущерб станет колоссален.



В каких ситуациях можно модель "хищник–жертва" свести с задачей линейного программирования? Будет ли решение такой задачи тривиальным?

3.6. МЕТОДЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Статистические методы прогнозирования базируются на использовании накопленной статистической информации об изменении показателей, характеризующих анализируемый объект или процесс.



Задание 3.6.1. *Подготовьте данные для статистической обработки различными методами. Обработайте данные с использованием компьютерных программ и сделайте анализ полученных результатов.*

Для анализа с использованием статистических методов необходимо, чтобы число наблюдений было достаточно большим, не менее 20–30, иначе достоверность выводов существенно снижается.

При исследовании взаимосвязей между признаками на основе статистического анализа обычно решают следующие задачи:

- ➔ Существует ли связь между результатом и выбранными для анализа факторами;
- ➔ Какова количественная мера связи;
- ➔ Какова аналитическая форма выражения связи;
- ➔ Какова надежность найденной закономерности и возможности использования параметров уравнения для решения оптимизационных моделей.

Ответ на первый вопрос дают **дисперсионный и корреляционный анализ**. Количественную меру зависимости определяют с помощью **регрессионного анализа**.

Для выбора общей **формы зависимости** y от x можно построить график. В этом случае форма зависимости выявляется визуально. Можно подобрать форму зависимости с использованием стандартных программ и выбора наилучшей формы с помощью перебора получившихся результатов.

На практике исследования чаще всего начинают с анализа линейной зависимости. Для случая двух переменных y и x линейная зависимость имеет вид:

$$y = a_0 + a_1x,$$

где y – значения результативного признака; x – значения факторного признака; a и b – коэффициенты уравнения (a_0 – свободный член уравнения; на графике он соответствует точке пересечения уравнения регрессии с осью ординат; математическое начало отсчета; a_1 – коэффициент регрессии, который показывает, на сколько единиц в среднем изменится результативный признак y при изменении факторного признака x на 1 ед.).

Кроме линейной, наиболее часто используют следующие виды зависимостей (табл. 3.1).

На основе полученного уравнения регрессии можно получить прогнозируемое значение результативного показателя, задавая значения факторов. Кроме того, анализ уравнения регрессии позволяет оценить роль факторного признака в формировании результативного.

Доля фактора в общей изменчивости может быть измерена с помощью дисперсионного анализа. Для этого общую дисперсию, которая характеризует общую изменчивость результативного признака, раскладывают на дисперсию, обусловленную влиянием заложенного в модель фактора (факторная) и дисперсию, вызываемую случайной

Таблица 3.1

Наиболее часто используемые виды зависимостей

Зависимость	Математическое выражение
Линейная	$y = a_0 + a_1x$
Квадратичная	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$
Гиперболическая	$y = a_0 + a_1/x$
Экспоненциальная	$y = a_0 + e^{a_1x}$
Логарифмическая	$y = a_0 + \log(a_1x)$
Степенная (чаще всего с показателем $n=0,5$)	$y = a_0 + a_1x^n$

компонентой (остаточную). Соотношение факторной дисперсии к общей получило название отношения детерминации

$$\eta^2 = \frac{\sigma^2_{\text{факт}}}{\sigma^2_{\text{общая}}},$$

а корень квадратный из этого отношения – **коэффициент детерминации**

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma^2_{\text{ост}}}{\sigma^2_{\text{общая}}}}$$

(так как $\sigma^2_{\text{общая}} = \sigma^2_{\text{факт}} + \sigma^2_{\text{ост}}$). Этот показатель является универсальным измерителем тесноты связи между признаками и изменяется от 0 до 1. (Коэффициент сохраняет свои свойства и при нелинейной связи между признаками).

Учитывая, что в анализе экономических процессов особое значение имеет влияние производственных факторов на выход продукции, развитие получил один из классов корреляционно-регрессионных моделей – производственные функции.

Производственные функции выражают взаимосвязь факторов с результатами производства. Их задачей является исследование количественной меры влияния производственных факторов на конечные результаты. Производственные функции могут быть одно- и многофакторными, линейными и нелинейными.

Наиболее важной характеристикой производственной функции является показатель средней производительности (или эффективности) ресурсных факторов. Средняя производительность i -го ресурса показывает, на сколько единиц увеличится результат производства при увеличении соответствующего фактора на 1 ед. (В уравнении регрессии средней производительности соответствует коэффициент a_i).

При анализе темпов прироста продукции используют **коэффициенты эластичности**, которые показывают, на сколько процентов увеличится результат при увеличении фактора на 1%. Сумма коэффициентов эластичности показывает экономическую эффективность производства. Если сумма >1 , то выход продукции растет более

быстрыми темпами, чем факторы. В противном случае – прирост производства отстает от прироста факторов.

При анализе экономических показателей коэффициенты эластичности используют для анализа возможного замещения одного ресурса другим (например, замена ручного труда машинным).



Какие задачи могут быть решены с помощью методов математико-статистического прогнозирования?

3.7. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Обычно при исследовании сложных систем используют методы, основанные на анализе и математической обработке показателей связи между отдельными элементами и параметрами системы. Среди них – расчет коэффициентов корреляции, регрессионный, факторный и дисперсионный и другие анализы. На основе применения этих методов исследователь пытается сформировать свои представления о функционировании системы. Однако существует множество примеров, когда присутствует ярко выраженная сильная связь между признаками, а коэффициент корреляции при этом равен нулю и наоборот.



Задание 3.7.1. Познакомьтесь с основами теории графов и возможностями ее применения к системному анализу и прогнозированию социально-экологических систем

Традиционно используемые методы связи – это чисто вероятностные статистические характеристики. Вопросы, которые можно решить на основе их использования, весьма ограничены.

Несомненно, понятие величины связи должно использоваться при анализе сложных систем. Однако содержание этого понятия должно быть другим. *Связь должна быть мерой упорядоченности элементов в системе по сравнению с их полной беспорядочностью, когда они находятся вне какой-либо системы; она должна определять энергетические или информационные затраты, возникающие при вхождении элементов в систему.* Такой подход к пониманию связи позволяет глубже понять внутренний механизм сложной системы, поскольку он основан на анализе взаимодействия между элементами, в то время как традиционный анализ обычно ограничен исследованием совокупности состояний этих элементов.

Переход от анализа состояний к анализу взаимодействий элементов системы возможен лишь на основе нетрадиционной **системологии** – техники анализа системы обработки связи. Последовательность этапов анализа системы в этом случае следующая: 1) на основе многомерного массива экспериментальных данных, характеризующих систему и ее элементы, определяют величины связи между элементами и параметрами исследуемой системы; 2) определяют направления связей и выявляют базисные подсистемы – тройки результатов, где два из них рожают третий эмерджентный результат; 3) определяют цель последовательных результатов подсистем.

Если традиционные математико-статистические методы приспособлены для анализа переменных, удовлетворяющих нормальному закону распределения, то указанная информационная технология позволяет обрабатывать естественные распределения

переменных, неявно отображенные в массивах экспериментальных данных, полученных в результате наблюдений за общим поведением системы.

Основой решения многокомпонентных задач являются ориентированные графы (**орграфы**). Начало теории графов было положено Л.Эйлером в 1736 г., но как самостоятельная дисциплина она сформировалась в 30-е годы XX в. При решении многокомпонентных задач большое внимание уделяется системе обратных связей, присутствующих в любой сложной системе. Наглядность и простота метода делает его доступным для использования специалистами, не обладающими широкими познаниями в области прикладной математики.

Геометрически ориентированный граф можно представить в виде набора **вершин**, обозначаемых кружками, и дуг, соединяющих эти вершины. **Дуга** – задает направление от одной вершины к другой. На рис. 3.6 показан орграф из четырех вершин.

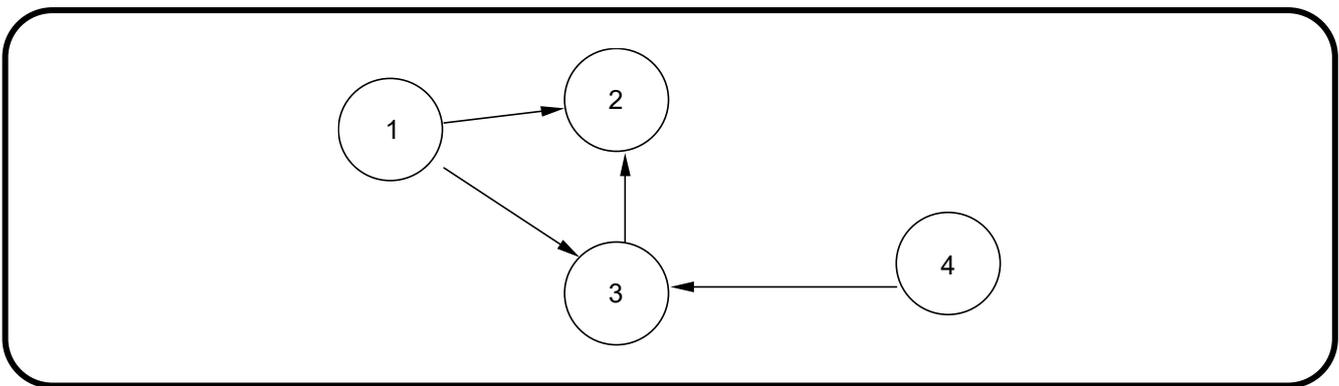


Рис. 3.6. Пример ориентированного графа

Путем в орграфе называется такая конечная последовательность дуг, в которой начало каждой последующей дуги совпадает с концом предыдущей. Дуги можно обозначить парой вершин, которые она соединяет. Например, от вершины 1 к вершине 2 ведут два пути – первый путь $\{(1/2)\}$ и второй путь $\{(1.3); (3.2)\}$. Путь можно записать в виде последовательности вершин, через которые он проходит. Например, второй путь можно записать так $\{1, 3, 2\}$.

Контуром называется путь, начальная вершина которого совпадает с конечной. На рис. 3.6 изображен орграф без контура. На рис. 3.7 представлен орграф с контуром, проходящим через вершины 2, 4 и 3.

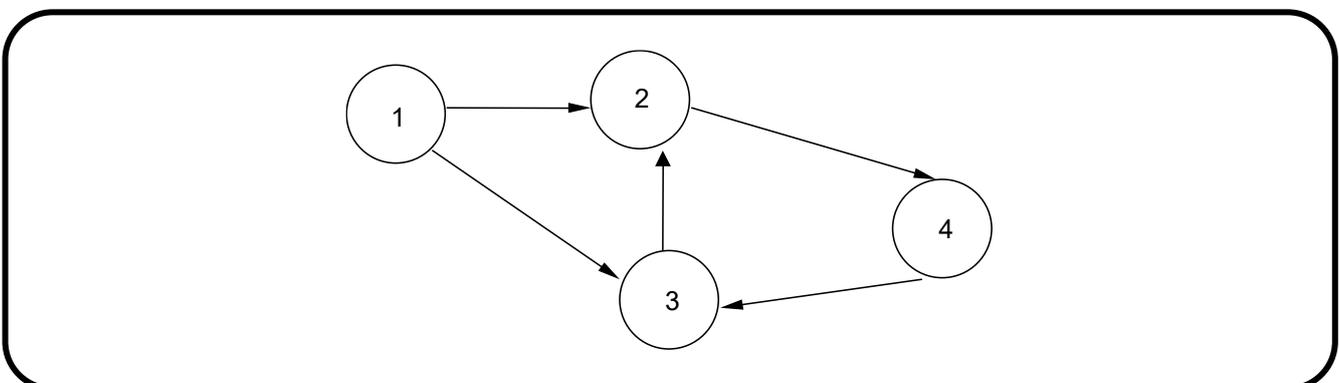


Рис. 3.7. Пример орграфа с контуром

Вершины, в которые не заходят дуги, называются начальными, из которых не выходит ни одна дуга – конечными.



|| *Что такое ориентированный граф?*

Матрицей смежности вершин орграфа называется квадратная матрица, каждый элемент которой равен единице, если есть дуга, идущая от вершины i к вершине j . Если такой дуги нет, то элемент (ij) матрицы смежности равен нулю. При решении многокомпонентных задач используют орграфы, в которых любые вершины i и j может соединять только одна дуга. В табл. 3.2 показана матрица смежности для орграфа, представленного на рис. 3.7.

Таблица 3.2

Показатель i	Показатель j			
	1	2	3	4
1	0	1	1	0
2	0	0	0	1
3	0	1	0	0
4	0	0	1	0

В многокомпонентных задачах в качестве вершин орграфа используют показатели, а дуги показывают влияние изменения одного показателя на изменение другого.

На рис. 3.8 представлен орграф, отражающий проблему состояния окружающей среды и развития крупного промышленного центра.

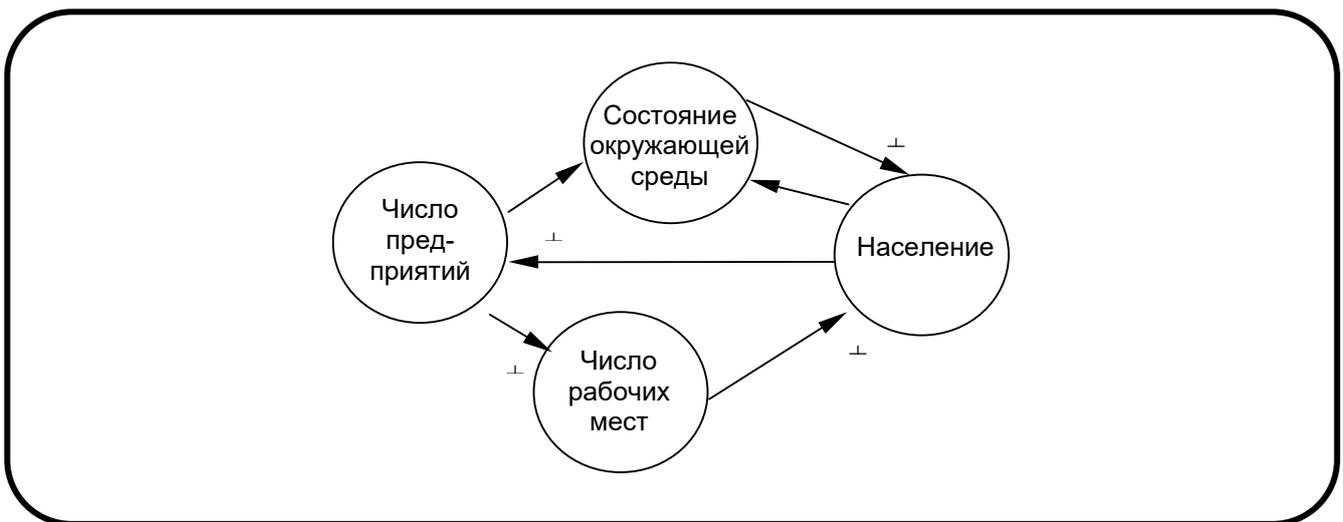


Рис. 3.8. Знаковый орграф изучения развития промышленного центра и состояния окружающей природной среды

Дугам орграфа можно приписать знаки плюс или минус. Знак плюс ставится в том случае, если при увеличении показателя, от которого идет дуга, показатель, к которому дуга приходит, увеличивается. Знак минус ставится в противном случае.

Основа многокомпонентных задач – **импульсные процессы**. Сущность импульсного процесса состоит в том, что какой-либо вершине задается определенное изменение. Эта вершина актуализирует всю систему показателей, поэтому ее называют активной. Таких вершин может быть несколько – обычно исследователь сам задает активные вершины. После этого можно рассчитать значения показателей во всех вершинах, зная начальное значение и шаг приращения. Полученные расчеты можно изобразить в виде таблицы или графика.

Во всех рассматриваемых моделях контуры обеспечивают моделирование обратной связи. Обратная связь может быть положительной или отрицательной. Контур, который увеличивает тенденцию отклонения от начального состояния, называют контуром положительной обратной связи. Контуры, которые подавляют тенденцию отклонения от начального состояния, называют контурами отрицательной обратной связи. По графическому изображению можно определить положительные и отрицательные контуры. Если контур содержит четное число дуг со знаком минус – это контур положительной обратной связи и наоборот.

Наличие в модели многих контуров, усиливающих отклонение, предполагает неустойчивость. В то же время наличие многих контуров, противодействующих отклонению, также может приводить к неустойчивости за счет увеличения колебаний. Если колебания показателей затухают и система приходит в определенное состояние, характеризующееся определенным уровнем показателей, то данная система устойчива.



|| В чем состоит сущность импульсного процесса?

Сфера применения орграфов еще больше расширяется, если использовать не знаковые, а **взвешенные орграфы**. Во взвешенном орграфе каждой дуге присваивается не знак, а коэффициент, больший или меньший единицы со своим знаком.

Особенностью многокомпонентных задач является то, что с помощью орграфов удается объединить в модели различные показатели: социальные, экологические, экономические. Часть этих показателей может иметь статистическую базу, часть может оцениваться качественно. Но метод позволяет оценить тенденцию развития системы. А после уточнения модели можно сформировать количественный прогноз изменения показателей системы, а также найти различные варианты воздействия на изучаемую систему с целью получения лучшего варианта.

При изучении экосистем важно определить, в какие сроки система достигнет того или иного состояния. В этом случае каждой дуге следует поставить в соответствие коэффициент, определяющий влияние одного показателя на другой и задержку реализации изменения одного показателя в ответ на изменение другого. Если задержка равна нулю, то изменения происходят мгновенно. Если же указан определенный интервал времени, то изменения произойдут по его истечении. На рис. 3.9 показаны весовые коэффициенты и время задержки воздействия одного показателя на другой, выраженное в годах.

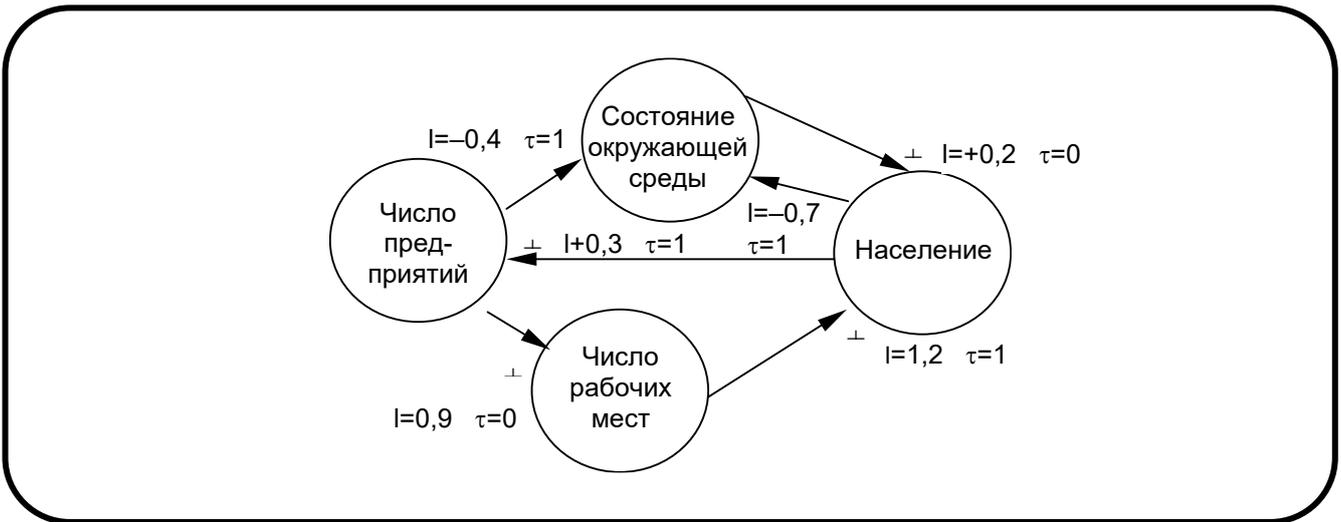


Рис. 3.9. Взвешенный орграф с временными задержками для изучения развития промышленного центра и состояния окружающей среды



Чем отличается знаковый орграф от взвешенного? Какие задачи можно решать с их использованием?

3.7.1. Моделирование сетей питания и экосистемы "хищник-жертва"

Моделирование систем "хищник–жертва" является основой решения разнообразных эколого-экономических задач. База для построения таких моделей – разработка сетей питания. В сети питания вершины графа (обозначаеемые кружками) отображают объекты моделирования; дуги (обозначаеемые стрелками) проводят от хищника к жертве. На рис. 3.10 показана сеть питания для пяти участников.

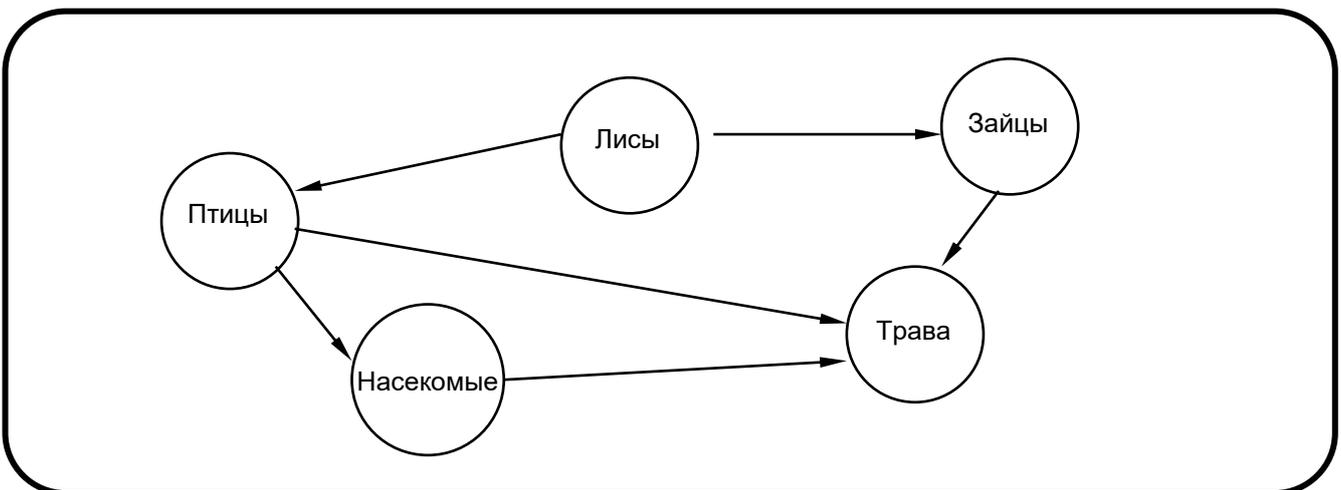


Рис. 3.10. Сеть питания для пяти живых организмов



Задание 3.7.2. Приведите пример и постройте сеть питания для системы "хищник–жертва" на основе теории графов.

Любой живой организм определяется некоторыми показателями, характеризующими нормальное для этого вида состояние окружающей среды. В качестве таких показателей можно использовать температуру, влажность, давление, пищу и т.д.

Область, ограниченная определенными диапазонами изменения показателя, при которых конкретный живой организм существует, называется экологической нишей. Экологические ниши выделяются в экологическом фазовом пространстве, определяемом набором анализируемых показателей. Никакие два вида не имеют в фазовом пространстве одинаковых ниш. Два вида живых организмов конкурируют в том и только в том случае, если их экологические ниши перекрываются. Если же они обладают достаточным сходством, то соответствующие им виды не могут существовать совместно. Это соображение известно под названием принципа конкурирующего исключения или принципа Гаузе.

Для ответа на вопрос, каков минимальный набор показателей для построения экологического фазового пространства, отражающего явления конкуренции, можно построить **граф конкуренции** на основе сетей питания. Живые организмы в графе конкуренции отображаются в виде вершин графа; между двумя вершинами проводится ребро (связь без направления) в том случае, если существует живой организм, который служит пищей для живых организмов, отображаемых вышеуказанными вершинами. На основе сети питания (см. рис. 3.10) можно построить граф конкуренции (рис. 3.11).

Разработка графа конкуренции позволяет выделить конкурирующие виды живых организмов и проанализировать функционирование экосистемы, ее уязвимость.

Широко распространен экологический принцип соответствия роста сложности экосистемы и увеличения ее устойчивости и уменьшения ее уязвимости. Если экосистема представлена сетью питания, то можно воспользоваться различными способами измерения сложности: определить число дуг, найти соотношение числа дуг к числу вершин, рассчитать количество входящих и количество исходящих из вершин дуг и т.д.

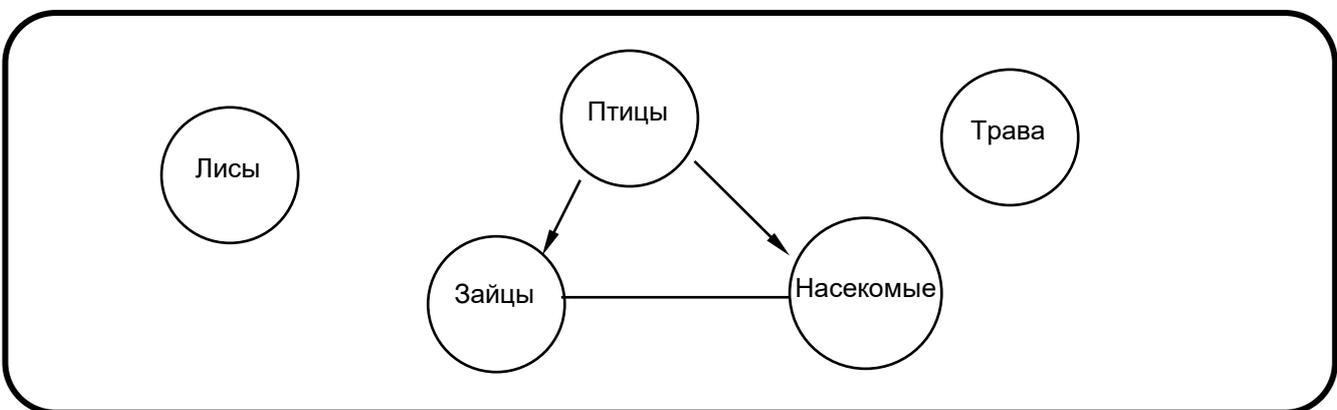


Рис. 3.11. Граф конкуренции для сети питания, представленной на рис. 3.10

Разнообразные расчеты можно провести и на основе графа конкуренции. Для измерения сложности и разнообразия сети питания используют также трофический уровень. Если рассматривается простая пищевая цепь, то трофический уровень определяется весьма просто. Например, на рис. 3.12 представлена пищевая цепь, трофические уровни (каждое звено цепи соответствует одному трофическому уровню).

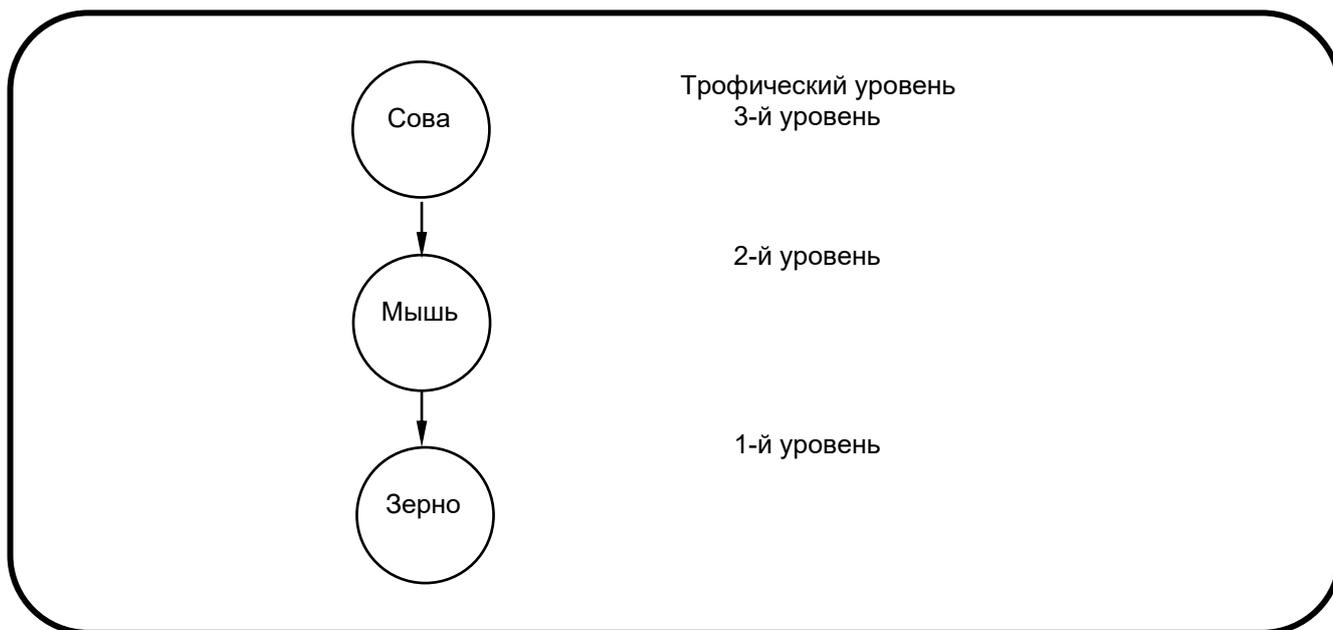


Рис. 3.12. Пищевая цепь, представляющая однозначное определение трофического уровня

Вопрос об определении трофического уровня в общем случае достаточно сложен. Например, достаточно сложно сказать, каков трофический уровень птиц в сети питания на рис. 10. Если трава имеет трофический уровень, равный единице, то по кратчайшему пути птицы имеют трофический уровень, равный 2, а по наиболее длинному – 3. Аналогично можно определить трофический уровень для всех вершин питания.

Лабораторные эксперименты, в которых жертва получала постоянно обильное количество пищи, показали, что хищники могут вызывать циклические колебания численности жертвы. В таких случаях циклические колебания могут усиливаться под влиянием медленной реакции популяции хищника на изменение плотности жертвы.

При выращивании фасолевой зерновки в культурах вместе с хищными наездниками регулярные циклические колебания не совпадают по фазе. Наездник откладывает яйца на личинок жука, которыми и питаются вылупляющиеся из яиц личинки паразита. Поэтому обилие жертвы оказывает влияние на численность взрослых наездников в следующем поколении после того, как личинки перепончатокрылых превращаются во взрослых особей.

При низкой численности популяции хищника и жертвы численность фасолевых зерновок быстро возрастает. По мере возрастания численности жертвы начинает увеличиваться и численность хищников. Когда выедание хищником становится чрезмерным, популяция жертвы сокращается. Полного исчезновения фасолевой зерновки не происходит, поскольку наездники не нападают на все без исключения личинки зерновок. Следовательно, всегда остается небольшое число зерновок, с которых начинается новый цикл роста популяции жертвы, когда хищников становится мало.

Циклические колебания популяции были получены в том случае, если в качестве хищника был использован наездник *Heterospilus*, скорость размножения которого ниже и отстает от скорости роста популяции фасолевой зерновки. Это запаздывание составляет 2–4 поколения и способствует возникновению циклических колебаний.

У наездника *Neocatolaceus* репродуктивный потенциал в 6 раз выше. В эксперименте с этим хищником быстрая реакция его популяции на изменение численности жертвы не позволяет получить циклических колебаний популяции.



*Каким образом численность хищника влияет на численность жертвы?
Почему не происходит полного исчезновения жертвы?*

В случае высокой эффективности хищников популяция жертвы полностью истребляется. Г.Ф.Гаузе продемонстрировал, что этого можно избежать, если какая-то часть жертвы найдет надежное убежище и тем самым избежит уничтожения хищниками.

Установлено, что факторы, обеспечивающие стабильность системы "хищник–жертва", таковы:

- ✓ неэффективность хищника, бегство жертвы;
- ✓ экологические ограничения, налагаемые внешней средой на численность популяции;
- ✓ наличие у хищника альтернативных пищевых ресурсов;
- ✓ уменьшение запаздывания в реакции хищника.

Экосистема "хищник–жертва" имеет две возможные точки равновесия. Правая точка определяется емкостью среды для жертвы в отсутствие хищников. При этом хищник оказывает незначительное воздействие на популяцию жертвы, численность которой ограничивается наличием пищи, пространством обитания и т.д. Вторая точка равновесия определяется способностью жертвы находить убежище. При этом хищник доводит популяцию жертвы до уровня, который обуславливается сложностью места обитания. Таким образом, эффективные хищники доводят популяцию жертвы до минимума; неэффективные – уничтожают наиболее уязвимую часть популяции жертвы, доводя ее численность до уровня, близкого к емкости среды.

Живая природа находится в равновесии. На базе моделирования можно увидеть, что в системе, описывающей взаимодействие живых организмов, существенное изменение численности живых организмов вызывает катастрофическое изменение во всей системе. Кроме того, сильное уменьшение популяции определенного вида животных может привести к полному исчезновению этих животных. В то же время популяции жертв, численность которых близка к емкости среды, непродуктивны, поскольку их потенциал ограничен внутривидовой конкуренцией за ресурсы.



Какие факторы обеспечивают стабильность системы "хищник–жертва"?

Важно отметить, что если вмешательство человека не происходит, животный мир приходит в определенное состояние равновесия по прошествии ряда лет.

3.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ИГР ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО ВЕДЕНИЮ ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕСУРСОВ

При решении различных эколого-экономических задач часто возникает необходимость учитывать неопределенность, возникающую из-за незнания состояния природы. Рассмотрим кратко на упрощенном примере основные термины и принципы теории игр.



Задание 3.8.1. *Познакомьтесь с основами теории игр и ее возможностями при принятии решений.*

Предположим, что природа может находиться в одном из двух возможных состояний. Мистеру Нельсону, переехавшему в новую область, известно, что если идет дождь, то он идет по-настоящему не менее 12 часов. Поэтому, прежде чем выходить из дома, необходимо взглянуть на барометр и одеться по погоде. Барометр может показывать: 1) "ясно", 2) "переменно" и 3) "дождь". У мистера Нельсона имеется три возможности: надеть костюм для хорошей погоды или надеть костюм и плащ, или надеть костюм, плащ, галоши, шляпу и взять зонтик.

Наблюдая за барометром, можно установить, как часто в дождливые (или солнечные) дни барометр показывает "ясно", "переменно" или "дождь". Однако мистер Нельсон не знает, сколько в этой области бывает солнечных дней в году.

Такое положение можно описать следующим образом. Имеются два состояния природы:

- ▶ θ_1 – день без дождя;
- ▶ θ_2 – идет дождь.

Возможны три действия Нельсона:

- a_1 – надеть костюм для хорошей погоды;
- a_2 – надеть плащ;
- a_3 – надеть плащ, галоши, шляпу, взять зонтик.

Нельсон составил для себя таблицу потерь полезности (табл.3.3). При этом он использовал сведения о том, как силен может быть дождь, а также принял во внимание, что носить плащ и галоши довольно тяжело, а оказаться одетым не по погоде иногда просто смешно.

Таблица 3.3

Потери полезности для Нельсона

Состояние природы	Действие		
	a_1	a_2	a_3
θ_1 (нет дождя)	0	1	3
θ_2 (дождь)	5	3	2

При составлении подобных таблиц обычно обозначают через ноль потери полезности для наиболее благоприятной комбинации состояний природы и действия. Затем сравнивают все остальные комбинации с этой – наилучшей. При этом все числа в таблице будут положительными. Потери рассчитывают произвольно, что не влияет на выбор решения в дальнейшем.

При выборе одежды Нельсон смотрит на барометр. При этом случайная величина X – показания барометра, может принимать одно из следующих значений:

- x_1 – "ясно",
- x_2 – "переменно",
- x_3 – "дождь".

Распределение вероятностей X зависит от состояния природы. Вероятности различных состояний X приведены в табл. 3.4, приложенной к барометру.

Таблица 3.4

Вероятности различных показателей барометра x , при истинном состоянии природы θ ; $f(x) | \theta = P\{X = x | \theta\}$

Состояние природы	x_1	x_2	x_3
θ_1	0,60	0,25	0,15
θ_2	0,20	0,30	0,50

Идеальный барометр должен бы показывать 1 в ситуациях, где стоят 0,60 и 0,50 и ноли во всех остальных состояниях. Но все барометры не идеальны, поэтому жители бывают одеты не по погоде.

Теперь Нельсон должен решить, как ему реагировать на показания барометра. План его действий называется в теории игр *стратегия*. В табл.3.5 приведены все возможные стратегии. Часть из них выглядит весьма странно, но часть – вполне разумно.

Таблица 3.5

Возможное наблюдение x	Стратегия													
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}
x_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_2	a_2
x_2	a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_3	a_3	a_3	a_1	a_1	a_1	a_2	a_2
x_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2
	s_{15}	s_{16}	s_{17}	s_{18}	s_{19}	s_{20}	s_{21}	s_{22}	s_{23}	s_{24}	s_{25}	s_{26}	s_{27}	
x_1	a_2	a_2	a_2	a_2	a_3									
x_2	a_2	a_3	a_3	a_3	a_1	a_1	a_1	a_2	a_2	a_2	a_3	a_3	a_3	
x_3	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	

Например, стратегия s_2 – это стратегия упрямой жены, принимающей решение, противоположное разумному. Стратегии s_1 , s_{14} , s_{27} – пренебрежение всеми данными. Это стратегии рассеянного человека. С другой стороны, стратегии s_6 , s_9 , s_{15} , s_{18} – это разумные стратегии, характеризующиеся долей консерватизма.

Чтобы оценить все эти стратегии, надо вычислить ожидаемые потери полезности $L(\theta, s)$, соответствующие каждому состоянию природы θ и каждой стратегии s . Величины ожидаемых потерь для некоторых стратегий представлены в табл. 3.6. Расчет производится следующим образом. Стратегия s_5 , состояние природы θ_1 . Действие a_1 будет предпринято, если $X = x_1$, вероятность чего равна 0,6. Действие x_2 будет предпринято, если $X = x_2$ или x_3 , вероятность чего равна $0,25+0,15=0,40$. Действие a_3 не предпринимается никогда. Таким образом, действия a_1 , a_2 и a_3 , которым соответствуют потери 0,1 и 3, предпринимаются с вероятностями 0,60, 0,40 и 0, поэтому средние потери равны $0,60*0+0,40*1+0*3 = 0,40$.

Таблица 3.6

Потери, вероятности действий и ожидаемые потери для стратегий s_5 и s_{22}

Состояние природы	Потери			Вероятность действий			Ожидаемые потери
	Для $s_5=(a_1, a_2, a_2)$						
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	
θ_1	0	1	3	0,60	0,40	0	0,40
θ_2	5	3	2	0,20	0,80	0	3,40
Для $s_{22}=(a_3, a_2, a_1)$							
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	
θ_1	0	1	3	0,15	0,25	0,60	2,05
θ_2	5	3	2	0,50	0,30	0,20	3,80



Что такое полезность, потеря полезности, стратегия? Как рассчитать возможные стратегии и потери полезности для различных стратегий?

Аналогичный математический аппарат может быть применен для решения реальных задач, встающих перед фермером, работающим в сельском хозяйстве и имеющим непосредственное отношение к природной окружающей среде. Цель любого ведения хозяйства – получение устойчивого количества продукции, прибыли и планомерного ведения хозяйства.

Функции принятия решений фермером весьма просты в ситуациях, когда нет риска и неопределенности. Статистическая и экономическая теории обеспечивают принятие решений, когда знания об объекте (цена, технические и социальные качества) полные. Однако принятие решений с учетом условий окружающей среды является более комплексным, чем описывается обычно. Незнестность состоит в проводимых технических и технологических изменениях, вариациях цен и непредсказуемой человеческой деятельности. Для сельскохозяйственного производства неизвестными являются погода и другие природные явления, трудно учесть и многие качественные стороны объекта.

Фермерские задачи могут быть сведены к игре с природой (специальная формулировка теории игр), если существуют альтернативы деятельности фермера – стратегии фермера – и если неконтролируемые и непредсказуемые события рассматривать как стратегии природы. Теория игр является техникой для получения решений модели игры с природой.

Используемые критерии:

- **Критерий Вальда** используется для выбора плана, который позволяет минимизировать доход независимо от состояния природы. Ориентирован на худшие условия – консервативен. Обеспечивает максимальный уровень надежности. Выбранная стратегия гарантирует при любых условиях выигрыш не меньший, чем максимин: $W = \max_i \min_j a_{ij}$.

- **Критерий Сэвиджа** позволяет выбрать план, который минимизирует вероятностную стоимость менее выгодного плана. Используется в условиях максимального риска. В условиях неопределенности выбирается стратегия, при которой величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации (т.е. когда риск максимален):

$$S = \max_i \min_j R_{ij},$$

где $R_{ij} = \max_k (A_{kj}) - A_{ij}$.

- **Критерий Гурвица** выбирает план, который имеет наивысший пессимистический–оптимистический индекс:

$$H = \max_i (\alpha \min_j A_{ij} + (1 - \alpha) \max_j A_{ij}),$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$, $\alpha = 0$ – критерий "крайнего оптимизма", $\alpha = 1$ – критерий "крайнего пессимизма" соответствует (=) критерию Вальда. Выбор значения α – субъективен.

- **Критерий известных вероятностей.** Каждое из состояний природы может появляться с известной вероятностью. $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ – состояния природы $Q_1 = P(\Pi_1), Q_2 = P(\Pi_2), \dots, Q_n = P(\Pi_n)$ – вероятность появления соответствующего состояния природы. Показатель эффективности – \bar{a}_i , среднее взвешенное значение выигрыша. Критерий – $\max_i \bar{a}_i$,

$$\bar{a}_i = \sum_{j=1}^n Q_j a_{ij}, \quad \sum_{j=1}^n Q_j = 1, \quad \text{т.е. } V = \max_i \sum_{j=1}^n Q_j a_{ij}.$$

- **Критерий Лапласа** является частным случаем критерия известных вероятностей. Он используется, когда мы считаем, что появление состояний природы равновероятно. Выбирается план с наивысшей средней:

$$L = \max(\bar{a}_i), \quad \bar{a}_i = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{m}.$$

Каждая альтернативная модель представляет определенную цель для лица, принимающего решение.



Какие критерии используют при принятии решений на основе теории игр? Чем они характеризуются?

Игры фермера с природой можно описать так. Фермер может сделать действия a_1, a_2, \dots, a_m , и это действие зависит от состояния природы S_1, S_2, \dots, S_n . Состояниями природы могут быть болезни, вредители и другие неопределенности. Игры против природы отличаются от настоящих игр тем, что природные явления не являются противниками. Нельзя сказать, что природа имеет специфические требования или цели, которые влияют на течение игры. В соответствии с действием фермера и состоянием природы имеется исход O_{ij} . Все возможные исходы формируют матрицу убытков (для природы или прибыли для фермера). Задача состоит в выборе фермером стратегии, которая наиболее полным образом будет способствовать достижению цели при определенных имеющихся ресурсах.



Задание 3.8.2. Познакомьтесь с возможностями применения теории игр при принятии решений фермером. Приведите свои примеры возможностей использования теории игр при принятии решений.

Критерий максимума Вальда

При использовании критерия Вальда, каждое действие a_1, a_2, \dots, a_m определено индексом, являющимся его уровнем надежности (уровень надежности – выбор стратегии для достижения наибольших результатов с минимальными потерями).

Например,

$$\begin{array}{cc} & S_1 \ S_2 \\ A_1 & \begin{bmatrix} 2 & 3 \end{bmatrix} \\ A_2 & \begin{bmatrix} 4 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Уровень надежности для A_1 – 2 и 1 – для A_2 . Критерий Вальда выбирает действие с наибольшим уровнем надежности, т.е. A_1 . Такому плану будут следовать фермеры, которые имеют обязательства перед семьей и не хотят рисковать.

Для повышения уровня надежности можно использовать смешанную стратегию. Пусть вероятность выбора фермером стратегии $A_1 = p$. Тогда A_2 будет выбрана с вероятностью $(1-p)$. Если природа играет только S_1 , прибыль фермера составит $2p + 4(1-p)$ (а). Если природа играет только S_2 , прибыль фермера составит $3p + 1(1-p)$ (б). Так как фермер хочет получить минимальную прибыль L независимо от стратегии природы, приравняем (а) и (б). Решим уравнение относительно p : $p = 3/4$, т.е. $(1-p) = 1/4$. Стратегия фермера будет $3/4A_1$ и $1/4A_2$ при уровне надежности $2(3/4) + 4(1/4) = 10/4$. (Например, при выборе из двух культур. Если природа играет нехудшим образом, прибыль фермера может быть выше уровня надежности, но не ниже его).

Этот критерий используется при распределении видов деятельности (сортов культур, удобрений), которые обеспечивают наивысшую среднюю по прибыли за ряд лет.

Критерий Сэвиджа

Критерий используется как метод анализа в условиях неопределенности

$$\begin{array}{cc} & S1 & S2 \\ A1 & [18 & 21] \\ A2 & [17 & 26] \end{array}$$

Если S1 является настоящим состоянием природы, то принимающий решение не будет иметь ухудшения, если выберет стратегию A1, и, наоборот, если природа играет S2, то нужно выбирать A2, чтобы не ухудшить своего положения. Для этого типа задач можно составить отрицательную матрицу убытков (V_{ij}), сформированную элементами

$$V_{ij} = O_{ij} - \max_k O_{kj}$$

Она представляет собой матрицу, полученную вычитанием максимального исхода в каждом столбце из каждого исхода в той же строке:

$$\begin{array}{cc} & S1 & S2 \\ A1 & [0 & -5] \\ A2 & [-1 & 0] \end{array}$$

Применяем критерий Вальда к этой матрице и получаем, что надо применить стратегию A2 с уровнем надежности 1. Если использовать смешанную стратегию, то максимальный убыток можно снизить до 5/6.

Критерий Гурвица

Этот критерий может быть использован для проверки состояний природы, имеющих наихудшие и наилучшие последствия в каждой строке. Для действий A_i m_i – будет минимумом и M_i – максимумом исходов в каждой строке. Пусть фиксированное число α , ($0 \leq \alpha \leq 1$) представляет пессимистический индекс, при котором достигается состояние m_i . Пусть $(1 - \alpha)$ будет вероятностью того, что появится состояние M_i . Индекс для каждого A_i тогда можно вычислить как

$$\alpha m_i + (1 - \alpha) M_i = \alpha - \text{индекс для } A_i.$$

Действие с наивысшим α является предпочтительным. Это и есть критерий Гурвица. Он является альтернативным критерию Вальда. При $\alpha = 1$ критерий Гурвица дает такой же результат, что и критерий Вальда. Индекс α выбирается самим лицом, принимающим решение, поэтому этот критерий еще более субъективен, чем другие. Индекс α не может быть интерпретирован как вероятность того или иного состояния природы, более того, он должен быть независим от состояния природы.

Критерий Лапласа

Критерий основан на принципе "недостаточного основания". Он устанавливает, что если некоторое действие полностью игнорируется в зависимости от состояния природы, тогда поведение "противника природы" будет равновероятным по всем состояниям. Ожидаемый исход вычисляется для каждого A_i для равных вероятностей. Процесс эквивалентен осреднению каждого действия через состояние природы. Действие с наивысшей средней является стратегией, выбранной по критерию Лапласа. Эта модель используется фермером, который может вести хозяйство длительное время для реализации ожидаемых средних.



Какие критерии могут быть использованы при принятии решений на основе теории игр? Чем они отличаются?

Характеристики фермеров

Фермеры различаются между собой наличием различных почвенных и других физических ресурсов, различными возможностями капиталовложений, управленческих возможностей. Даже для фермеров, ведущих хозяйство в одинаковых почвенно-климатических условиях, предлагаемые планы могут различаться в зависимости от наличия капитала и управленческих способностей.

Целью ведения фермерского хозяйства обычно считают максимизацию доходов. Однако некоторые фермеры предпочитают использовать часть своих ресурсов непосредственно, а не максимизировать прибыль. Например, устроить семейный отдых и использовать свой труд для этих, а не производственных целей. Фермер может предпочесть более интересную или напряженную работу и выбрать молочное скотоводство, а не более выгодный для его условий откорм свиней. На выбор решения может оказать влияние и психология фермера. Например, молодой фермер, не обремененный семьей, может играть более рискованно. Даже при неблагоприятном исходе у него есть время начать все сначала. Фермер с большой семьей должен обеспечивать потребности семьи. Арендатор фермы с коротким сроком аренды не будет пользоваться долгосрочными прогнозами, а предпочтет план с наилучшим исходом в текущем году.

Фермеры могут основываться на опыте своих предков или проконсультироваться на специальной научной станции. Научный персонал обычно оценивает сорта по устойчивости к болезням, срокам вызревания, качеству продукции и другим характеристикам стандартов. При равных характеристиках обычно рекомендуют к использованию сорта с наивысшей средней за ряд лет. Это критерий Лапласа. Фермеры могут не следовать полученным рекомендациям. Получение решений по выбору стратегий фермера в условиях неопределенности в играх с природой можно сделать с использованием симплекс-метода. При построении модели считают, что природа никогда не выбирает стратегии наилучшей для фермера, а фермер противостоит природе таким образом, чтобы получить минимальный убыток.



Какие характеристики фермера необходимо учитывать при принятии решений?

3.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АГРОЭКОСИСТЕМ

Экспертные системы предназначены для представления в концентрированном виде знаний о некоторой предметной области, которые включают соответствующий опыт эксперта и информацию, содержащуюся в словарях, справочниках и научных трудах.

Экспертная система представляет собой совокупность машинных программ, использующих правила логического (качественного) вывода на основе знаний о конкретной предметной области для получения неопытным пользователем решения неструктурированных проблем. Таким образом, экспертные системы помогают работникам со средней квалификацией действовать как опытным специалистам.

Экспертные системы дают быструю отдачу в целом ряде проблемных областей, требующих от человека углубленных знаний и высокой квалификации.

Экспертная система включает две основные компоненты. Одна из них – **база знаний** – содержит научную информацию и практические сведения о предметной области в символическом виде. База знаний – это факты, оценки, правила, интуитивные высказывания и опытные данные о рассматриваемой предметной области. Представление знаний оказывает непосредственное воздействие на эффективность функционирования экспертной системы.

Другая компонента – **механизм логического вывода**. Он может интерпретировать данные, хранящиеся в базе знаний, делать логические выводы и манипулировать базой знаний. Механизм логического вывода не зависит от специфики предметной области.

Основное отличие базы знаний от базы данных заключается в том, что база знаний, как и база данных, хранит в себе факты, цифровые величины и другие параметры, касающиеся конкретной предметной области. Но, кроме этого, в базе знаний находится неструктурированная информация, информация, находящаяся на уровне здравого смысла, что совершенно не характерно для базы данных.



|| *Что такое экспертная система? Какие компоненты она включает? Чем отличается от базы данных?*

Обычно к экспертной системе предъявляют ряд общих и частных требований. Общие требования включают:

- выбор эффективного метода представления знаний;
- структуризацию и реструктуризацию исходной информации;
- организацию выбора стратегии поиска решения;
- пригодность системы для практического использования в задачах реальной степени сложности;
- использование метазнаний (промежуточных знаний) с целью полного логического обоснования решения;
- возможность пополнения данных;
- объяснение неподготовленному пользователю хода рассуждений системы.

Частные требования определяются в основном спецификой задач предметной области (т.е. конкретной структурой знаний и составом операций по манипулированию ими).

Наиболее распространенная форма представления знаний основывается на **правилах продукции** (обычно называемых **правилами**). Правила представляют собой условное утверждение, которое задает действия, отклики или следствия, возможные при выполнении определенного набора условий. В этой форме знания кодируются как набор условий и следствий:

ЕСЛИ (УСЛОВИЕ), ТО (СЛЕДСТВИЕ)

В системах, основанных на правилах, знаниями считается та информация, которая позволяет выполнять цепь логических действий на сети правил. Информация, непосредственно не определяющая логику выполняемых действий, но используемая в процессе логического вывода, считается данными (например, таблицы, константы, поясняющие тексты и т.д.).

Приведем пример правила, используемого при диагностике болезней пшеницы:

ЕСЛИ:

- пятна на стебле пшеницы имеют резкие границы;
 - поражены стебель, влагалища листьев всех ярусов и часть стебля под колосом,
- ТО
- ➔ болезнь – стеблевая ржавчина.

Использование правил (или фреймов) для выражения знаний обеспечивает экспертной системе свойство модульности: каждое правило (фрейм) представляет собой модуль знаний. Модульность дает возможность постепенно наращивать систему и легко ее изменять. Без пополнения и корректировки баз знаний, осуществляемых на основе их структуризации, невозможно их эффективное практическое использование.

Механизм логического вывода осуществляет интерпретацию знаний, имеющихся в базе знаний, по определенной проблемной области и получение на их основе заключений. В современных экспертных системах применяют три **управляющих стратегии**: прямую (направляемую данными), обратную (направляемую целью) и смешанную.

В **прямой стратегии** система пытается рассуждать в прямом направлении от исходных данных к решению (цели). Она ищет в базе знаний правила, левые части которых удовлетворяют фактам, сообщаемым пользователем. Затем применяет правила так, как это указано в управляющей стратегии. При этом система может запросить у пользователя дополнительную информацию.

В **обратной стратегии** система работает в обратном направлении от гипотетического решения (цели) к нахождению данных, обосновывающих решение. Этот процесс требует формулировки и проверки промежуточных гипотез (подцелей) до тех пор, пока не будет найдено решение.

Существуют различные методы **смещения прямых и обратных стратегий**. Например, промежуточные заключения, полученные с использованием прямой стратегии, используют для отбора цели на исследование с помощью обратной стратегии.



|| Что такое правило? Что такое стратегия? Какие стратегии используют при разработке экспертных систем?

Экспертные системы почти всегда работают с данными, содержащими неопределенную информацию. По этим причинам экспертные системы включают механизмы, позволяющие учитывать неопределенность. Например, с помощью коэффициентов, показывающих уровень уверенности во вводимых данных.

Наполнение базы знаниями обычно обеспечивается специальной подсистемой приобретения знаний на основе просмотра инженером знаний литературы по предметной области и бесед с экспертами. Для ввода правил в базу знаний используют специальную программу извлечения знаний. Это может быть и простой текстовый редактор, а может быть сложная программа, позволяющая получать структурированные знания.

Для удобства работы пользователя используют подсистему объяснений хода рассуждений экспертной системы.

Практическое взаимодействие пользователя с экспертной системой осуществляется через естественно-языковой интерфейс. Для его организации важную роль играют метазнания, позволяющие пользователю получать ответы на вопросы о знаниях системы. В состав метазнаний входит информация о структуре предметной области и самих знаниях, о пользователях, о технологии обработки знаний, об организации вычислительных процессов. Структура экспертной системы показана на рис. 3.13.

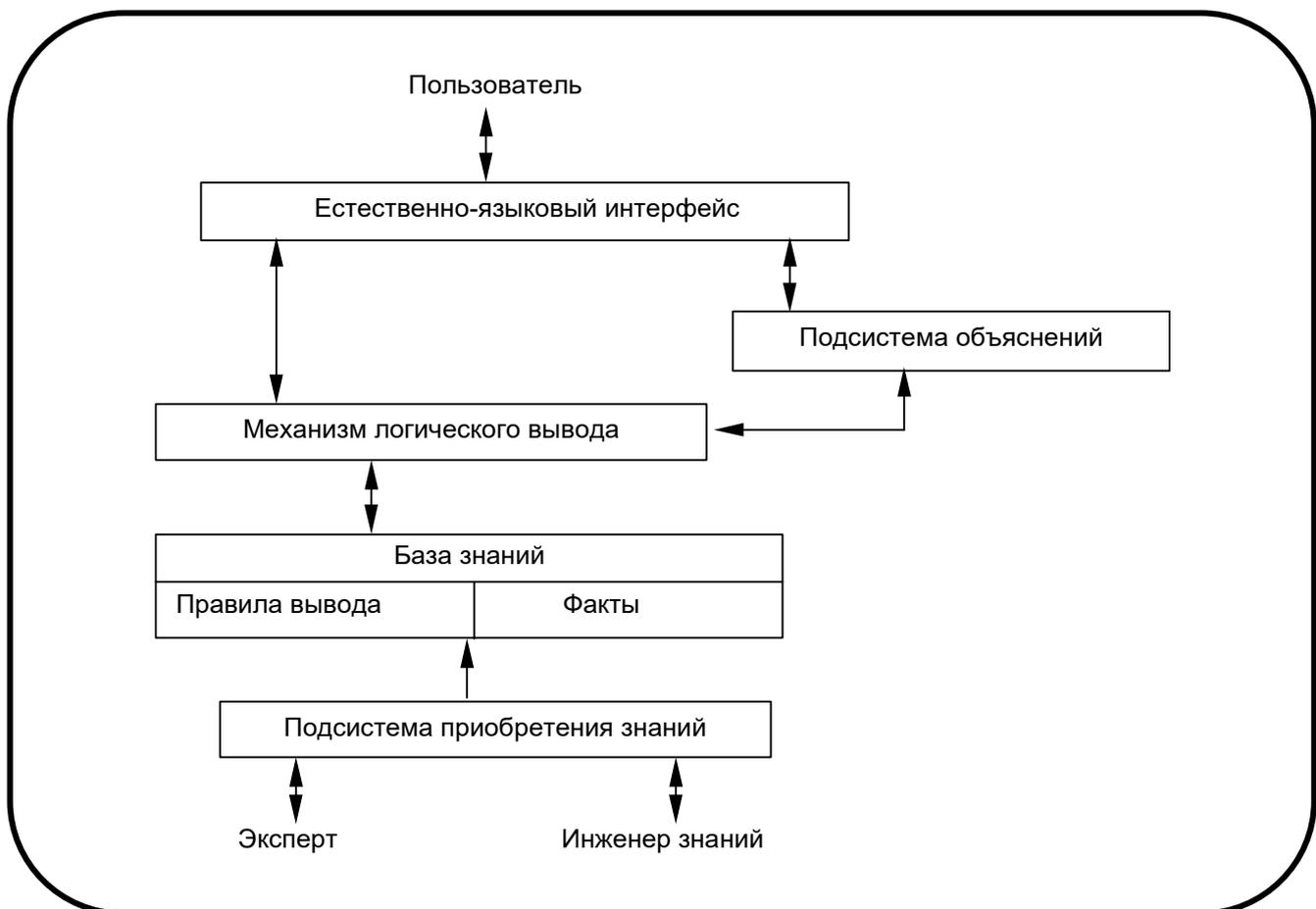


Рис. 3.13. Структура экспертной системы

Анализ задач, которые могут быть решены с помощью экспертных систем, показывает, что их можно свести к нескольким типам: консультации, диагностике, контролю, проектированию деятельности, обучению.

Консультация представляет собой процесс, с помощью которого экспертная система разъясняет пользователю смысл явлений, понятий, положений, требований.

Диагностикой называется процесс обнаружения и объяснения пользователю нарушений функционирования каких-либо объектов или систем по их симптомам, прогнозирование будущих состояний и выявление путей их устранения.

Контроль предусматривает непрерывное (в отличие от диагностики) наблюдение за объектом или системой, выявление отклонений в их функционировании, анализ и выдачу сообщений пользователю в случае необходимости воздействия на контролируемый объект или систему.

Проектирование деятельности связано с разработкой комплексов мероприятий, удовлетворяющих заданным требованиям.

Обучение – это процесс целенаправленного воздействия на пользователя экспертной системой с целью повышения уровня его знаний в предметной области.

На практике все виды задач часто сочетаются друг с другом.



Какие задачи можно решать на основе экспертных систем?

3.9.1. Особенности разработки экспертных систем в сельском хозяйстве

Особенности разработки экспертных систем в сельском хозяйстве связаны, прежде всего, с особенностями самой области.



Задание 3.9.1. Разработайте проект создания экспертной системы. Какие элементы, правила, стратегии необходимо использовать в этой системе?

Главной особенностью является наличие гораздо большего, чем в других областях знаний, количества факторов, в зависимости от которых находятся показатели количества и качества получаемой продукции.

Вторая особенность – многообразие факторов самой различной природы. Это влияет как на объем базы знаний, так и на ее структуру.

Третья особенность – достаточно узкие рамки предметной области. Необходимость минимизировать время на решение задачи для конкретного пользователя, в то же время система должна иметь большую универсальность и совместимость с другими программными комплексами и экспертными системами.

3.10. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Построение модели процесса, интересующего исследователя, не всегда возможно. Законотворческая деятельность и управленческие (административные) решения осуществлялись задолго до появления моделирования. При отсутствии моделей стремление к рационализации и оптимизации управления привело к появлению в рамках системного анализа раздела, касающегося принятия решений в условиях так называемого **уникального выбора**.

Ситуация уникального выбора характеризуется тремя необходимыми элементами:

- ▶ существованием проблемы, требующей разрешения;
- ▶ наличием человека или коллективного органа, принимающего решение;
- ▶ наличием альтернатив, из которых осуществляется выбор.

При отсутствии хотя бы одного элемента процесса выбора нет.

Как правило, в часто повторяющихся ситуациях решения повторяются. С течением времени происходит закрепление стереотипа, выбор перестает существовать.

Очевидно, что внимания исследователей заслуживают трудные, нестандартные, уникальные ситуации. Отметим ряд моментов.

■ **Многокритериальный характер наиболее актуальных проблем.** Обычно не удается свести оценку каждой из предложенных альтернатив к какому-либо численному показателю (например, стоимости проекта). Необходимо оценивать каждую альтернативу по многим показателям. Это, в свою очередь, порождает два следствия:

- ➔ нерешенность вопроса о том, все ли существенные показатели учтены (**вопрос о полноте списка показателей**);
- ➔ методологические трудности одновременного сравнения различных по своей природе показателей (например, экономических и экологических – **правило размерности**).

■ **Субъективизм оценок качества альтернатив** (даже в случае возможности оценить последние с помощью одного критерия).

- **Сомнения в полноте списка альтернатив.**

Подобные трудности делают процесс решения проблем уникального выбора весьма непростым. Но в современном мире постоянно повышается "цена ошибки". Выходом из создавшейся ситуации стало введение института консультантов и экспертов.

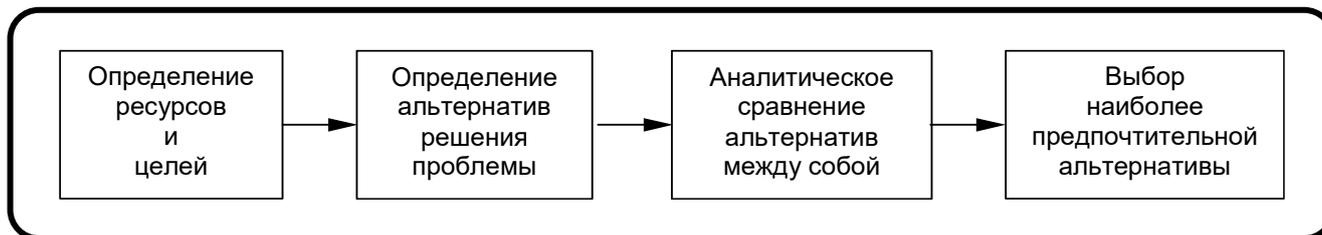
Специализация консультанта состоит не в том, что он лучше знает предметную область, в которой принимается данное решение, а в том, что он лучше владеет специфическими приемами структуризации проблем, применимыми к любой предметной области. Консультант не подменяет лицо, принимающее решение (ЛПР), а помогает ему.

Не беря на себя ответственность за принятие решений, эксперт помогает компетентному руководителю в максимально возможной степени повысить уровень структуризации проблемы, сделать ее "более прозрачной", а также оказывает содействие ЛПР (коллективному органу) в структуризации его собственного процесса принятия решения. Повышение степени структуризации проблемы – одна из основных задач системного анализа.



Задание 3.10.1. Сформулируйте общий алгоритм действий при решении задач уникального выбора? Почему эти задачи так называются?

Общий алгоритм действий при решении проблем уникального выбора представляет собой следующий процесс:



Первые два этапа в значительной степени зависят от специфики проблемы. Вторые два имеют собственные методы решения. Выделяется пять групп этих методов.

- **Аксиоматические методы**, когда определяются некие правила количественной оценки полезности при наличии ряда требований к этим правилам. Эти требования называются аксиомами. Соответствие правил названным аксиомам позволяет математически корректно обосновать существование функции полезности, а также некоторые ее важные свойства, например, непрерывность.

- **Прямые методы**. Зависимость общей полезности прямо задается как функция оценок по отдельным видам критериев. Например, задается численная оценка веса каждого критерия, после чего определяется сумма взвешенных оценок, являющаяся показателем полезности.

- **Методы компенсации**. Оценки достоинств одной альтернативы пытаются компенсировать оценками достоинств другой. В итоге эквивалентно оцененные достоинства исключают из рассмотрения. В ряде случаев этот метод позволяет определить функцию полезности альтернатив. В общем случае метод компенсации можно рассматривать как вспомогательный, позволяющий снизить размерность соответствующей задачи.

- **Методы порогов несравнимости**, когда задаются некие правила сравнения двух альтернатив. По этому методу возможности попарно делятся на сравнимые (о которых можно сказать, что одна лучше другой, либо они эквивалентны) и несравнимые. Выбор наилучших среди сравнимых альтернатив сужает круг рассматриваемых вариантов решения.

- **Человеко-машинные методы** применяются при принятии решений при наличии соответствующей количественной модели поведения управляемого объекта или процесса.



Какие элементы характеризуют ситуацию уникального выбора? В чем состоит задача консультанта?

Рассмотрим использование этих методов на примерах. Аксиоматические методы можно использовать как в условиях определенности, так и в условиях неопределенности (принятие решений в условиях риска). Аксиомы в условиях определенности можно условно разделить на три группы. В первую группу входят аксиомы, определяющие отношения превосходства или предпочтительности альтернатив. Вторая группа аксиом касается исключения так называемых ненормальностей в предпочтениях. Третья группа – независимость оценок функций полезности альтернатив.

Рассмотрим пример определенности предпочтений. В качестве него может выступить так называемый "парадокс с несладким кофе". Суть его состоит в следующем. Пусть для ЛПР предпочтительнее является несладкий кофе. Тогда альтернатива с одной крупинкой сахара в чашке, очевидно, не отличается от альтернативы отсутствия сахара (если, конечно, ЛПР не англичанин). В свою очередь, наличие одной крупинки сахара эквивалентно наличию двух и т.д. Таким образом, можно выстроить цепочку эквивалентных отношений, в итоге соединяющих две заведомо разные альтернативы.

Для преодоления таких нежелательных эффектов вводится целый ряд вспомогательных построений, целью которых является преодоление неопределенности в оценке двух альтернатив.

Аксиоматические методы в условиях неопределенности в целом весьма похожи. Существует методика оценки концепции состояний. В рамках этой методики определяются:

- ▶ пространство состояний;
- ▶ пространство действий (множество альтернатив);
- ▶ пространство результатов.

В общем случае неизвестно, в каком исходном состоянии находится ЛПР. Известно только соответствующее распределение вероятностей. Для каждого состояния известна вероятность того, что ситуация ему соответствует. На пространстве результатов задана функция полезности.

Примером подобной задачи выбора решений может быть следующий:

Пространство состояний:

- ▶ ➔ грибы съедобные;
- ▶ ➔ грибы ядовитые.

Пространство действий:

- ▶ ➔ грибы приготовить;
- ▶ ➔ грибы выбросить.

Пространство результатов:

- ▶ ➔ получить гастрономическое удовольствие;
- ▶ ➔ получить гастрономическое удовольствие и отравиться;
- ▶ ➔ не получить гастрономического удовольствия и не отравиться.

Подобный класс задач решается с помощью экспертных систем и теоретико-игровых моделей. Они достаточно разработаны и популярны среди исследователей.

В результате корректной проверки на соответствие аксиомам любой системы правил оценки полезности можно совершенствовать саму систему, устранив внутренние противоречия и упорядочив представление о проблеме.

Практическая реализация осложняется следующим.

■ Трудность проверки выполнимости соответствующих аксиом. В задаче о несладком кофе показано, что даже в простом случае могут быть построены цепочки, приводящие к заведомо неверным результатам. В практических задачах оценки по одному критерию оказываются в непосредственной зависимости от другого критерия,

что противоречит аксиоме независимости. Например, дом в Подмоскowie может быть предпочтительнее квартиры в Москве (оценка по одной группе критериев) лишь в случае наличия транспортных средств (оценка по другому критерию).

■ На второй план отодвигается сам процесс сравнения и выбора альтернатив перед чисто теоретическими исследованиями доказательства существования функции полезности, выраженной в определенной форме.



|| *Какие задачи можно решать аксиоматическими методами? Чем осложняется их практическая реализация?*

Прямые методы многокритериальной оценки альтернатив по своей сути являются некой противоположностью аксиоматическим. В рамках прямых методов директивно задается вид функции полезности по многим критериям в зависимости от величины оценок по каждому из критериев. Это делается без каких-либо теоретических обоснований ЛПР или экспертом.

Можно сконструировать много вариантов прямых методов. Однако в рамках любого из них придется однозначно определять:

- вид функции полезности;
- параметры функции полезности;
- вероятностные оценки ее составляющих, в случае принятия решений в условиях неопределенности.



|| *Чем характеризуются прямые методы?*

В отличие от рассмотренных выше подходов идея метода компенсации достаточно проста и обоснована. Очень часто на практике люди соглашаются на некоторые неудобства, чтобы получить некоторые преимущества. Таким образом, допуская ухудшение ситуации по одному из критериев, добиваемся улучшения по другому. Данное противоречие типа "ухудшение–улучшение" всегда носит количественный характер. Например, человек готов перейти со свободного режима работы на строгий, если его зарплата увеличится на конкретную сумму.

Следует отметить, что в большинстве сложных задач выбора компенсация невозможна в принципе. Так, практически нельзя компенсировать увеличением экономического эффекта экологическое неблагополучие или увеличение риска потери здоровья населением. Подобного рода последствия, кардинально меняющие саму систему оценок по тем или иным критериям, имеют практически все крупномасштабные мероприятия, правильное планирование которых и является наиболее актуальной задачей уникального выбора. Особое значение имеет такая постановка вопроса в законотворческой деятельности, когда любой проект затрагивает в той или иной мере практически все аспекты функционирования социально-экономических систем.



|| *Сформулируйте принципы применения метода компенсации.*

Методы порогов несравнимости базируются на применении трех отношений:

- ▶ предпочтения,
- ▶ эквивалентности,
- ▶ несравнимости.

Последнее отношение является центральным в рамках данного метода. Отбор альтернатив идет путем последовательного сужения круга рассматриваемых альтернатив. Альтернативы рассматриваются попарно. В случае, если альтернатива А имеет хотя бы по одной группе критериев лучшие оценки и одновременно по каждой из других групп имеет оценки не худшие, чем альтернатива В, то говорят, что альтернатива А доминирует над В. Если по всем группам критериев обе альтернативы имеют одинаковые оценки, они признаются эквивалентными. Если А превосходит В по одним группам критериев и уступает по другим, то такие альтернативы несравнимы.

Из эквивалентных и несравнимых альтернатив выделяют некоторое подмножество, которое называется **ядром** множества альтернатив. Смысл выделения ядра – предварительный отбор вариантов. При этом отсеивают заведомо худшие. На последних этапах могут быть существенно скорректированы функции полезности и перегруппированы критерии, т.к. оставшиеся альтернативы уже удовлетворяют определенным качественным методам.

Заметим, что обилие возможностей быстрого сужения круга альтернатив таит опасность некритического увеличения количества критериев и самих альтернатив. С другой стороны, вполне возможно очень детально провести разбиение по несравнимым группам выбранных критериев. Такие тенденции опасны для любого количественного метода. При излишне детальных формализациях идет процесс, приводящий к суммированию и нарастанию ошибок. Кроме того, не исключается возможность отбрасывания перспективного варианта на начальных этапах исследования.

Метод порогов несравнимости можно считать некоторой попыткой синтеза различных приемов уникального выбора, позволяющего использовать возможности различных методов, избегая при этом тупиковых ситуаций.



Какие отношения лежат в основе методов порогов несравнимости?

Человеко-машинные методы можно разделить на две различные группы.

Первая группа основана на использовании моделей для построения системы оценки полезности альтернатив с использованием многокритериального математического программирования и по своему формальному аппарату близки к методам исследования операций. Обычно решается некая оптимизационная задача с ограничениями. Максимизируется значение функции полезности. Ограничения касаются критериев. Особенность данных методов касается возможного введения в модель связей между критериями, не позволяющими произвольно изменять взаимозависимые критерии.

Вторая группа основана на использовании моделей поведения управляемых объектов для получения результата принимаемого решения. Процесс использования динамических моделей при законотворческой деятельности и выработке управленческих решений не столь тривиален, как может показаться на первый взгляд.

Первая группа задач, которые надо выполнить, касается интерпретации работы модели в виде, необходимом для принятия решений. Проиллюстрируем это на примере.

Допустим, необходимо проведение оценки воздействия на окружающую среду объектов промышленности, энергетики, сельского хозяйства и транспорта; оптимизации стратегии использования возобновимых природных ресурсов; обеспечение информационной поддержки принятия решений в области природопользования, экологической безопасности и выделения зон экологического действия. Для этого можно использовать модель автоматизированной системы регионального экологического прогноза (АСРЭП). В ней прослеживается динамика более трехсот параметров, характеризующих природную среду. Среди них заболоченность, залесенность, расчлененность рельефа, сток, интегральная оценка плодородия почв и др. В большинстве своем эти

данные трудно использовать непосредственно для подготовки законопроектов или осуществления хозяйственной деятельности. Интерес вызывают или обобщенные результаты прогнозов изменений в функционировании экосистем, или конкретные экономические оценки возобновимых ресурсов – деловой древесины, урожаев сельскохозяйственных культур, запасов и качества природных вод и др.

Эти проблемы хотя и являются достаточно сложными, имеют в основном технический характер и принципиально решаемы, в том числе с помощью модели.

Вторая особенность применения человеко-машинных методов касается организации машинных экспериментов. Имея модель поведения системы, можно формировать сотни возможных сценариев управления и выбирать наиболее подходящие. Однако простой перебор решений не страшает от совершения ошибки, поскольку сложные системы часто ведут себя контринтуитивно.

Например, в связи с Аральским кризисом были проведены большие научно-практические работы по совершенствованию структуры водопотребления в регионе. Для решения проблемы предлагалось в 80-х годах перебросить часть стока сибирских рек, в начале 90-х – запрещали сброс любых загрязненных коллекторно-дренажных вод по всему стволу р. Амударьи и ее притоков, а также строительство магистральных коллекторов по обеим сторонам реки. Однако, по оценкам специалистов, необходимо сократить объемы поливов, это улучшит общую экологическую ситуацию в регионе, простое увеличение орошения не только не решит проблемы, но и приведет к прогрессирующей деградации земель и геосистем.

Работающий с моделью ЛПР, не обладая достаточными знаниями в конкретной предметной области, не сможет сформулировать сценарий, опирающийся на контринтуитивное поведение системы. Таким образом, наличие модели не снижает требований к эвристическому поиску сценариев управления. Именно это сочетание становится основой в процессе принятия решений. А использование таких моделей предъявляет повышенные требования к культуре и компетентности самого ЛПР.

Целесообразно оценить эффективность и надежность применяемых методик с точки зрения обоснованности используемой информации. Люди, ее предоставляющие, как правило, допускают искажения. Это связано с рядом психологических причин, опытом экспертов, субъективностью выбора вида функции полезности и оценки альтернатив и др. Однако, при всей критической оценке методов уникального выбора, необходимо отметить, что их использование позволяет увеличить структурированность проблемы, расширяет список возможных альтернатив, сокращает степень произвольности и эмоциональности, что особенно важно при принятии крупных стратегических решений.



Какие особенности имеет применение человеко-машинных методов?

3.11. СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

(Системный подход к составлению крупных проектов)

До середины XX в., на ранних этапах проектирования объектов, решались в основном чисто технические проблемы, а цели создания того или иного производства и условия его функционирования были однозначно заданы. Сегодня существует большое число проектов, которые надо разрабатывать с помощью методов системной инженерии. Это проекты, реализация которых является так называемым крупномасштабным хозяйственным мероприятием (КХМ).

Под КХМ понимают проекты, обладающие хотя бы одним из следующих признаков:

- наличием нескольких участников, интересами которых нельзя пренебречь при выборе варианта;
- потребностью в объеме инвестиций, сравнимом с возможностями субъекта, вкладывающего ресурсы в осуществление мероприятия;
- наличием неэкономических последствий в масштабах, затрудняющих их прямую стоимостную оценку.



Какими признаками характеризуется крупномасштабное хозяйственное мероприятие?

Отличительной особенностью КХМ следует считать:

- экономическую целостность проекта (невозможность его расчленения на локальные проекты, которые при их независимой реализации дадут в сумме ту же эффективность, что и проект в целом);
- несовпадение в общем случае интересов отдельных участников процесса разработки, реализации и использования его результатов;
- активность экономически независимых участников проекта;
- ограниченность возможностей перераспределения итогового результата КХМ между участниками проекта;
- существенную длительность осуществления КХМ, предполагающую наличие участников проекта "разнесенных во времени";
- существенную неполноту информации об ожидаемых параметрах мероприятия и возможных последствиях его реализации в области экологии, социальной сферы, обороны, безопасности и др.;
- уникальность КХМ.

Помимо принципов наилучшего выбора при рассмотрении КХМ следует руководствоваться еще и специфическими принципами. При наличии нескольких участников – это:

- ▶ адресность затрат и результатов;
- ▶ недопустимость диктата;
- ▶ равноправие участников.

КХМ – класс объектов, проектирование которых не сводится к решению чисто инженерных проблем. Для него была выделена системная инженерия, или наука о планировании и проектировании комплексных производственно-технических систем, создание и использование которых представляют собой крупномасштабные хозяйственные мероприятия. В определение не включено строительство соответствующих объектов и их эксплуатация. На этих этапах задачи, решаемые с помощью методов системной инженерии, отступают на второй план. Однако имеет место авторский надзор.



Почему КХМ нельзя свести к решению чисто инженерных проблем?

В процессе реализации КХМ авторский надзор или аудирование проекта включает в себя, помимо контроля за исполнением технических деталей, также контроль адекватности выполнения наиболее общих черт проекта, определяющих его взаимодействие с макроэкономической, экологической, социальной, политической, информационной сферами при возможности оперативных корректив.

Работа системного инженера над проектом сводится к двум большим этапам – системное рассмотрение проблемы и системное проектирование.

Системное рассмотрение проблемы

- Предварительная формулировка проблемы.
- Организация группы ее изучения.
- Системное исследование проблемы.
- Определение проектируемого объекта.
- Определение способа измерения эффективности работы объекта и ограничений его общих характеристик.

Системное проектирование

- Построение модели проектируемого объекта.
- Нахождение наилучшей структуры и оптимизация внутренних характеристик данного объекта.
- Проверка на управляемость и надежность работы.
- Выработка технических требований к компонентам проектируемого объекта.
- Оформление документации.
- Определение порядка системно-инженерного аудирования на этапах составления детального проекта, строительства и эксплуатации объекта.

Системное рассмотрение начинается с формулирования проблемы. Решение этой задачи не всегда тривиальное. Например, машиностроительная фирма испытывает трудности из-за неритмичности работы поставщиков-металлургов. Решить эту проблему можно, во-первых, с помощью строительства собственного металлургического завода; во-вторых, с помощью разработки и внедрения менее металлоемких технологий; в-третьих, с помощью строительства склада с целью иметь запасы металла, что гасит неритмичность поставки. В этой ситуации проблема должна быть сформулирована следующим образом: "Как обеспечить ритмичность поставки металла?"

Правильная формулировка проблемы – половина успеха.

На втором этапе создается группа изучения проблемы, в которую входят представители заказчика, специалисты по математическому моделированию и программисты, экономисты, системные аналитики. В классических КХМ группа должна включать экологов, социологов, демографов, политологов, специалистов по информационной безопасности.

Затем начинается комплексное исследование, которое включает обзорный анализ системы более высокого уровня, в функционировании которой возникли проблемы, приведшие к рассмотрению возможности реализации предполагаемого проекта.

Только в итоге всех перечисленных исследований можно окончательно уточнить проблему с учетом возможного развития ситуации.

Определение проектируемого объекта происходит на основе выводов предыдущего этапа исследований. Могут быть использованы процедуры уникального выбора.

Определение способа измерения эффективности работы проектируемого объекта и ограничений его общих характеристик. По существу необходимо построить функцию полезности варианта производственного проекта.



В чем состоит системное рассмотрение проблемы? Приведите примеры КХМ и возможных вариантов решения возникающих проблем в процессе его реализации.

Построение модели объекта является первым этапом системного проектирования. Она должна удовлетворять следующим базовым требованиям:

- ▶ предусматривать описание как можно большего числа возможных объектов рассматриваемого типа;
- ▶ быть максимально простым по форме, понятным специалистам всех профилей, участвующим в проекте;
- ▶ предусматривать возможность корректировки параметров модели, и, по возможности, ее структуры в диалоговом режиме;
- ▶ обеспечивать в результате работы количественные оценки критериев качества моделируемого варианта проектируемого объекта.

С помощью построенной модели находят наилучшую структуру и оптимизируют внутренние характеристики проектируемого объекта. На этом этапе формируется функциональная схема проектируемой системы. Параллельно этому процессу идет поиск наилучших характеристик подсистем проектируемого объекта. При этом уделяется особое внимание устойчивости системы в целом при возможных отклонениях параметров составных частей от контрольных значений.

Постоянно проводится работа по проверке на управляемость и надежность работы. На основе выбранного варианта проекта вырабатывают технические требования к компонентам проектируемого объекта.

Итоги работы оформляются в виде соответствующих документов. Определяется порядок системно-инженерного аудирования на этапах составления проекта, строительства и эксплуатации объекта. Все ожидаемые отступления от проекта необходимо согласовывать, исходя из его общих целей.

Таким образом, системная инженерия есть конкретное приложение методов системного анализа к процессу проектирования и реализации крупномасштабных хозяйственных мероприятий и является одной из важнейших его прикладных частей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какие задачи решают с помощью системного анализа?
- 2 Какие этапы можно выделить при проведении системного анализа?
- 3 Что является объектом системного анализа?
- 4 Что является предметом системного анализа?
- 5 Каковы основные закономерности проведения системного анализа?
- 6 В чем сходство и различие системного анализа и системного подхода?
- 7 В чем состоит сходство и единство процессов управления, происходящих в системах различной природы?
- 8 Что такое разнообразие и чем оно определяется?
- 9 Что такое входные и выходные величины и разрешающий уровень системы?
- 10 Какие классификации систем существуют?
- 11 Чем определяется эффективность функционирования иерархической структуры?
- 12 В чем суть движения динамических систем?
- 13 Что такое устойчивость динамической системы и чем она определяется?
- 14 Чем определяется стабильность биологических систем?
- 15 Какими состояниями может характеризоваться система?
- 16 Почему балансовые соотношения глобального масштаба не несут в себе достаточной информации о нарушениях равновесия в биосфере?
- 17 Какие недостатки балансового метода устраняет аппарат дифференциальных уравнений?
- 18 Какими должны быть соотношения между интенсивностью естественного размножения и естественной смерти?
- 19 Какими процессами характеризуется популяция, состоящая из хищников и жертв?
- 20 Какие задачи могут быть решены с помощью методов статического прогнозирования?
- 21 В чем состоит сущность импульсного процесса?
- 22 Какие задачи можно решать с использованием знакового и взвешенного ор-графа?
- 23 Каким образом численность хищника влияет на численность жертвы?
- 24 Какие факторы обеспечивают стабильность системы «хищник–жертва»?
- 25 Что такое полезность потери полезности, стратегия?
- 26 Какие критерии используют при принятии решений на основе теории игр?
- 27 Какие критерии могут быть использованы при принятии решений на основе теории игр?

- 28 Какие характеристики фермера необходимо учитывать при принятии решений?
- 29 Чем экспертная система отличается от базы данных и какие компоненты она включает?
- 30 Какие стратегии используют при разработке экспертных систем?
- 31 Какие элементы характеризуют ситуацию уникального выбора?
- 32 Какие задачи можно решать аксиоматическими методами и чем осложняется их практическая реализация?
- 33 Какие особенности имеет применение человеко-машинных методов?
- 34 Какими признаками характеризуются крупномасштабные хозяйственные мероприятия (КХМ)?
- 35 Почему КХМ нельзя свести к решению чисто инженерных проблем?

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	5
3.1.1. Объект системного анализа	7
3.1.2. Предмет системного анализа	7
3.1.3. Основные закономерности проведения системного анализа	7
3.1.4. Развитие системного анализа в историческом аспекте	8
3.2. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ПОНЯТИЯ	12
3.2.1. Роль эксперимента в изучении поведения системы	12
3.2.2. Определение системы	13
3.2.3. Свойства системы	14
3.2.4. Система и окружающая среда	14
3.2.5. Классификация систем	15
3.2.6. Иерархические структуры систем	16
3.2.7. Динамические системы	16
3.2.8. Устойчивость динамических систем	17
3.2.9. Особенности биологических систем	17
3.3. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	18
3.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ	20
3.5. ПРОСТЕЙШИЕ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ	22
3.5.1. Сложная модель	24
3.5.2. Задачи линейного программирования	26
3.6. МЕТОДЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	27
3.7. МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ	29
3.7.1. Моделирование сетей питания и экосистемы «хищник–жертва»	33
3.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ИГР ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЕДЕНИЮ ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕСУРСОВ	36
3.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АГРОЭКОСИСТЕМ	44
3.9.1. Особенности разработки экспертных систем в сельском хозяйстве	47
3.10. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	47
3.11. СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ (СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОСТАВЛЕНИЮ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ)	53
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	57