

**Министерство образования и науки  
Российской Федерации**

**КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Е. А. Степаненко

**ТЕОРИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА  
И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ:  
МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

Учебное пособие

Краснодар  
2008

УДК 519.8  
ББК 22.18 я 7  
С 794

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук

*В.В. Бужсан*

Кандидат технических наук, профессор

*В.В. Магеровский*

**Степаненко Е.А.**

**С 794** Теория системного анализа и принятия решений: учеб. пособие.  
Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2008. 71с. 100 экз.

Изложены исходные методические положения теории системного анализа и принятия решений. Сформулированы основные принципы системного анализа и концепция выработки решений. Приведена классификация факторов, влияющих на эффективность показателей и критериев выбора решений.

Адресуется студентам специальности 280101 – Безопасность жизнедеятельности в техносфере, а также аспирантам и специалистам, занимающимся построением моделей проблемных ситуаций и выработкой решений в условиях неопределенности.

УДК 519.8  
ББК 22.18 я 7  
©Кубанский государственный  
университет, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Окружающий человека мир можно условно разделить на две группы: естественная среда – природа и искусственная среда – то, что создаётся человеком. Эти две группы находятся в постоянном взаимодействии. Человек, являясь порождением природы, в своем интеллектуальном развитии поднялся на уровень, позволяющий ему изменять природу «под себя» и создавать искусственные системы, повышающие его возможности и приносящие ему различные блага. Естественные возможности планеты Земля по содержанию человека как элемента живой природы исчисляются в 500–600 млн чел. И то население планеты, которое существует сегодня (порядка 6 млрд чел.), обязано целенаправленной творческой деятельности всех предыдущих поколений, обеспечивших эти возможности. Но этот процесс неограничен. До сих пор создаваемые человеком возможности в общем опережали его потребности в продуктах жизнедеятельности. Однако в последнее время все чаще в тех или иных регионах малейшие сбои в функционировании системы «Природа – Человек» начинают существенно сказываться на безопасности жизнедеятельности человека. Эти сбои носят как локальный, так и глобальный характер. Они могут быть обусловлены чисто природными факторами: засухи, землетрясения, наводнения, ураганы и т.п., а также и порождены продуктами деятельности человека: аварии на АЭС, испытания термоядерного оружия, нарушения природного баланса: вода – земля – растительность (это и ирригационные системы, и гидросооружения, и вырубленные (сожжённые) леса, и распаханые земли и т.д.), взаимодействием искусственных систем, созданных человеком, с природой. Создаваемые человеком технические системы принимают всё более масштабный характер, и их влияние на окружающую среду всё увеличивается и становится существенным. В то же время последствия принимаемых сегодня человеком решений по созданию новых технических систем и преобразованию окружающей среды наступят через 5–10, а может и больше лет. Следовательно, сегодня, проводя те или иные мероприятия, необходимо как можно точнее оценивать их по-

следствия и не реализовывать те проекты, которые могут нанести урон окружающей нас природе.

И ещё один очень важный фактор, определяющий взаимодействие человека и природы, состоит в следующем: человек живет на планете Земля сотни тысяч лет и до недавнего времени возможности природы по «утилизации» продуктов его жизнедеятельности и его вторжений в природные процессы опережали эти воздействия. Природа, являясь самоорганизующейся и самовосстанавливающейся системой, обладает способностью сохранять свой гомеостазис в условиях воздействия на неё человека. Это великое свойство природы и обеспечивало возможность человеку жить и развиваться, не заботясь особенно о последствиях своего влияния на природную среду. Однако уже в XX в. численность популяции *homo sapiens* превысила 6 млрд чел., и отрицательное воздействие на природу стало опережать её возможности по компенсации этих воздействий. На планете Земля начался процесс накопления последствий отрицательных воздействий человека на природу. Это привело к переосмыслению понятия гармонии между человеком и природой: ранее, т.е. до начала крупного промышленного производства (начало XX в.), под гармонией между человеком и природой понималось минимальное воздействие на природу, сохранение её в первозданном состоянии, предельная близость человека к окружающей природе.

На современном этапе цель науки и человеческих действий заключается не в том, чтобы сохранить мир в его первозданном состоянии (да это уже и невозможно), а в том, чтобы найти такие формы взаимодействия человека и природы, которые бы обеспечивали совместное развитие биосферы<sup>1</sup> и человеческой популяции как её неотъемлемой части. Это современное понимание гармонии человека и биосферы, когда человек, активно вмешиваясь в природные процессы, сохраняет её состояние пригодным для своего существования и одновременно направляет развитие человечества так, чтобы оно способно было не только адаптиро-

---

<sup>1</sup> Биосфера – это область существования флоры и фауны Земли (биота - флора и фауна Земли).

ваться к изменяющимся условиям жизни, но и идти дальше по пути своего развития и процветания, называют коэволюцией человека и биосферы [2].

Человек в своём развитии достиг такого уровня, когда в любой момент его действия могут привести к переходу за так называемую «роковую черту», за которой в природе начнутся необратимые, губительные для человека, процессы. Поэтому человек должен уметь (научиться) предвидеть результаты своих действий, оценивать состояние биосферы и заранее знать, где находится запретная черта, отделяющая возможность дальнейшего развития цивилизации от её гибели.

На современном этапе развития человеческого общества первоочередной задачей становится исследование процессов воздействия человека на природу и установление тех пределов, за которыми может наступить катастрофа, причём катастрофа может носить как мгновенный, так и растянутый во времени характер. Последний не менее опасен, так как, начавшись однажды, процессы, губительные для жизни, будут иметь необратимый характер (пример: «ядерная зима», или глобальное потепление). Решение этой важнейшей общечеловеческой задачи требует глубоких научных исследований на базе современных методов системного анализа с учётом большого числа факторов технического, экономического, социального и экологического характера.

Наряду с общепланетарными проблемами обеспечения безопасности человечества существуют аналогичные проблемы и на уровне страны и региона. Так, нынешнее время ознаменовалось бурным развитием нашего региона: восстанавливаются предприятия и создаются новые, осуществляется интенсивное строительство, расширяются существующие и создаются новые порты, развивается сеть шоссейных и железных дорог, прокладываются новые нитки трубопроводов, на новой технологической основе восстанавливается сельское производство и соответствующая промышленная база. Все это обеспечивает интенсивный рост налогооблагаемой базы (годовой бюджет поступлений в крае превысил 100 млрд р.), количества рабочих мест, в конечном итоге растёт благосостояние населения края (средняя зарплата в крае превысила 13 тыс. р., что выше среднего по стране). Однако каж-

дая из создаваемых или восстановленных систем объективно является потенциально опасным объектом в той или иной области в зависимости от своего производственного предназначения. Безопасность функционирования отдельной системы и безопасность региона, где находятся эти системы, связаны между собой как территориально, так и функционально. Поскольку эти системы располагаются на общей территории, то процессы, происходящие в них, могут оказывать взаимовлияние, так как у них общая природная среда и инфраструктура, которую они используют и на которую оказывают влияние. Кроме того, почти все системы в той или иной степени связаны друг с другом технологически либо функционально. Это обуславливает рассмотрение региона с позиций его безопасного функционирования как некую мегасистему. Элементы этой системы объединены общей целью – безопасное функционирование, но локальные цели отдельных подсистем могут варьироваться от несовпадающих до строго противоположных. Такая мегасистема-регион функционирует в условиях высокой степени неопределенности как стохастической, так и нестохастической, в том числе поведенческой.

Исследование таких систем с точки зрения их безопасного функционирования возможно только с использованием системного анализа.

И в то же время в окружающей человека среде непрерывно идут различные процессы, которыми необходимо управлять, направлять их к нужным результатам. Это управление предполагает понимание лицом, принимающим решение (ЛПР), конечной цели, к которой необходимо стремиться при управлении; того, что необходимо предпринять (какие требуется провести мероприятия) для достижения поставленной цели: какие нужны ресурсы и чем ЛПР располагает в своей деятельности, как расходовать эти ресурсы для достижения требуемого результата наилучшим образом. Решение этих проблем связано со знанием закономерностей изучаемых явлений, наличием большого объема информации и способов её обработки, правил и принципов выработки решений по исследуемой проблеме. Следует учитывать, что исследуемое явление (система) не изолировано от окружающей среды и взаимодействует с ней, и это оказывает влияние на

его поведение. Все сказанное обусловило разработку методов комплексных междисциплинарных исследований.

Основой большинства таких исследований является эксперимент, проводимый с реальным объектом или его физическим прообразом – моделью. Возможности экспериментирования с реальным объектом или его моделью определяются масштабами исследуемой системы. Так, например, при создании системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных происшествий натуральный эксперимент можно проводить лишь с отдельными её элементами, а выбор её целесообразной структуры и характеристик возможен только на соответствующей модели. В этом случае мы вынуждены заменить реальный объект (систему) его прообразом – математической моделью. Математическая модель позволяет устанавливать соответствие между характеристиками исследуемой системы и условиями её функционирования с конечным результатом функционирования системы либо между выделяемыми ресурсами на создание системы и условиями её создания с показателями качества создаваемой системы. Однако недостаточно установить такое соответствие, необходимо ещё выработать правила определения наилучших, в некотором смысле, характеристик системы для достижения требуемого результата её функционирования либо правило выбора наилучшей стратегии расходования средств для создания системы с требуемым качеством. Эту часть проблемы решает новое научное направление – исследование операций.

Объектом исследования становится сложная система во всём её многообразии, т.е. это уже не конструктивно цельный объект, а совокупность различных подсистем и элементов, объединенных функционально, технологически, информационно, экономически либо как общность элементов любой природы, имеющих общую цель функционирования. В данном случае цель рассматривается как объединяющий результат, которого должна достигнуть система в процессе своего функционирования, причем ни одна подсистема или элемент системы самостоятельно этого результата объективно достичь не могут, более того – этот результат не является простой суммой результатов функционирования подсистем и элементов.

Потребности практики исследования таких сложных систем и вызвали к жизни системный анализ, явившийся новой, более развитой методологической основой разработки проблем принятия решений в сложных ситуациях, требующих анализа больших объемов разнородной информации. В нем объективно объединились методы математического моделирования и теории выработки решений в сложных ситуациях. В системных исследованиях одна из основных проблем – анализ целей поведения систем и выработка на этой основе правил оценивания эффективности их применения.

Теория эффективности как научное направление изучает закономерности любой целенаправленной деятельности. А эффективность целенаправленной деятельности (операции) – это степень достижения цели операции или степень соответствия реального результата желаемому (цели). В качестве меры эффективности вводится показатель эффективности. Модель операции или системы и устанавливает соотношение, связывающее показатель эффективности с факторами, определяющими качество системы или операции.

Одной из признанных форм системного анализа эффективности операции является имитационное моделирование, которое интенсивно развивается с 1970-х гг. и получило широкое применение в связи с созданием персональных компьютеров и информационных сетей, позволяющих создавать и реализовывать модели систем любой сложности. Имитационное моделирование реализует объектно-ориентированный подход к разработке моделей. Этот подход обеспечивает единую методологическую и технологическую основу для этапов анализа предметной области проектирования модели и их программной реализации независимо от предметной области.

Системный анализ – это совокупность средств научного познания и прикладных исследований, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам социально-экономического и научно-технического характера [1].

Системный анализ – это решение сложных проблем жизнедеятельности человека и принятия решений в сложных ситуациях, когда необходимо осуществлять выбор одной альтернативы

из множества; это использование возможностей вычислительной техники; это комплекс специальных процедур, приёмов, методов, обеспечивающих реализацию системного подхода (комплексного, всестороннего).

Под системным подходом понимают совокупность методологических принципов и концепций, позволяющих рассматривать каждый элемент системы в его связи и взаимодействии с другими элементами и внешней средой; прослеживать изменения, происходящие в системе при изменении отдельных её звеньев и внешней среды; изучать специфические системные качества; делать обоснованные выводы относительно закономерностей развития системы; определять рациональные режимы её функционирования, поведения.

Наряду с этим системный подход – это современная методология решения крупных проблем глобального и регионального масштаба, которая позволяет найти научно обоснованные пути решения технических, экономических, социальных и экологических проблем развития региона, мегаполиса.

Системный анализ рекомендует решать задачу принятия решений в следующей последовательности:

- выявлять и четко формулировать конечную цель;
- рассматривать всю проблему как целое, как единую систему;
- выявлять все последствия и взаимосвязи каждого частного решения;
- согласовывать цели подсистем с общей целью системы;
- выявлять и анализировать возможные альтернативные пути достижения цели и выбирать из них наиболее предпочтительные.

Новая научная дисциплина не является чисто математической, хотя она широко использует математические методы и породила ряд направлений прикладной математики. Главное же содержание дисциплины – сложные проблемы принятия решений, при изучении которых неформальные методы представления здравого смысла и способы описания – математическая формализация задач, – играют не меньшую роль, чем формальный математический аппарат.

Результат системных исследований, как правило, – выбор вполне определенной альтернативы действий: плана развития региона, параметров конструкции и т.п.

В данной работе изложены основные методологические вопросы системного анализа, используемые при проведении исследований сложных систем и операций.

## **1. ПРЕДПОСЫЛКИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

Человек, осуществляющий выбор наиболее предпочтительного варианта действий, всегда так или иначе мысленно совершает эти действия, т.е. осуществляет моделирование. Это позволяет ему соотнести предполагаемый вариант действий с конечным результатом. В общем случае моделирование позволяет выявить закономерности исследуемых систем и процессов, их структурно-функциональные особенности и взаимодействия с другими системами и внешней средой. Моделирование как метод научного исследования окружающего нас мира предполагает создание некоторого аналога (прототипа) изучаемого объекта – модели и изучение свойств этой модели с последующим перенесением выявленных свойств на объект исследования по аналогии.

Развитие математики и её прикладных направлений явилось мощным стимулом для становления математического моделирования. Это были аналитические модели в виде систем уравнений (алгебраических, дифференциальных, интегральных и т.п.). Основные фундаментальные законы естественных наук были сформулированы в форме математических моделей. Следующим шагом на пути развития математического моделирования было создание статистического моделирования, которое позволило описывать сложные системы и процессы с учётом воздействия на них случайных факторов, а затем и разработка имитационного моделирования сложных систем, позволяющего учитывать неопределенность как природного, так и поведенческого характера.

Второй важный методический аспект в этой ситуации – выбор предпочтительного варианта действий. Это особенно ослож-

няется в условиях, когда вариантов больше одного и их реализация осуществляется в условиях неполной (недостоверной) информации. С усложнением систем и их поведения существенно повысилась ответственность за принимаемые решения по управлению такими системами. Каждая программа действий, или система, создается для достижения конкретной цели, а поэтому она должна быть управляемой. Для управления системой по достижению поставленной цели необходимо принимать решение, которое зависит от большого объёма информации, часто противоречивой и с элементами неопределённости. В таких условиях интуиции и опыта для принятия решения становится недостаточно. Возникла насущная потребность в разработке формальных процедур для поддержки лица, принимающего решение. Оформи-лось новое научное направление – исследование операций, где под операцией понимается любая целенаправленная деятельность или совокупность действий, объединённых общим замыслом и единой целью. Исследование операций призвано вырабатывать решения в ситуациях, когда интуиция и опыт уже не могут быть надёжной основой для правильного решения в сложных ситуациях.

В середине XX в.:

1. Были созданы предпосылки для разработки сложных систем, прежде всего военного характера:

а) системы ПВО: раннее обнаружение авиации противника – радары; расчёт данных для управления противосамолётной артиллерией – переработка огромных массивов информации;

б) системы кодирования и декодирования информации;

в) системы управления ж/д транспортом;

г) системы управления городским хозяйством;

д) планирование развития промышленности и т.п.

2. Создаются вычислительные машины, способные перерабатывать огромные массивы информации в кратчайшие сроки.

Развитие вычислительной техники, особенно появление и широкое распространение персональных компьютеров и их сетей, позволило осуществлять комплексные системные исследования ряда фундаментальных проблем в области техногенной безопасности. В ещё большей степени возросла роль моделирования

в исследовании процессов, протекающих в техносфере. Эта роль обусловлена прежде всего тем, что результаты системных исследований в этой области позволяют активно влиять на процессы развития регионов, прогнозировать возможные последствия принимаемых экономических, экологических, градостроительных и других решений и выбирать наиболее целесообразные для данного региона.

Эти два процесса, соединившись, обеспечили так называемую научно-техническую революцию XX столетия. А в теоретическом плане это соединение привело к созданию нового научного направления – системного анализа.

## **2. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА**

Научная дисциплина «Исследование операции» сформировалась в послевоенные годы, но её основы были заложены значительно раньше. Существенный вклад в формирование принципов и системы методов исследования операций внесли ученые СССР.

Так, Д. А. Вентцель и В. С. Пугачёв развили теорию «Эффективности технических систем» (Военная академия им. Петра Великого и Жуковского), в рамках которой сформулированы принципы и методы выбора конструктивных параметров технических систем (в основном систем вооружения), наилучшим образом отвечающих достижению целей, для решения которых они создавались.

Аналогичные идеи развивались и в теории управления техническими системами (типа автопилота) академиком А.Н. Колмогоровым. Здесь точнее решалась задача определения конструктивных характеристик системы управления, которые должны были обеспечить достижение определенной цели, например, обеспечивать полёт самолёта по заданному курсу. Подобные задачи возникали и в экономике. Так, в конце 1930-х гг. академиком Л.В. Канторовичем была решена знаменитая задача об оптимальном раскрое; сформулирована транспортная задача и тем самым создана методологическая основа линейного программирования. Следует отметить, что задача о наилучшем способе распределе-

ния ресурсов всегда занимала значительное место в экономике. Эти работы Л.В. Канторовича положили начало формированию нового методологического подхода в математике, названного «математическое программирование». Математическое программирование стало методическим основанием исследования операций, в основе которого лежит моделирование операций (целенаправленной деятельности в любой области). А.Я. Хинчин и Б.В. Гнеденко в середине 1930-х гг. начали изучать класс вероятностных задач, получивших впоследствии название задач теории массового обслуживания.

Особенно интенсивное развитие получили эти методы во время Второй мировой войны при планировании боевых действий, когда необходимо было наилучшим образом распределять всегда ограниченные ресурсы. Значительные результаты в решении прикладных задач распределения ограниченных ресурсов были получены учёными Англии и США, тогда и возник термин «исследование операций».

Появление ЭВМ в послевоенные годы стимулировало методическое объединение разнообразных задач, связанных с проблемами принятия решений, в единую научную дисциплину «Исследование операций».

Значительную роль в становлении «Теории исследования операций» сыграли обобщающие теоретические работы Ю.Б. Гермейера [6]. Он развил общую методологию анализа задач принятия решений – задач существенно различных в содержательном плане. Это тем более важно, так как в англоязычной литературе «исследованию операций» придавался в основном прагматический подход, основные усилия направлялись на поиск решений конкретных прикладных задач и почти не рассматривались общеметодические вопросы, позволяющие решать эти задачи с единых методических позиций.

Огромный вклад в развитие «теории исследования операций» и становление системного анализа, его математического приложения внёс академик Н.Н. Моисеев. Системный анализ объединил методы исследования операций и теории выработки решений в сложных ситуациях.

### 3. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Системный анализ – это не столько строгая математическая наука со своей аксиоматикой, сколько методология, синтез методологических принципов и концепций. Поскольку системный анализ ещё находится в стадии становления и методологического оформления, то основополагающие принципы у разных авторов звучат по-разному, но содержательно они близки и сводятся к следующим:

**Принцип конечной цели** предполагает наличие у каждой системы цели движения (развития, создания). «Бесцельной» системы не может быть. Для каждой системы наличие конечной цели является абсолютным приоритетом. Этот принцип имеет несколько правил:

а) для проведения системного анализа необходимо выявить для существующей или сформировать для создаваемой системы цель её существования или создания и цель исследования системы. Нечёткое определение целей приведёт к неверным результатам;

б) чёткое уяснение основной цели системы (её предназначения) позволяет правильно определять и формулировать её существенные свойства, показатели качества (эффективности) и критерии;

в) при синтезе системы любое изменение или совершенствование системы должно оцениваться относительно его вклада в достижение цели системы;

г) цель создаваемой системы задаётся исходя из интересов (цели) системы, в рамках которой создаётся эта система или элементом (подсистемой) которой она является.

Последнее правило следует из теоремы Гёделя о неполноте формальных систем. Согласно этой теореме невозможно в рамках некоторой формальной системы вывести все истинные утверждения, относящиеся к объектам, описываемым средствами этой формальной системы. Необходима другая, более широкая система (метасистема), в пределах которой формируются принци-

альные положения для систем более низкого уровня, т.е. требуется внешнее дополнение для того, чтобы справиться с гедделевской трудностью. Понятие **внешнего дополнения** – фундаментальная идея теории систем (впервые оно было описано С. Биром). Внешнее дополнение позволяет в определенной мере ограничить изучаемую систему, вычленив ее из метасистемы как некоторую целостность, выдвинуть гипотезы поведения субъектов системы и тем самым перейти к формализованному описанию системы. В этом суть **принципа внешнего дополнения**, который согласует цели организаций и их поведение с целями деятельности метасистемы.

Так, например, целью региона является устойчивое и интенсивное развитие, направленное на рост благосостояния населения, а целью системы обеспечения безопасности жизнедеятельности населения региона является комплекс ограничений на это развитие, на отвлечение ресурсов для создания и поддержания на требуемом уровне сил и средств системы безопасности. Кажущееся здесь противоречие на самом деле не имеет места, так как без эффективной системы безопасности в регионе не будет и повышения благосостояния населения.

Таким образом, внешнее дополнение призвано исключить субъективизм исследователя, вызванный произволом в выборе показателей качества и свойств системы и критериев эффективности операции. Ошибка в выборе критерия может свести на нет все усилия исследователя при анализе эффективности операций. Внешнее дополнение является тем логическим замыканием, которое в совокупности со свойствами (качествами) исследуемой системы, способами и условиями ее использования составляет необходимые условия для определения эффективности ее целенаправленного функционирования.

**Принцип измерения.** О качестве функционирования системы можно судить только относительно сформулированной цели системы или относительно функционирования системы более высокого уровня, элементом которой является рассматриваемая система, ведь эффективность системы – это степень соответствия (достижения) реального результата применения или движения системы требуемому, т.е. цели.

**Принцип эквивиальности.** Этот принцип состоит в том, что один и тот же конечный результат может быть достигнут различными путями и при различных начальных состояниях. Это, в определённом смысле, форма устойчивости операции по отношению к начальным и граничным условиям.

И в то же время этот принцип обеспечивает множественность стратегий (способов) достижения поставленной цели, что и обуславливает необходимость решения задачи и выбора среди них наилучшей с точки зрения достижения цели.

**Принцип единства.** Это совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности частей. Принцип ориентирован на расчленение (декомпозицию) системы с сохранением связей между элементами. Этот принцип реализуется в двух направлениях: декомпозиция системы и композиция.

**Декомпозиция** системы – расчленение системы на ряд менее сложных подсистем, что позволяет снижать уровень сложности исследований. Обычно легче исследовать несколько более простых подсистем, чем одну сложную систему.

**Композиция** системы – формирование некой целостности (системы) из элементов (подсистем) более низкого уровня, в рамках которой исследуется операция, обобщающая частные цели подсистем. Такой подход целесообразен при исследовании систем, для которых затруднен выбор показателя эффективности. В этом случае, применяя композицию систем, образуем систему более высокого уровня сложности, для которой эффективность ее функционирования удастся оценить единым показателем, а показателем частных операций, проводимых в рамках подсистем, оценивать их вклад в общую эффективность операции. Так, например, эффективность службы спасения и ликвидации последствий ЧС можно оценить через ее вклад в безопасность жизнедеятельности региона.

Декомпозиция и композиция реализуются при проведении анализа и синтеза систем соответственно.

**Принцип связности.** Каждый элемент системы рассматривается с учётом его связей с элементами системы и окружающей средой. Выделяют два типа связей: внутрисистемные, т.е. связи с

другими элементами системы, и связи с внешним миром, т.е. с элементами и системами, не входящими в исследуемую систему.

**Принцип модульного построения.** Этот принцип предполагает при моделировании системы замену элементного ее построения с учётом физических свойств элементов на модульное (функциональное), где каждый модуль характеризуется входом и выходом, а преобразование осуществляется в соответствии с некоторым оператором преобразования. Набор таких модулей ограничен, они описаны математически, унифицированы и охватывают достаточно широкий круг реальных систем. Используя такие модули, относительно легко можно строить модели систем любой сложности [5].

**Принцип функциональности.** Это совместное рассмотрение структуры и функции системы с приоритетом функции над структурой. Между структурой и функцией существует взаимосвязь: с изменением функции должна изменяться структура, и наоборот. Отдельные функции элементов системы образуют процесс функционирования системы. Основу этих процессов составляют:

- материальный поток;
- поток энергии;
- информационный поток;
- процесс смены состояний.

С этой точки зрения структура есть множество ограничений на потоки в пространстве и во времени.

**Принцип развития.** Поскольку система постоянно находится в «движении», то она:

- либо «умирает»;
- либо находится на некотором постоянном уровне своего состояния и функционирования;
- либо развивается.

Все эти процессы происходят с потреблением некоторых средств, идёт обмен «средства → состояние → функция». Пусть  $W(t), t \in T$  – некоторый показатель эффективности движения системы, тогда предполагается, что

- если  $W'(t) < 0$  – «умирание» системы;

- если  $W'(t) = 0$  – состояние системы неизменно;
- если  $W'(t) > 0$  – система развивается.

Обычно для существующей системы рассматривают все три возможных направления движения в будущем и выбирают целесообразное. Если признана целесообразность её развития, т. е. расширение, замена частей, накапливание информации, улучшение качества функционирования или возможность выполнения дополнительных задач, то определяется цена этого развития, сроки и ожидаемый результат – все это сопоставляется и принимается окончательное решение о возможности его реализации в таких условиях. При проектировании вновь создаваемых систем в них закладывается возможность адаптации к изменяющимся внешним условиям, способность к развитию. Этот принцип ориентирует разработчика на учёт предыстории и истории развития системы в прошлом и выявление закономерностей её функционирования. Один из способов реализации этого принципа – рассмотрение системы на всех этапах жизненного цикла: разработка, проектирование (ОКР), производство (создание), ввод в эксплуатацию, эксплуатация, модернизация (развитие), вывод из эксплуатации, уничтожение (утилизация).

В настоящее время всё больше создаётся систем, постоянно функционирующих и находящихся в постоянном совершенствовании, развитии, например, энергосистемы, транспортные системы, системы жизнеобеспечения человека и др. Для их подсистем (элементов) можно проследить все этапы жизненного цикла от зарождения идеи создания до снятия с эксплуатации, например, отдельные турбины, трансформаторы, тепловозы и другие машины. А система в целом находится либо в неизменном состоянии, либо развивается.

**Принцип децентрализации.** Это сочетание в сложной системе централизованного и децентрализованного управления. Степень централизации должна быть минимальной. Однако децентрализованное управление требует гораздо большего времени на адаптацию системы, особенно в условиях быстроменяющейся окружающей среды. Например, общее время синхронизации цепи, состоящей из  $N$  автоматов, зависящих от состояний соседних

автоматов при централизованном управлении, составляет один такт, а для взаимодействующих только с соседними –  $3N$  тактов. Недостаток централизованного управления – сложность управления из-за огромного потока информации, подлежащей обработке для принятия решения на уровне системы в целом. Поэтому в сложных системах обычно одновременно существуют два уровня управления: на нижнем (элементном) уровне решается задача поддержания системы в заданном состоянии, а для изменения состояния системы, перехода на новые режимы функционирования включается централизованная система управления, также обеспечивающая адаптацию системы к резким изменениям внешней среды.

**Принцип неопределённости.** Этот принцип предполагает учёт неопределённостей как в системе, так и в окружающей среде, причём неопределённость бывает двух видов: стохастическая и не стохастическая. Последняя может быть как поведенческая, так и природная. В этом случае при выборе способов поведения применяют метод гарантированного результата, который соответствует наилучшим условиям функционирования. Стохастическая неопределённость описывается вероятностными методами.

Рассмотренные принципы обладают высокой степенью общности, поэтому при проведении исследований их необходимо наполнить конкретным содержанием применительно к рассматриваемой системе. Эти принципы являются определяющими при организации системных исследований.

#### **4. СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Человечество живет во все усложняющемся мире. Так, к настоящему времени для обеспечения комфортности жизни человеком созданы и функционируют различные технические системы, в частности, это транспортные коммуникации – автодороги, железные дороги, трубопроводы, системы электроснабжения с соответствующей инфраструктурой; различные предприятия – промышленные и сельскохозяйственные; искусственные гидросистемы – каналы, водохранилища, гидросооружения; системы

жизнеобеспечения городов и населенных пунктов и т.п. Создание этих систем обеспечивает комфортность жизнедеятельности человека, но в то же время делает зависимой его жизнь и безопасность от эффективного функционирования созданных систем. Но для технических систем объективным свойством является возможность нарушения работоспособности и прекращение функционирования. Такие ситуации могут приводить в лучшем случае только к невыполнению стоящих перед ними задач, а в худшем – нарушение работоспособности может сопровождаться различного рода чрезвычайными происшествиями: взрывами, пожарами, наводнениями, заражением территории химическими веществами и т.п. Это в свою очередь может повышать уровень так называемого техногенного риска.

Человек, заботясь о своей безопасности, соответственно стремится понизить уровень этого риска. Однако часто его возможностей бывает недостаточно – такое несоответствие определяет проблему. **Проблема** – это несоответствие возможностей желаемому. Совокупность проблемы и условий, в которых она возникла, образуют **проблемную ситуацию**. Для разрешения проблемной ситуации исследователь выделяет среди объектов материального мира некоторую целостность – **систему**. В дальнейшем мы будем не конкретизировать тип системы, а рассматривать **систему** как совокупность взаимосвязанных элементов любой природы, объединенных общностью цели и закон поведения которых определяется отношениями между ними. Каждая система функционирует в некоторой внешней среде – это все то, что не включено в рассматриваемую систему. Взаимодействие системы с внешней средой осуществляется посредством входных и выходных воздействий (связей). Связи могут быть материальные, энергетические, информационные, экономические и т.п. Элементы, объединенные в систему, приобретают новое свойство, не выводимое из свойств элементов. Это так называемое свойство **эмерджентности**, т.е. свойство системы шире суммы свойств отдельных элементов, ее составляющих.

Каждая система имеет определенную **структуру** – совокупность элементов (Э) системы и множество связей между ними (G). Структура представляет собой совокупность качеств, обес-

печивающих системную целостность и сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях.

С формальной точки зрения процесс, протекающий в системе, описывается набором некоторых параметров. Совокупность конкретных значений этих параметров в определенный момент называют **состоянием** системы. **Функционирование** системы – это процесс смены состояний. В каждый момент система может находиться только в одном из состояний. Состояние системы и внешней среды в определенный момент называют **ситуацией**.

При анализе систем различают объект и субъект системы. Субъекты системы – это лицо или группа лиц, наделенных правами и имеющих возможность принимать решение, организуя поведение системы, т.е. управлять системой или ее частью. Основного субъекта, в интересах которого осуществляются исследования, называют **лицом, принимающим решения (ЛПР)**.

Рассматриваемый класс систем не представляется возможным описать только формальными методами, поэтому их описание сочетает вербальное и формализованное описания.

Вербальное описание сводится к описанию их характерных свойств.

1. Одно из таких свойств уже было отмечено – это свойство **эмерджентности** – свойство перехода количества в качество.

2. В процессе осуществления своей функции система воздействует на элементы, ее составляющие, подчиняя их общему, целенаправленному поведению. Для этого системе присуще **свойство обратной связи**, что и позволяет придать поведению системы целенаправленный характер. Здесь обратная связь – это внутреннее свойство системы.

3. Система обладает **иерархической структурой**, которая допускает ее декомпозицию, т.е. расчленение на подсистемы. Это позволяет исследовать каждую подсистему самостоятельно, но с учетом влияния на нее других подсистем, внешней среды и обратных связей.

4. Принцип **системных приоритетов** (система как целостный организм) – «интересы» (задачи) каждого элемента (подсистемы) подчинены общей цели (направлены на достижение общей цели и согласуются с ней); противоречия между элементом и

системой разрешаются в интересах системы. В соответствии с этим система воспринимается как целостный объект, выделенный среди других, своей специфичностью, самостоятельностью и внутренними законами функционирования и развития.

5. Принцип «**черного ящика**». Часто исследователя не интересует внутреннее содержание системы. Ему важно соотношение «вход» – «выход», чтобы была возможность организовать такое входное воздействие, которое обеспечило бы желаемое на выходе.

Перечень свойств системы в различных трудах по системному анализу может отличаться от приведенного, так как это вопрос больше субъективный, чем формальный, и конкретизируется задачами той или иной работы.

Исходя из приведенных свойств системы, ее формальную схему (рис.1) можно представить в виде множества величин, описывающих процесс функционирования системы S и образующих в общем случае следующие подмножества:

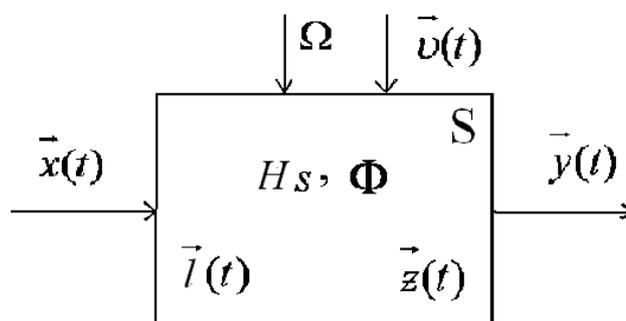


Рис. 1

$x_i \in X, i = \overline{1, n_x}$  – подмножество входных воздействий на систему;

$v_e \in V, e = \overline{1, n_v}$  – подмножество воздействий внешней среды на систему;

$l_k \in L, k = \overline{1, n_l}$  – подмножество внутренних параметров системы;

$y_j \in Y, j = \overline{1, n_y}$  – подмножество выходных переменных системы (реакция системы).

В общем случае  $x_i, v_e, l_k, y_j$  – элементы непересекающихся подмножеств и содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие. Переменные  $x_i, v_e, l_k$  являются независимыми (экзогенными), а выходные переменные  $y_j$  являются зависимыми (эндогенными).

Особое значение имеют характеристики состояния системы  $S$  в фиксированные моменты  $t$ :  $z_m(t) \in Z(t), m = \overline{1, n_z}$ .

Тогда под **функционированием** системы будем понимать изменения состояния системы во времени только под воздействием входа  $x_i \in X$  и внешней среды  $v_e \in V$  при неизменных характеристиках структуры системы  $(\mathcal{E}, G)$  и внутренних параметров  $\vec{l}$

$$z(t) = \Phi(\vec{x}, \vec{v}, t / (\mathcal{E}, G), \vec{l}). \quad (1)$$

Совокупность всех возможных значений состояний системы  $\vec{z}$  называется **пространством состояний** системы –  $Z$ .

Для описания процесса функционирования системы необходимо задать начальное состояние в момент  $t_0 \in [0, T]: \vec{z}(t_0) = (z_1^0, z_2^0, \dots, z_m^0, t_0)$  и определить характеристики  $\vec{x}(t), \vec{v}(t), \vec{l}(t)$ . Это описание выполняется по схеме «вход – состояние – выход» с помощью двух векторных уравнений

$$\vec{z}(t) = \Phi(z_0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, t) \quad (2)$$

и

$$\vec{y}(t) = H_s(\vec{z}, t), \quad (3)$$

где  $H_s(\vec{z}, t)$  – **закон функционирования** системы  $S$ ;

$\Phi(z_0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, t)$  – закон формирования состояний системы  $S$ .

Или соответственно

$$\vec{y}(t) = H_s[\Phi(z_0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, t)]. \quad (4)$$

Закон функционирования может быть задан функционалом, функцией, логическими условиями, алгоритмом. Тогда математическая модель системы может быть представлена как совокупность переменных  $\vec{x}(t), \vec{v}(t), \vec{l}(t)$  и математических связей между ними  $\Phi$  и  $H_s$ , начального состояния  $z_0(t)$  и выхода  $\vec{y}(t)$

$$\langle \vec{x}(t), \vec{v}(t), \vec{l}(t), z_0(t), \Phi, H_s, \vec{y}(t) \rangle \quad (5)$$

Если элементы модели (5) содержат случайные компоненты  $\Omega$ , то это стохастическая модель и  $\vec{y}(t)$  – в общем случае случайный процесс, либо случайная последовательность. Если же не содержат  $\Omega$ , то (5) детерминированная модель и между входом и выходом будет однозначное соответствие

$$\vec{y}(t) = f(\vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, \vec{z}_0, t). \quad (6)$$

Таким образом, функционирование системы осуществляется только под воздействием входных факторов  $\vec{x}(t)$ , в условиях внешней среды  $\vec{v}(t)$  и при неизменном значении внутренних параметров  $\vec{l}(t)$  и  $(\exists, G)$  и направленно на получение требуемого значения выхода  $\vec{y}(t)$ . Поскольку процесс функционирования системы целенаправленный, то входные воздействия  $\vec{x}(t)$  являются управляемыми, т.е. в системе существует внутренняя система управления.

Один и тот же закон функционирования  $H_s$  системы  $S$  может быть реализован различными способами – алгоритмами функционирования –  $A_s$ . Под **алгоритмом** функционирования понимают метод получения выходных характеристик  $\vec{y}(t)$  с помощью воздействий входных факторов  $\vec{x}(t)$  и с учетом воздействий внешней среды  $\vec{v}(t)$  и значений собственных параметров  $\vec{l}(t)$ . Выбирая конкретный алгоритм функционирования  $A_s$  из множества допустимых, система решает задачу выбора. Системы, которым присуща способность выбора, относят к классу сложных

систем. Эта способность и обеспечивает сложным системам свойство целенаправленности, т.е. способность выбирать рациональный способ достижения цели из некоторого неединичного множества допустимых (возможных) способов. Целенаправленные системы являются управляемыми.

Сложные системы могут не только функционировать, но и развиваться. Под **развитием** системы будем понимать способность системы изменять свои внутренние характеристики  $\vec{l}(t)$  либо структуру  $(\mathcal{E}, G)$ , либо законы  $H_s(\vec{z}, t)$  и  $\Phi(\vec{z}_0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, t)$ , либо их некоторые комбинации с учетом внешней среды  $\vec{v}(t)$  под воздействием входных факторов  $\vec{x}(t)$ . Таким образом, для сложных систем характерно наличие двух уровней управления:

- управление функционированием – выбор алгоритма  $A_S$ ;
- управление развитием.

**Управлением** называется специально организованное воздействие на систему, преследующее цель достичь желаемых изменений ее состояния (поведения) и получить за счет этого нужные выходные реакции.

Рассматриваемая система, объединяющая три составляющих – вход, состояние, выход, – подчеркивает свою способность взаимодействовать с внешней средой. Это взаимодействие может быть информационным, материальным (ресурсы), экономическим, энергетическим и т.п. Управление этими входными воздействиями и обеспечивает целенаправленность системы. Таким образом, целенаправленную систему можно представить в виде объединения управляющих и управляемых подсистем (рис. 2).

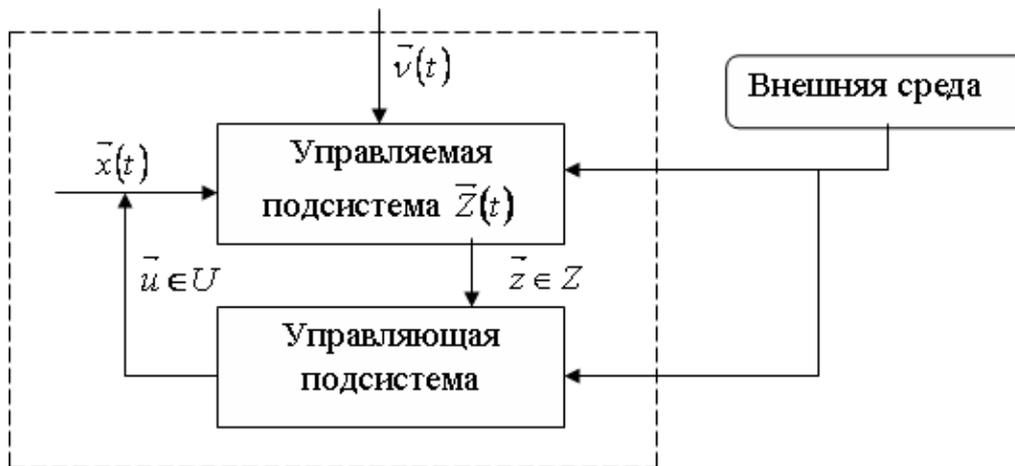


Рис. 2

**Управляемая подсистема** представляет собой динамический объект, изменяющий свои состояния под действием некоторых внутренних закономерностей его функционирования, под влиянием внешней среды, а также команд (управляющих воздействий)  $\bar{u} \in U$ , поступающих от управляющей системы. О состоянии управляемой системы по каналам обратной связи управляющая система (система управления) получает сообщения.

**Управляющая подсистема** осуществляет управление динамическим объектом, руководствуясь определенными принципами управления и сообразуясь с общей целью системы, с воздействиями внешней среды, а также с информацией, получаемой от управляемой системы. Система управления может состоять из нескольких распорядительных центров и иметь иерархическую структуру. В сложных человеко-машинных системах в состав распорядительных центров входят люди (субъекты), принимающие решения и реализующие на основе этих решений управляющие воздействия на объекты управления.

Система, взаимодействующая с внешней средой, является **открытой**. Только открытая система и способна развиваться, совершенствоваться. Система, изолированная от внешнего мира является **закрытой** (замкнутой). Не получая внешнего воздействия, закрытая система со временем, расходуя внутренний ресурс, деградирует.

Рассмотренная система S – **объект** исследования системного анализа, а **предмет** исследования – закономерности ее функционирования и развития.

## 5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Побудительным мотивом каждого действия человека является конкретная цель.

Цель<sup>2</sup> – это желаемый результат, который предполагается достичь за определенный промежуток времени. Если фактическое состояние (действительный результат) не соответствует желаемому, то имеет место **проблема** – расхождение между действительным и желаемым. Выработка плана (способа) действий по устранению проблемы составляет сущность **задачи принятия решений**.

Проблема формулируется вербально. Для того чтобы разрешить проблему, необходимо оформить ее в виде одной или нескольких задач. Переходный этап от проблемы к постановке формальных задач – проблемная ситуация, в ходе анализа которой вербальная цель (как некоторое идеальное представление ЛПР о желаемом результате) разбивается на подцели, и устанавливаются общие ограничения. В практике обычно решение проблемы увязывается с достижением определенной цели, которая выражается требуемым (желаемым) результатом целенаправленной деятельности системы.

Каждая проблема всегда связана с определенным комплексом условий, его обобщенно называют **ситуацией**. Совокупность проблемы и ситуации образует **проблемную ситуацию**. Выявление, описание и анализ проблемной ситуации дают исходную информацию для постановки задачи принятия решений (рис.3).

---

<sup>2</sup> Цель – один из элементов поведения и сознательной деятельности человека, который характеризует предвосхищение в мышлении результата деятельности и пути его реализации с помощью определенных средств. Цель выступает как способ интеграции различных действий человека в некоторую последовательность или систему.

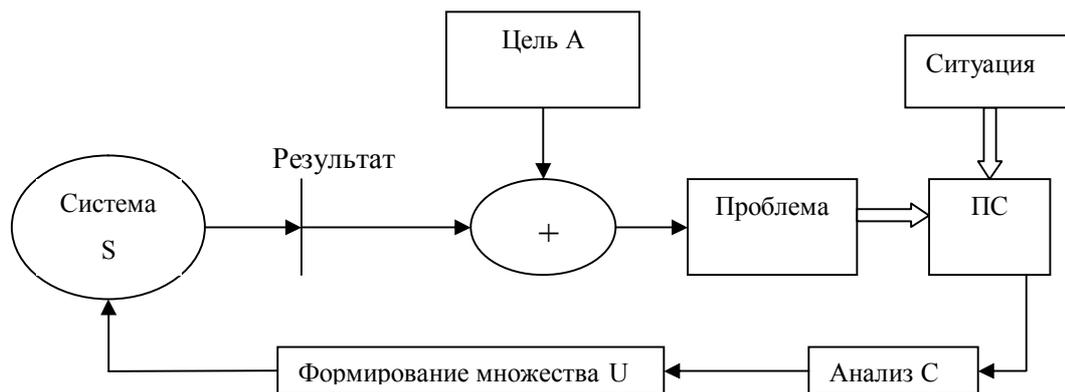


Рис.3

Принятие решения направлено на разрешение проблемной ситуации, т.е. на разработку способов (мероприятий), программ достижения поставленной цели. Эти мероприятия должны быть целенаправленными, т.е. направленными на достижение цели. Упорядоченную совокупность взаимосвязанных действий, объединенных общим замыслом и направленных на достижение вполне определенной цели, называют **операцией**. На выполнение операции расходуются ресурсы. План действий или способ использования ресурсов, выделенных для достижения поставленной цели, называют **стратегией**.

Стратегия описывается содержательно и формально – набором параметров, определяющих ход и исход операции при реализации данной стратегии. С содержательной точки зрения стратегиями могут быть различные технические средства и системы, виды ресурсов, например, варианты структурно-функциональных схем систем обеспечения безопасности, способы применения технических средств и систем при ликвидации чрезвычайного происшествия и т.п. Формально стратегии представляются обычно числовыми векторами или матрицами. В динамических задачах стратегии описываются дискретными или непрерывными функциями специальных параметров, которые определяют развитие операции во времени.

Если существуют две и более стратегий достижения поставленной цели, то возникает **задача выбора**, т.е. из множества альтернативных стратегий необходимо выбрать стратегию, в неко-

тором смысле наилучшую. Задачу выбора решает лицо, принимающее решение (ЛПР). Для этого у ЛПР должна быть возможность сопоставлять различные стратегии между собой, так как при одних способах действий цель достигается в большей степени, при других – в меньшей. Следовательно, с точки зрения ЛПР исходы будут определенным образом различаться по предпочтительности. Это предполагает формирование системы предпочтений ЛПР, которая включает как количественную, так и качественную информацию о предпочтениях ЛПР.

Как уже отмечалось: способов действий, т.е. способов расходования ресурсов (стратегий), может быть несколько (множество), в общем случае и неограниченное. Однако все они могут быть разделены на обеспечивающие достижение поставленной цели и не обеспечивающие. Формирование всего множества стратегий ЛПР осуществляется путем логического анализа, интуиции, проведения исследований и экспериментов. Это исходное множество стратегий сужается до множества  $U$  **допустимых стратегий** на основе учета ограничений материальных, технических, финансовых, правовых, временных и т.п., которые формируются ЛПР в результате анализа проблемной ситуации. **Допустимой**, или приемлемой, называют стратегию  $u \in U$ , удовлетворяющую множеству ограничений. Таким образом, реализация допустимой стратегии  $u \in U$  приводит к некоторому результату выполнения операции  $y_{(u)} \in Y$  ( $Y$  – множество возможных значений результата выполнения операции).

В общем случае операция – это обмен, в результате которого система за приобретенную пользу расплачивается некоторым количеством ресурсов (материальных, финансовых, трудовых, временных и т.п.), а приобретает полезный эффект. Таким образом, полное описание результата операции характеризуется соотношением между выгодой и затратами.

Если обозначить:  $C$  – ресурс в стоимостном выражении,  $T$  – время,  $q$  – полезный эффект и  $Y$  – результат операции, то результат можно представить вектором

$$Y = \|q, C, T\|,$$

либо некоторой сверткой

$$Y = y(q, C, T).$$

Получив конкретный результат операции  $y \in Y$ , его сопоставляют с тем желаемым, который выдвинут в качестве цели –  $Y_{A_0}$ . Следовательно, и результат операции  $Y$ , и цель  $Y_{A_0}$  должны быть измерены в одних и тех же величинах. Для количественного описания соответствия реального результата операции  $y \in Y$  требуемому  $Y_{A_0}$  формально вводится на множестве результатов числовая **функция соответствия**  $\rho = \rho(Y(u), Y_{A_0})$ . Эта функция в общем случае является функцией неопределенных факторов стохастического характера, в силу чего  $\rho(\cdot)$  – случайная переменная. Поэтому, чтобы вынести суждение о степени соответствия полученного результата  $Y(u)$  – желаемому  $Y_{A_0}$ , применяют показатель вида

$$W(u) = M \left[ \rho(Y(u), Y_{A_0}) \right], \quad u \in U.$$

Степень соответствия полученного результата выполнения операции требуемому (цели) есть эффективность выполнения операции, и  $W(u)$ , следовательно, – показатель эффективности.

Эффективность – это определяющее и наиболее общее свойство операции. Показатель эффективности  $W(u)$  зависит от выбранной стратегии  $u \in U$  и определяет выгодность обмена  $C \leftrightarrow q$ . Следовательно, возможные альтернативные пути достижения цели в общем случае обладают различной эффективностью. Системный анализ рекомендует сравнивать эти пути между собой и выбирать из них лучший на основе эффективности, к которой приводит тот или иной путь (вариант действий). Поэтому эффективность выполнения операций – важная категория системного анализа. Таким образом, задача разрешения проблемной ситуации свелась к исследованию эффективности операции.

Исследование эффективности операции проводится в двух взаимосвязанных направлениях:

– **оценка** эффективности заключается в выработке суждений относительно пригодности заданного способа действий или приспособляемости системы к выполнению поставленной задачи, т.е. определению значений  $W$  для всех допустимых значений  $u \in U$  – задача оценивания;

– **анализ эффективности** – направлен на установление наилучшей, с точки зрения предпочтений ЛПР, стратегии использования имеющихся (выделенных) ресурсов –  $u \in U$  для достижения поставленной цели – задача выбора (рис. 4).

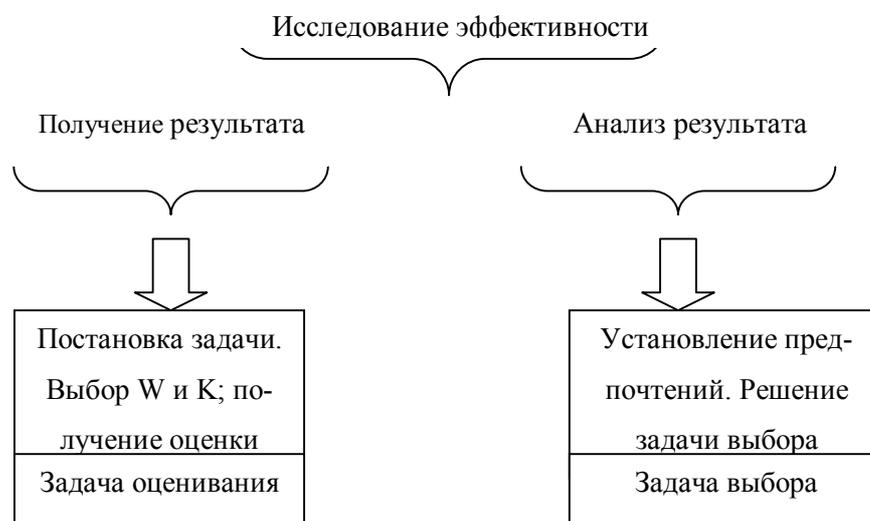


Рис.4

Таким образом, эффективность операции и показатель эффективности – ключевые понятия системного анализа проблемной ситуации.

В общем случае эффективность операции зависит:

- от качества системы  $S$ ;
- форм и способов выполнения операции;
- внешних факторов (условий).

Решение ЛПР принимает в условиях резкого возрастания сложности и объема задач, информационной неопределенности и т.п., что делает невозможным принятие рационального решения, полагаясь на личный опыт и интуицию. Такая ситуация характеризуется тем, что интеллектуальные возможности человека вошли в противоречие с объемом информации, которую необходимо осмыслить и переработать. Это противоречие разрешается в

рамках математической теории выработки решений в сложных ситуациях, или теории принятия решений (ТПР). Объектом исследования этой теории является проблемная ситуация, а предметом – общие закономерности выработки решений в проблемных ситуациях. В теории принятия решений разрабатываются методы получения выводов информации о проблеме, о том, какой из альтернативных вариантов решения является наилучшим, в том числе сведения о предпочтениях ЛПР и его отношении к риску, а также суждениях ЛПР о возможных реакциях других субъектов на принятые им решения. Теория принятия решений предписывает ЛПР руководствоваться при выработке решения определенными рекомендациями о том, как следует подходить с системных позиций к определению и структуризации целей; как разобраться в противоречивых задачах и обеспечить их разумный компромисс; как учитывать информацию и т.п.

При анализе сложных ситуаций важное место занимают количественные методы обоснования решений, а для этого необходимо строить математические модели.

Человек, осуществляющий выбор наиболее предпочтительного варианта действий, всегда так или иначе мысленно совершает предполагаемое действие, т.е. моделирует его. Моделирование предполагает упрощенное описание, но такое, при котором сохранилась бы главная идея решения и можно было бы оценить его последствия. Поэтому именно на этапе выбора варианта действий возникают наибольшие возможности применения формализованных моделей и методов. При анализе сложных ситуаций различают соответственно два типа моделей:

1. **Модели процессов** выполнения операций (систем, реализующих операцию), устанавливающие, как правило, количественное соответствие между альтернативными вариантами действий (стратегиями) и результатом выполнения операции (показателем эффективности), т.е. реализующие некоторое отображение  $\eta: U \Rightarrow W$  (задача оценивания).

2. Модели выбора, обеспечивающие формальное определение наилучшей, с точки зрения ЛПР, стратегии. Результаты последних не являются окончательным решением, а служат только

рекомендацией для ЛПР, который для окончательного решения использует неформализуемые суждения, свои предпочтения и другую неколичественную информацию (задача анализа).

В зависимости от сложности исследуемой ситуации различают следующие виды решений:

– в простейших ситуациях решение – это предписанный порядок действий для достижения четко определенной цели;

– в сложной ситуации решение – это сознательный выбор лучшей альтернативы из определенного ограниченного множества;

– в наиболее сложных ситуациях, не до конца формализованных, решение – это процесс выбора управления с учетом текущего состояния и прогноза развития ситуации в будущем.

Характер и сложность задачи выбора наилучшей стратегии существенно зависит от того, в каком соотношении находятся допустимые стратегии и исходы операции. Рассматривают три возможных варианта:

а) отсутствие риска: между допустимыми стратегиями  $u \in U$  и эффектом  $g \in G$  существует однозначное соответствие, т.е. каждой стратегии  $u \in U$  соответствует один и только один исход  $g \in G$ ;

б) стохастический риск, когда операция выполняется в условиях стохастической неопределенности. В этом случае каждой допустимой стратегии  $u \in U$  соответствует конкретное распределение вероятностей на множестве возможных исходов  $G - P(g)$ , т.е. каждый исход определяется вероятностью его появления  $P(g(u))$ ,  $u \in U$ ;

в) нестохастический риск, когда операция осуществляется в условиях нестохастической неопределенности (природной, поведенческой и т.п.). В этом случае рассматриваются возможные сценарии условий реализации операции, и в рамках такого сценария устанавливается соотношение между стратегией  $u \in U$  и эффектом  $g \in G$ .

Как правило, исследование проблемных ситуаций проводится еще до создания системы, реализующей операцию, поэтому установление соотношения между стратегией  $u \in U$  и эффектом

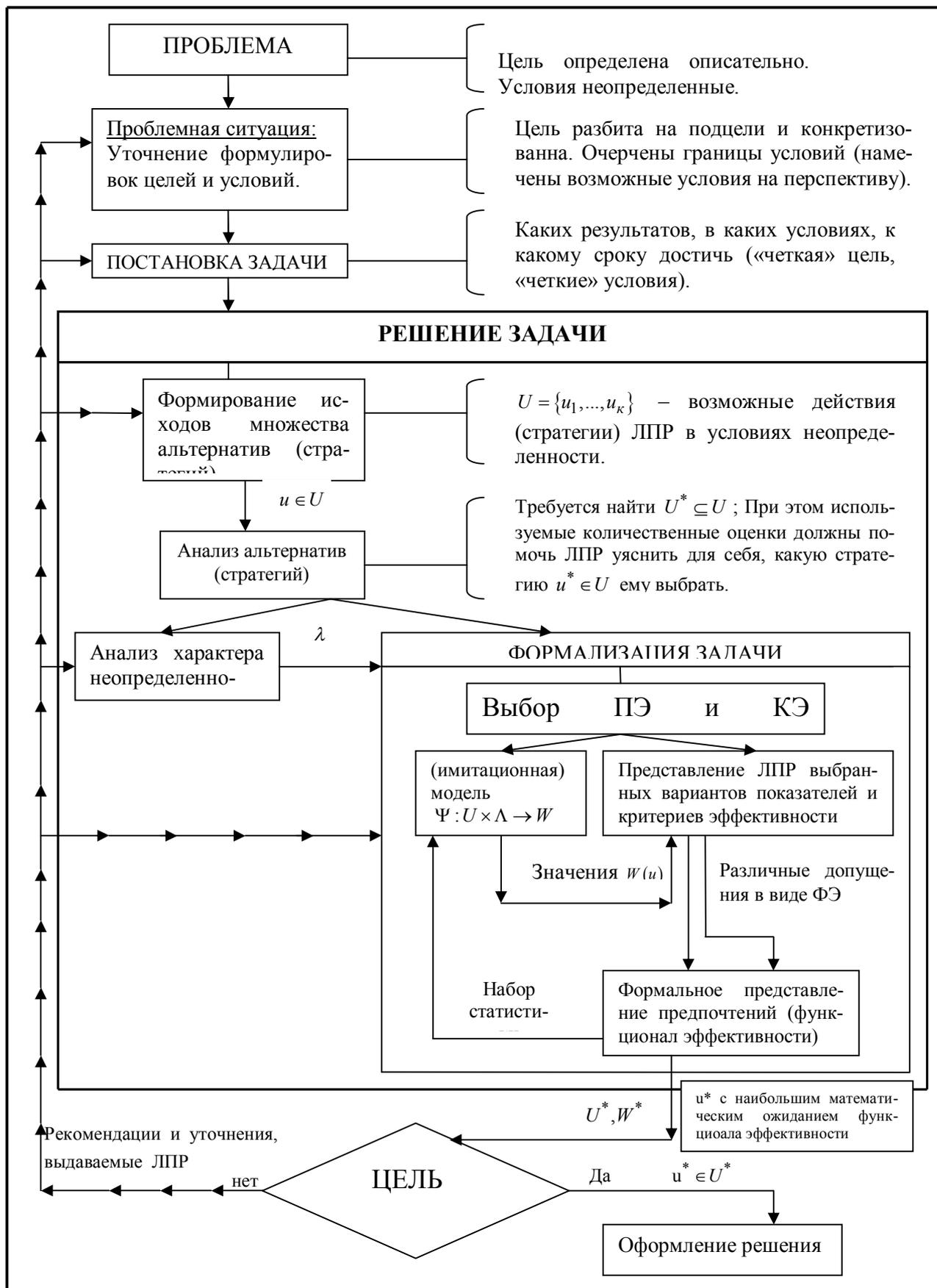


Рис.5

$g \in G$  возможно только с помощью моделей, в первую очередь математических. Поэтому математическое моделирование – один из краеугольных камней теории системного анализа. Общая модель системного анализа приведена на рис. 5. Одной из основных является модель проблемной ситуации. Математические методы обоснования решений составляют существо исследования операций. Исследование операций начинается тогда, когда для обоснования решений применяется тот или другой математический аппарат [3].

## 6. МОДЕЛЬ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

Обозначим:

$U$  – множество стратегий ЛПР;

$\Lambda$  – множество значений факторов (определённых и неопределённых –  $\Omega$ ,  $\Omega \subset \Lambda$ );

$G$  – множество исходов операций;

$Y$  – вектор существенных характеристик исхода  $g \in G$ , т.е. числовое выражение результата операции. Выделяют реальный результат операции (фактический или ожидаемый) – характеризует свойства, важные с точки зрения достижения ЛПР поставленной цели;

$H$  – модель, т.е. отображение  $H: U \times \Lambda \rightarrow Y$ ;

$W$  – показатель эффективности;

$\Psi$  – оператор соответствия «результат – показатель»  
 $\Psi: Y \rightarrow W$ ;

$K$  – критерий эффективности;

$P$  – модель предпочтений ЛПР на элементах множества  $\{U, \Lambda, G, Y, W, K\}$ ;

$Q$  – остальная информация о проблемной ситуации.

Тогда моделью проблемной ситуации будет совокупность

$$\langle U, \Lambda, H, G, Y, \Psi, W, K, P, Q \rangle. \quad (7)$$

$G$  – это некоторое обобщенное представление ЛПР о завершении, итоге операции, например, ликвидация последствий ЧС, наводнения и т.п.  $G$  может описываться бесчисленным множе-

ством различных характеристик. ЛПР, планируя операцию, выделяет из этого множества лишь существенные, важные с точки зрения  $A_0$  характеристики; приписывает им числовые значения и по ним оценивает конечный итог – результат операций, т.е.  $Y$  – модель  $G$ .

Показатель эффективности  $W$  (в общем случае векторный) является общим для всех допустимых стратегий и характеризует эффективность стратегий таким образом, что ЛПР стремится получить по нему наиболее предпочтительные оценки. Считается, что каждая стратегия полностью характеризуется соответствующей векторной оценкой, т. е. вектором

$$W(u) = \{W_1(u), W_2(u), \dots, W_m(u)\}.$$

Поэтому выбор наилучшей стратегии из множества  $U$  допустимых стратегий сводится к выбору наиболее предпочтительной с точки зрения ЛПР оценки из множества достижимых стратегий.

Система предпочтений ЛПР – это совокупность обычно не структурированных (тем более не формализованных) его представлений, связанных с достоинствами и недостатками сравниваемых элементов некоторого множества выбора.  $P$  – система правил, отражающих представление ЛПР о «лучшем» и «худшем» среди элементов некоторого множества. Предпочтения ЛПР составляют основу для построения модели предпочтений  $P$ . С помощью этой модели решают важные частные задачи:

- формирование множества  $U$  допустимых стратегий;
- выделение подмножества  $\bar{A} \subset A$  существенных факторов, определяющих условия проведения операции;
- построение отображений  $H$  и  $\Psi$ ;
- формирование показателя эффективности  $W$ ;
- построение критерия эффективности  $K$ .

Выявление предпочтений ЛПР – это наиболее сложная и ответственная процедура принятия решения, так как от этого зависит и успех решения задачи выбора, и конечный результат операции.

**Критерий эффективности  $K$**  представляет собой аналитическое выражение, алгоритм или словесную формулировку, которые позволяют задать на множестве векторных оценок  $W(u)$ ,

$u \in U$  отношения предпочтения, с использованием которых можно затем перейти к высказыванию суждений о предпочтениях на множестве допустимых стратегий  $U$ . И в конечном итоге – к упорядочению всех допустимых стратегий по предпочтению.

$Q$  – это информация о ситуации принятия решения, в частности:

$Q_{A_0}$  – информация о цели операции  $A_0$ ;

$Q_v$  – факторов  $\vec{\mathcal{F}}$ , определяющих условия проведения операции;

$Q_U$  – возможных стратегий ЛПР –  $U$ ;

$Q_I$  – средств построения модели.

Модель проблемной ситуации используется для выделения наилучшей стратегии  $u^* \in U$  или для сужения множества  $U$ , чтобы ЛПР на основе  $P$  и  $Q$  было проще произвести окончательный выбор.

## 7. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ

Деятельность системы осуществляется под влиянием большого числа различных факторов.

Под **фактором** понимают движущую силу какого-либо процесса (явления) и влияющие на него условия. Всё их многообразие можно разделить на три группы:

1-я группа: факторы, определяющие качество системы;

2-я группа: условия обстановки, в которой реализуется операция;

3-я группа: способы использования ресурса в операции (стратегии).

Как уже отмечалось, способы использования ресурса определяют распределение их между элементами (или на элементы) системы, например, на безопасность функционирования и выполнение функциональных задач, во времени и на отдельные задачи (элементы операции) – это и определяет содержание стратегии. **Стратегия** – управляемый фактор. Сюда относят план дей-

ствий, организацию снабжения и связи, программу разработки и создания системы, технологию эксплуатации системы, план ликвидации последствий чрезвычайного происшествия и др.

К группе факторов, составляющих **условия выполнения операции** или обстановку, относят физико-географические и погодно-климатические условия, природные, инфраструктуру и т.п.

Под **качеством системы** понимают совокупность её положительных (с точки зрения достижения цели) свойств.

В свою очередь **свойство** выражает такую сторону объекта, которая обуславливает его различие или общность с другими объектами и обнаруживается в его отношениях к ним. Внешнее проявление свойства – **устойчивый признак**, который можно измерить. Свойство объекта, процесса, системы может обладать определённой интенсивностью своего проявления и соответственно размерностью. Характеристику интенсивности проявления свойства называют **показателем**.

По наличию интенсивности и размерности различают свойства точечные (нулевого измерения), линейные (одномерные) и векторные (многомерные).

**Точечное свойство** не имеет интенсивности, т.е. объект либо обладает этим свойством, либо нет. Например, план операции может быть либо оптимальным, либо нет. Других признаков здесь не может быть. Свойство «быть оптимальным» является точечным. Точечное свойство обычно выражают бинарным (двухзначным) признаком:

да (либо 1) – объект обладает свойством;

нет (либо 0) – объект не обладает свойством.

**Линейное свойство** измеряется в единой шкале. Например, линейным свойством случайного события является возможность его наступления, которая измеряется вероятностью наступления этого случайного события. Интенсивность линейного свойства изменяется в сторону уменьшения или увеличения признака, характеризующего это свойство.

**Векторное свойство** имеет несколько измерений и характеризуется рядом устойчивых признаков, каждый из которых измеряется в соответствующей шкале.

Количественные характеристики различных свойств называют **параметрами**. Иногда параметрами называют неизменные значения показателей. Совокупность значений параметров системы определяет её **состояние**. А последовательность изменений параметров системы во времени образует **траекторию движения системы** или функционирование системы.

Все факторы, их свойства, показатели и параметры должны быть измерены. Всякое измерение проводится в той или иной шкале. Шкалы имеют различную степень совершенства. Степень совершенства шкалы характеризуется числом допустимых её преобразований. На рис. 6 приведена классификация шкал измерений.

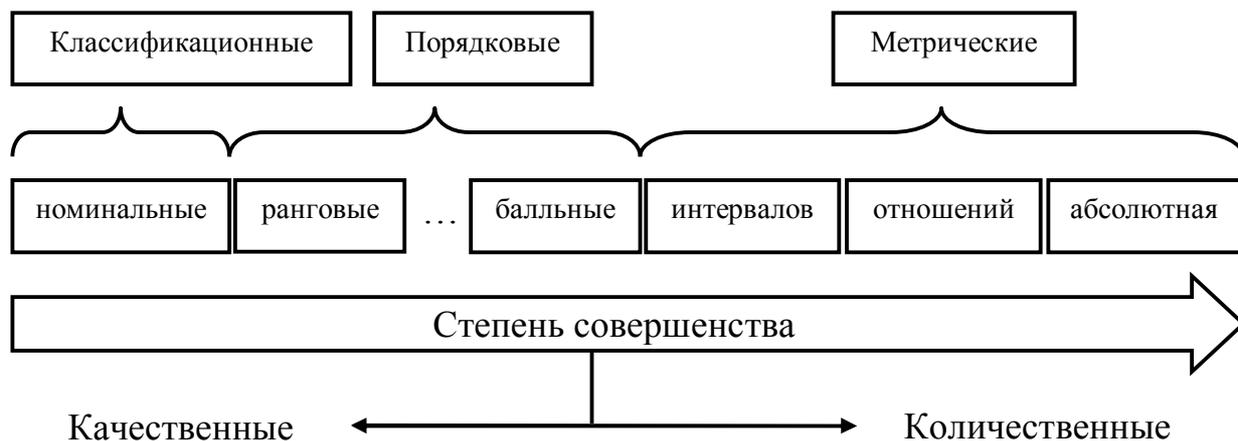


Рис. 6

Наиболее совершенной признаётся **абсолютная** шкала, которая не допускает никаких преобразований, кроме тождественного. В этой шкале фиксируются и не подлежат изменению начало отсчёта и масштаб. Например, в абсолютной шкале измеряют вероятность случайного события, количество каких-либо предметов (в штуках); абсолютной шкалой является термодинамическая температурная шкала по Кельвину.

Следующая, менее совершенная, – **шкала отношений**, которая отражает прямую пропорциональную зависимость между измеряемыми в разных шкалах значениями одного и того же признака. Единица масштаба в преобразованиях может изменяться, а

начало отсчёта фиксировано. В этой шкале измеряется масса, скорость перемещения и т.п.

Третья шкала – **шкала интервалов**, допускающая любые линейные преобразования. Здесь допускается изменение как масштаба шкалы, так и начала отсчёта. Основное условие – сохранение отношений между интервалами в разных шкалах. В этой шкале измеряют продолжительность выполнения работ, сроки их завершения, стоимость товаров и услуг, величин приращений каких-либо показателей.

Все эти шкалы являются **метрическими**, а признаки, измеряемые в этих шкалах, – **количественными**, т.е. между значениями признаков, измеренных в этих шкалах, можно установить соотношения  $>$ ,  $<$ , и ответить на вопрос: «Насколько или во сколько?».

Следующие по степени совершенства – **порядковые** шкалы – балльная или ранговая. В **балльных** шкалах измеряют качественные проявления признака, где его значения носят условный характер. Например, в системе образования знания оценивают в баллах, причём в различных странах эти системы баллов различны. В баллах измеряют волнения моря, землетрясения и т.п. Измеренные в балльной шкале признаки можно также выстроить в ряд по возрастанию или убыванию, но нельзя определить, насколько или во сколько.

**Ранговые шкалы** предполагают присвоение соответствующим значениям признака некоторого ранга, что и позволяет выстроить объекты с этими признаками в ряд убывания или возрастания. Это своего рода операция ранжирования. Так классифицируют, например, степень разрушения зданий, попавших в зону разрушения от взрыва, или степень поражения человека пламенем: слабая, средняя, высокая, которые можно заменить соответственно 1-я, 2-я, 3-я.

Класс допустимых преобразований для порядковых шкал содержит все монотонно возрастающие функции.

Наименее совершенной является классификационная (номинальная) шкала. Измеренное значение признака в этой шкале позволяет только отнести данный объект к тому или иному классу, но нельзя соотнести два объекта по этому признаку, т.е. ска-

зять, какой объект лучше или хуже, или у какого объекта данного признака больше, а у какого меньше.

Класс допустимых преобразований для номинальных шкал охватывает всевозможные взаимно—однозначные функции.

В теории принятия решений, теории моделирования, математической статистике классификационные шкалы получили широкое применение. Так, задача оценки эффективности операции фактически сводится к измерению эффективности в классификационной шкале. Само слово «оценка» означает здесь классификацию, т.е. принятие решения: цель достигнута или нет. При проверке статистических гипотез оценка также сводится к выбору одной из двух альтернативных гипотез, т.е. решается задача классификации.

Значения признаков могут измеряться либо числовыми, либо нечисловыми переменными. **Числовые переменные** измеряют с помощью шкал, представляющих собой набор чисел. **Нечисловые переменные** задаются набором каких-либо характеристик уровней переменных, не выражаемых числом. Будем исходить из того, что количественные факторы измеряются в числовых шкалах и выполнение алгебраических операций с соответствующими показателями имеет смысл, в то время как качественные факторы, измеренные в балльных и ранговых шкалах, не имеют смысла в арифметических операциях.

Определение значения признака в процессе эксперимента называют измерением.

По отношению к исследуемой системе **факторы могут быть внутренними и внешними.**

**Внешние факторы** отражают влияние внешней среды (эндогенные). Эти факторы могут быть как положительные (способствующие выполнению операции), так и противодействующие выполнению операции.

**Внутренние факторы** (экзогенные) характеризуют процессы, происходящие внутри системы и закономерности, определяющие эти процессы.

С точки зрения информированности исследователя о факторах их делят на определённые и неопределённые. Соответствующе-

щим образом делят и переменные, характеризующие признаки факторов.

К **определённым факторам** относят переменные, значения которых известны исследователю достоверно. Это контролируемые факторы (входные воздействия), управляемые переменные (стратегии), различного рода параметры и т.п.

К **неопределённым факторам** относят переменные, о значениях которых в реальном процессе исследователь до эксперимента либо полностью не имеет информации, либо частично. Природа неопределённости бывает двух типов: стохастическая и нестохастическая.

**Стохастическая неопределённость** – это объективное свойство явлений, которое не зависит от субъекта, а определяется законами, присущими этому явлению. Исследователю может быть известно или неизвестно распределение случайной переменной или её параметры, которые могут быть определены в результате эксперимента. Однако знание распределения не исключает неопределённости в получении конкретного результата в эксперименте, она объективно не снимается.

**Нестохастическая неопределённость** полностью зависит от информированности исследователя. Объём информации об исследуемом объекте определяет область возможных значений наблюдаемой переменной: от полного незнания – область значений, например, вся числовая ось для скалярной переменной, до определённого значения – точки на числовой оси. Это обстоятельство и определяет необходимость ведения разведки, например, в окружающей среде для повышения определённости представления о ней и соответственно повышения адекватности управления исследуемой системой.

Различают три группы причин формирования неопределённости нестохастического характера: целевая, поведенческая и природная.

**Целевая неопределённость** связана с неоднозначностью целей системы. Например, при создании системы перед исследователями стоит задача добиться максимального эффекта от создаваемой системы, но при этом процесс её функционирования должен быть безопасен. При ограниченных ресурсах эти требо-

вания вступают в противоречие и ЛПР должен искать компромисс между этими противоречивыми требованиями. Аналогичная ситуация возникает при разработке технологии эксплуатации системы. Например, при выборе периодичности проведения осмотра системы и профилактики: уменьшая периодичность проведения осмотров и профилактик, мы уменьшаем возможность возникновения в системе отказов, но увеличивается время простоя системы на осмотры и соответственно уменьшается её полезный эффект, а увеличение периодичности проведения осмотров ведёт к повышению возможности возникновения отказов и соответственно к увеличению времени простоя на поиск и устранение неисправностей. Это задача теории исследования операций, которая хотя и не может дать однозначного ответа в этой ситуации, но она может помочь принять решение и сделать правильный выбор.

**Поведенческая неопределённость** возникает в случае, когда на исследуемый процесс влияет несколько субъектов (много операционных сторон), причём каждый из субъектов стремится достичь своей цели. Эти цели могут быть различной степени согласованности: от полного совпадения до строгого противоречия (противоположные). Такая неопределённость характерна для систем жизнедеятельности города, региона, где сталкиваются интересы различных хозяйствующих субъектов; для экономических систем в условиях свободного рынка т.п.

**Природная неопределённость** обусловлена недостаточной изученностью некоторых природных явлений, как определяющих текущее состояние природы, так и тех глобальных процессов на планете Земля, которые будут определять ситуацию в будущем. Поэтому качество принимаемых решений будет функцией от предполагаемых природных условий на момент реализации решения.

Один из наиболее пессимистических подходов к разрешению неопределённости – принятие предположения о самом неблагоприятном значении неопределённого признака. Такой подход гарантирует получение минимального возможного результата в этой операции, независимо от реального значения неопределённости, а при значениях неопределённого признака, менее

жестких, при осуществлении операции может быть получен и больший эффект. Это обусловило возможность принятия решения на проведение операции с ориентацией не на самые худшие условия. Такое решение нацелено на получение более высокого результата, но если реальные условия окажутся хуже предполагаемых, то и результат операции будет существенно отличаться от ожидаемого – в этом и состоит сущность риска принятия решения в условиях неопределённости.

Заключительной группой факторов, определяющих выполнение операции, являются **результатирующие** (выходные), которые измеряют результат выполнения операции. **Результатирующие** факторы включают полезный эффект –  $g$ , ресурсы –  $C$ , затраченные на выполнение операции, и время выполнения операции –  $T$ , т.е. результат операции  $Y$  можно представить вектором

$$y = \|g, C, T\| \quad (8)$$

или некоторой функцией от стратегии  $u \in U$

$$y(u) = \varphi[g(u), c(u), T(u)]. \quad (9)$$

Если исследуемая система функционирует в условиях воздействия случайных факторов  $\omega \in \Omega$ , то и результат будет функцией случайного аргумента

$$y(u) = \varphi[g(u), c(u), T(u), \omega \in \Omega]. \quad (10)$$

## 8. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность выполнения операции есть степень соответствия результата выполнения операции, полученного или предполагаемого, требуемой (целью). Таким образом, эффективность – основное (определяющее) свойство качества выполнения операции и зависит от факторов, её определяющих. Любое свойство может быть измерено соответствующим показателем.

**Показателем эффективности** выполнения операции называют меру интенсивности проявления этого основного свойства.

Показатели могут быть как количественные, так и качественные. Количественные показатели измеряются в метрических шкалах, а качественные – в порядковых или номинальных. Обычно показатели представляют собой переменную (количественную или качественную), имеющую размерность (скаляр или вектор). При выборе показателя эффективности стремятся к тому, чтобы он удовлетворял некоторым требованиям: имел бы ясный содержательный и физический смысл, был бы чувствителен к условиям и факторам, в том числе и управляющим, которые определяют выполнение исследуемой операции. Но прежде всего показатель эффективности должен соответствовать цели операции.

**Цель**, как правило, на этапе формализации переводят из вербального, содержательного описания в количественное значение некоторого результирующего параметра. При этом и реальный результат операции, и её цель должны быть измерены в одной шкале. Это достигается, если цель выражают как требуемое значение результата выполнения операции  $Y_{mp}$ . В общем случае для количественного описания соответствия результата  $Y(u)$  выполнения операции требуемому –  $Y_{mp}$  формально вводят числовую функцию на множестве допустимых стратегий

$$\rho = \rho(Y(u), Y_{mp}), \quad u \in U \quad (11)$$

которую называют **функцией соответствия**.

Конкретный вид этой функции зависит от цели операции, задачи исследования и других условий. Как уже отмечалось,  $Y(u)$  может быть случайной переменной (числовой или нечисловой), следовательно, и функция соответствия будет случайной, как функция случайного аргумента. Тогда в качестве показателя эффективности можно принять математическое ожидание этой функции

$$W(u) = M[\hat{\rho}(y(u), y_{mp})], \quad (12)$$

где  $\hat{\rho}(\cdot)$  – случайная величина.

Используя интеграл Лебега – Стильтьесса (12) можно записать в следующем виде

$$W(u) = \int_E \hat{\rho}(y(u), y_{mp}) dF_u(\hat{\rho}), \quad (13)$$

где  $F_u(\hat{\rho})$  – функция распределения случайной величины  $\hat{\rho}$ , как функция стратегии  $u \in U$ :  $E$  – пространство элементарных событий переменной  $\hat{\rho}$ .

Если  $\rho(\cdot)$  – неслучайная переменная, то (12) будет

$$W(u) = \rho(y(u), y_{mp}), \quad (14)$$

т.е. в этом случае показателем эффективности является сама функция соответствия. Множество возможных значений показателя  $W$  называют шкалой показателя.

В ряде случаев эффективность проявляет себя как **многомерное свойство** и не выражается скалярным показателем. В этом случае вводится векторный показатель эффективности, который составляется из частных показателей эффективности и записывается вектор-строкой

$$W(u) = \|W_1(u), W_2(u), \dots, W_i(u), \dots, W_k(u)\|. \quad (15)$$

Векторный показатель вводится в том случае, когда единая цель операции достигается выполнением нескольких задач, каждая из которых оценивается соответствующим показателем  $W_i(u)$ , ( $i=1, 2, \dots, k$ ) и выразить их в едином показателе не представляется возможным. Эти частные задачи могут решаться отдельными подсистемами общей системы  $S_0$ , тогда  $W_i(u)$  – это показатель эффективности частной операции, выполняемой  $i$ -й подсистемой, либо эту задачу решает одна система, но последовательно, и тогда  $W_i(u)$  – показатель эффективности выполнения задачи на  $i$ -м этапе операции:

В зависимости от конкретной формализации цели выражение показателя эффективности (12) также будет конкретизироваться.

1. Пусть цель операции описывается случайным событием  $A$ , вероятность наступления которого  $P_u(A)$  зависит от стратегии  $u \in U$ . Функция соответствия в этом случае может быть представлена как бернуллева переменная

$$\rho(y(u), y_{mp}) = \begin{cases} 1, & \text{если } A \\ 0, & \text{если } \bar{A} \end{cases} \quad (16)$$

В этом случае  $y_{mp}$  будет определяться наступлением события  $A$ , а показатель эффективности для (16) в соответствии с (12) будет равен

$$W(u) = M[\rho(y(u), y_{mp})] = 1 \cdot P_u(A) + 0 \cdot (1 - P_u(A)) = P_u(A), \quad (17)$$

т.е. показатель эффективности в форме (12) будет равен вероятности наступления события  $A$

$$W(u) = P_u(A). \quad (18)$$

2. Рассмотрим ситуацию, когда цель задана в виде некоторого числа –  $y_{mp}$ . Это может быть некоторое нормативное значение результата выполнения операции. Тогда цель будет считаться достигнутой, если

$$Y(u) \geq y_{mp}. \quad (19)$$

Предполагая, что  $Y(u)$  случайная величина, условие (19) будет случайным событием

$$A = \{Y(u) \geq y_{mp}\}. \quad (20)$$

Тогда согласно (18)

$$W(u) = P_u(A) = P_u(Y(u) \geq y_{mp}) = 1 - F_u(y_{mp}) = \alpha, \quad (21)$$

где  $F_u(y)$  – функция распределения результата выполнения операции (рис. 7).

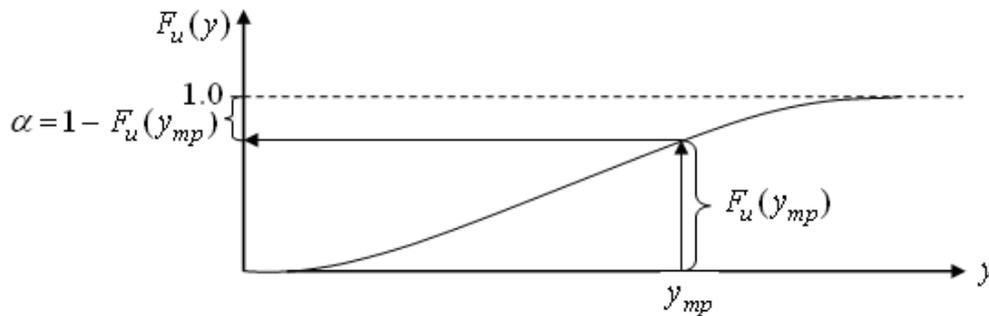


Рис. 7

Этот показатель называют **вероятностной гарантией** (степень гарантии) выполнения задачи. Если  $y_{mp}$  устанавливает верхний предел результата выполнения операции, т.е

$$Y(u) < y_{mp}, \quad (22)$$

то

$$W(u) = F_u(y_{mp}). \quad (23)$$

Условие (22) может, например, характеризовать требования к системе обеспечения безопасности на предприятии, где  $y_{mp}$  – допустимый ущерб.

Нормативные требования могут быть заданы и в виде двухсторонних ограничений

$$y_n \leq Y(u) < y_v. \quad (24)$$

Тогда согласно свойству функции распределения

$$W(u) = P(y_n \leq Y(u) < y_v) = F_u(y_v) - F_u(y_n). \quad (25)$$

3. При исследовании эффективности функционирования систем обеспечения безопасности широко используются такие её результаты, как полученный (предотвращённый) ущерб, время ликвидации чрезвычайного происшествия и т.п. Учитывая, что эти переменные, как правило, являются случайными, их оценивают по среднему –  $M[Y(u)]$ , т.е. в качестве показателя эффективности операции может приниматься **показатель среднего результата**

$$W(u) = M[Y(u)], \quad (26)$$

где

$$\rho(Y(u), y_{mp}) = Y(u). \quad (27)$$

Особую роль играет этот показатель для случая (5), так как тогда можно построить обобщенный показатель

$$W(u) = M\left[\sum_{i=1}^n Y_i(u)\right] = \sum_{i=1}^n M[Y_i(u)], \quad (28)$$

в силу свойств аддитивности математического ожидания.

4. В практике бывают ситуации, когда требования предъявляются не к результату выполнения операции, а к уровню вероятности его достижения, т.е. к  $\alpha - \alpha_{mp}$ . Тогда согласно (21)

$$\alpha_{mp} = 1 - F_u(y_{mp})$$

преобразуем к виду

$$F_u(y_{mp}) = 1 - \alpha_{mp}.$$

Откуда получаем

$$y_{mp}^\alpha = F_u^{-1}(1 - \alpha_{mp}). \quad (29)$$

Это будет **вероятностно-гарантированный результат** (рис. 8)

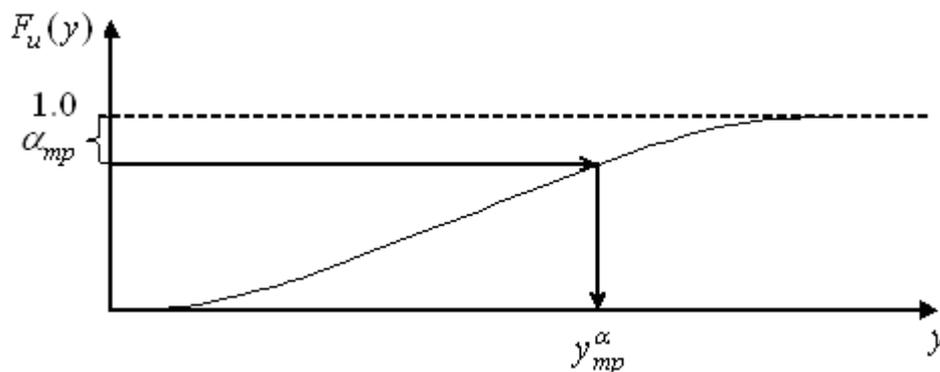


Рис. 8

В этом случае функция соответствия будет

$$\rho = F_u^{-1}(1 - \alpha).$$

Следовательно, (29)

$$W(u) = M[\rho] = M[F_u^{-1}(1 - \alpha_{mp})] = y_{mp}^\alpha, \quad (30)$$

а  $\alpha_{mp}$  называют «степень гарантии».

5. Бывают ситуации, когда исследователю приходится принимать решение по неполной информации о состоянии исследуемой системы, которая может находиться в одном из нескольких возможных. Ошибки в определении реального состояния сопряжены с некоторыми потерями (с риском). Это, например, задача распознавания образов, ситуаций, объектов и т.п., решаемая методами теории статистических решений. В этом случае в качестве функции соответствия принимают функцию потерь  $\Pi_{ij}$ , которые возникают при отнесении объекта, принадлежащего множеству  $\theta_i$  ошибочно (при  $i \neq j$ ), к множеству  $\theta_j$

$$\rho(Y(u), y_{mp}) = \Pi_{ij}. \quad (31)$$

Тогда показатель эффективности операции по распознаванию образа записывается в виде **средних потерь (байесовский средний риск)**

$$W(u) = M[\rho] = \sum_i \sum_j \Pi_{ij} P(\theta_i) P\left(\frac{\theta_j}{\theta_i}\right), \quad (32)$$

где  $P(\theta_i)$  – вероятность того, что объект принадлежит множеству  $\theta_i$ ;  $P\left(\frac{\theta_j}{\theta_i}\right)$  – условная вероятность того, что объект, принадлежащий множеству  $\theta_i$ , отнесён к  $\theta_j$ . Из (32) видно, что и здесь условие (12) выполнено.

6. Рассмотрим ситуацию, когда на ход выполнения операции оказывают влияние два управляющих центра, т.е. ЛПР<sub>А</sub> и ЛПР<sub>В</sub>. При этом ЛПР<sub>А</sub> располагает стратегиями  $u \in U$ , ЛПР<sub>В</sub> –  $v \in V$ , т.е.  $Y(u, v)$  зависит от  $u \in U$  и  $v \in V$ . Функция соответствия в этом случае сохраняет исходное значение

$$\rho = \rho(Y(u, v), y_{mp}), \quad (33)$$

где  $y_{mp}$  – цель операции.

В данном случае функция соответствия находится под воздействием не только случайных факторов, но и неопределённых – поведенческого характера. Разрешение этих неопределённостей осуществляется по двум направлениям: стохастическая – как ранее (12)

$$W(u, v) = M[\rho(Y(u, v), y_{mp})], \quad (34)$$

а в отношении действий ЛПР<sub>В</sub> выдвигают гипотезу о том, что оно, например, выбирает свои стратегии  $v \in V$  таким образом, чтобы минимизировать этот (34) показатель

$$W_A^*(u) = \min_{v \in V} M[\rho(Y(u, v), y_{mp})]. \quad (35)$$

Смысл этого показателя заключается в том, что он определяет нижнюю границу среднего значения показателя  $W(u, v)$  и таким образом ЛПР<sub>А</sub> гарантировано значение показателя  $W_A^*(u)$ , ниже значения которого он не получит при любой стратегии ЛПР<sub>В</sub> –  $v \in V$ , т.е.

$$W_A(u) \geq W_A^*(u).$$

Следовательно, показатель эффективности – это некоторая числовая функция, ставящая в соответствие каждой стратегии  $u \in U$  число  $W(u)$ , называемое оценкой стратегии  $u \in U$  по показателю  $W$ .

В заключение отметим: показатель эффективности  $W(u)$  зависит от  $u \in U$  и определён на множестве допустимых стратегий  $U$ . И эту зависимость можно представить некоторым отображением

$$\eta: U \rightarrow W. \quad (36)$$

Обычно отображение  $\eta$  задаётся в виде математической модели операции.

## 9. ПРИНЦИПЫ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ

Операцию, реализуемую системой, рассматривают как целесообразное поведение системы. Процесс формирования рационального поведения системы называют **управлением**. Чем сложнее система, тем разнообразнее формы ее поведения и соответственно больше способов управления ею. Это свойство необходимо учитывать и при построении модели. Особенности поведения систем определяются принципами усложняющегося поведения, которые раскрывают его базовые положения. Рассмотрим основные принципы, характеризующие поведение систем по мере их усложнения.

1. **Принцип вещественно-энергетического баланса.** Этот принцип лежит в основе поведения всех материальных систем – от простейших до самых сложных – и предполагает, что поведение системы в любых условиях не приводит к нарушению законов сохранения вещества, энергии. Модели систем такого поведения представляют уравнения вещественно-энергетического баланса. Для **простейших** систем этот принцип является основным, определяющим их поведение. Эти системы называют **е-системами** (в переводе с англ. easy – простой). Функция управления в простейших системах отсутствует.

2. **Принцип гомеостазиса.** Этот принцип предполагает наличие у системы способности возвращаться в состояние устойчивого равновесия, если она была выведена из него внешним воздействием, что обеспечивается наличием в звене управления отрицательной обратной связи. Такой принцип характерен для систем регулирования, в том числе и автоматического. Системы, поведение которых основывается на принципе гомеостазиса, соответственно называют **гомеостатическими**, или **h-системами** (homeostasis). Управление в таких системах сводится к функции регулирования. В качестве моделей исследования h-систем используют, как правило, дифференциальные уравнения. Этот принцип в планировании называют планирование по обязательствам.

3. **Принцип выбора решений.** Сложные системы способны организовать свое поведение на основе рационального выбора альтернатив из некоторого неединичного их множества, т.е. на основе выбора решений. Ведущим этот принцип становится для систем, реализующих индуктивное поведение, т.е. основанное на непосредственном опыте, наблюдении ситуации и принятии решений в зависимости от сложившейся ситуации без предвидения дальнейшего развития событий. Такие системы называют **решающими** (без предвидения), или **с-системами** (choosing – осуществляющая выбор). В качестве моделей применяют стохастические модели проверки статистических гипотез и статистических решений и модели выбора решений в условиях стохастической неопределенности. В планировании этот принцип называют планирование по вариантам.

**4. Принцип перспективной активности.** Этот принцип характерен для систем, поведение которых носит эволюционный характер, т.е. будущее движение строится на тех же законах, что и в прошлом. Такие системы обладают достаточно ёмкой памятью, что позволяет анализировать развитие в прошлом и на его основе строить прогноз развития в будущем и планировать свое поведение, т.е. заблаговременно принимать решения, регламентирующие её поведение в будущем. Это **предвидящие** системы, или **р-системы** (prescient – предвидящая). Для описания таких систем используют методы имитационного моделирования и планирования машинного эксперимента. В планировании этот принцип называют планирование по реагированию.

**5. Принцип рефлексии.** Этот принцип присущ системам, поведение которых определяется интеллектуальной деятельностью ЛПР.

Под **рефлексией** понимают отражение мыслительного процесса другого лица. Такое поведение может строить система, функционирование которой зависит и от поведения другой системы (решений другого ЛПР). В этом случае система организует свое поведение с учетом возможного мысленного представления о ее действиях ЛПР другой системы, с которой данная система находится в определенных отношениях.

Рассмотрим две противоборствующие системы  $S_A$  и  $S_B$ . Тогда, например, ЛПР<sub>A</sub> может продемонстрировать некоторые свои действия, раскрывающие ЛПР<sub>B</sub> его намерения и стимулирующие ЛПР<sub>B</sub> принять решение, выгодное для ЛПР<sub>A</sub>. Если ЛПР<sub>B</sub> такое решение примет, то это значит, что ЛПР<sub>A</sub> осуществляет рефлексивное принуждающее управление ЛПР<sub>B</sub>, навязывая ему свою волю. В этом случае ЛПР<sub>A</sub> находится в первом ранге рефлексии, а ЛПР<sub>B</sub> – в нулевом (он не анализирует мыслительный процесс ЛПР<sub>A</sub>). Однако и ЛПР<sub>B</sub> может анализировать ход мыслей ЛПР<sub>A</sub>, тогда он тоже будет находиться на первом ранге рефлексии, что затруднит рефлексивное управление для ЛПР<sub>A</sub>. Но ЛПР<sub>A</sub> может подняться на второй ранг рефлексии, анализируя ход мыслей ЛПР<sub>B</sub> о своем мыслительном процессе, и т.д.

Для реализации такого принципа поведения ЛПР должен обладать высоким уровнем интеллекта. Системы, реализующие

Этот принцип поведения, относят к классу весьма сложных и называют **рефлексивными**, или **а-системами** (асипен – проницательная). Моделирование поведения **а-систем** обычно проводят с использованием сложных игровых комплексов, организуя так называемые деловые игры.

Принципы поведения систем рассмотрены в порядке их усложнения. Каждая система строит свое поведение в соответствии с одним принципом, который для неё является определяющим, однако ей присущи и принципы поведения всех менее сложных систем. Так, например, для **с-систем** определяющим является принцип выбора решений, однако они обладают свойствами гомеостаза и вещественно-энергетического баланса, но не могут реализовать принцип перспективной активности.

Следовательно, здесь эти принципы находятся в отношении вложенности (рис. 9).

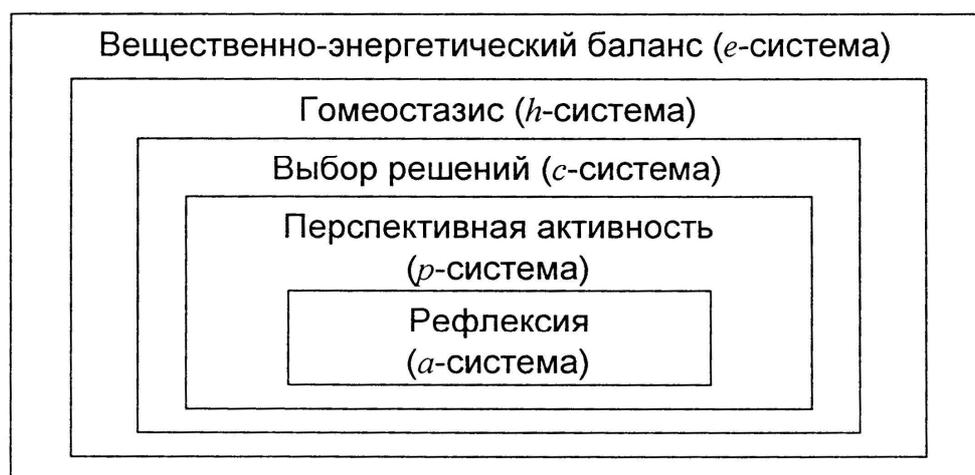


Рис. 9. Принципы усложняющегося поведения систем

При установлении рационального поведения системы следует установить её ведущий принцип, соответствующий уровню сложности системы. Затем необходимо выявить концепцию планирования, лежащую в основе организации рационального поведения системы, т.е. в основе управления системой.

## 10. КОНЦЕПЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ

Поведение системы, основанное на рациональном (целесообразном) выборе решения при организации целенаправленной деятельности (операции), называют **управляемым**. Рациональное поведение предполагает возможность построения некоторых формальных процедур управления поведением. В теории выработки решений рассматривают три концепции организации рационального поведения системы:

- 1) концепция пригодности;
- 2) концепция оптимизации;
- 3) концепция адаптивизации.

**Концепция пригодности** предполагает, что цель определена в виде некоторого требуемого уровня показателя эффективности  $W_{mp}$  (уровень пригодности). Тогда выбор стратегии осуществляется в соответствии с условием

$$U^n : W(U^n) \geq W_{mp}, U^n \subset U. \quad (37)$$

Множество  $U$  определяется различного рода ограничениями, которые накладываются как непосредственно на множество возможных стратегий, так и на показатель эффективности и параметры модели условиями решаемой задачи.

Условие (37) делит множество допустимых стратегий на два непересекающихся подмножества:  $U^n$  – подмножество приемлемых (пригодных) стратегий  $U^n \subset U$  и  $U^H$  – подмножество неприемлемых стратегий  $U^H \subset U$  ( $U^n \cup U^H = U$ ). Все стратегии  $U^n \subset U$  считаются равноценными в смысле достижения цели; их еще называют достигающими стратегиями в том смысле, что реализация любой из стратегий  $u^n \in U^n$  обеспечивает достижение поставленной цели. Таким образом, любая стратегия  $u^n \in U^n$  является решением задачи выбора согласно концепции пригодности.

Благодаря своей простоте эта концепция широко применяется на практике, особенно в условиях малой информированности об исследуемой системе либо в условиях ограниченного вре-

мени на решение задачи выбора. Эта концепция приводит к негибкой нецелеустремленной системе действий.

**Концепция оптимизации** рекомендует выбирать в некотором смысле самую лучшую стратегию поведения (способ использования ресурсов в операции) из множества допустимых  $U$ , т.е. ту стратегию, которой соответствует наибольшее (максимальное) значение определенной целевой функции. Обычно в качестве целевой функции при выборе стратегии поведения используют показатель эффективности  $W(u)$ . Тогда оптимальной стратегией  $u^* \in U$ , будет стратегия, удовлетворяющая условию:

$$u^* : \max_{u \in U} W(u). \quad (38)$$

Как и в предыдущем случае множество  $U$  формируется условиями задачи.

Важное условие применения рассматриваемых концепций – обязательное предположение, что каждой стратегии  $u \in U$  может быть поставлено в соответствие значение показателя эффективности, которое и позволяет сопоставить стратегии между собой. Это не обязательно может быть количественный показатель, он может быть и качественный. Однако он должен обеспечивать установление по крайней мере отношения предпочтения между стратегиями. Для этого вводят функцию предпочтения, которая устанавливает, что если  $W(u_1) > W(u_2)$ , то  $u_1 \succ u_2$  ( $u_1$  предпочтительнее  $u_2$ ), а если  $W(u_1) = W(u_2)$ , то  $u_1 \sim u_2$  (стратегии  $u_1$  и  $u_2$  эквивалентны).

Концепция оптимизации приводит к целеустремленной, но не гибкой системе действий, так как не учитывается вновь поступающая информация о текущих изменениях в системе и во внешней среде.

**Концепция адаптивизации** предполагает наличие в системе органа, способного воспринимать текущую информацию о ходе выполнения операции, распознавать тенденцию к снижению эффективности и оперативно реагировать на устранение этой

тенденции. Эта концепция приводит к целеустремленной и гибкой системе действий.

В общем случае адаптация – это процесс изменения (приспособления) параметров и структуры системы, а, возможно, и управляющих воздействий на основе текущей информации с целью достижения или сохранения определенного состояния системы при начальной неопределенности внешних условий и изменяющихся условиях функционирования.

Формально решение задачи выбора при данной концепции можно представить так: разделим всю информацию, на основании которой принимают решение, на априорную –  $I_a$  и текущую –  $I_\Theta$ , поступающую в процессе реализации решения. Исходное множество допустимых решений  $U_0$  выбирается на основании априорной информации –  $I_a, U_0(I_a)$ , но в процессе реализации операции поступает текущая информация, под воздействием которой  $U(I_a, I_\Theta)$  будет изменяться. В свою очередь ЛПР, получая текущую информацию о всех характеристиках операции, может изменять цель своего поведения, т.е. требуемый уровень эффективности тоже может изменяться,  $W_{mp}(I_\Theta)$ . Тогда задача выбора будет решаться исходя из условия

$$W(U^*, I_\Theta) \geq W_{mp}(U, I_\Theta), \text{ где } U^* \subset U(I_a, I_\Theta). \quad (39)$$

Такой подход позволяет на каждом шаге определять не одну-единственную стратегию, а некоторое множество  $U^*$ , удовлетворяющее условию (39) –  $U^* \subset U(I_a, I_\Theta)$ . Это в свою очередь обеспечивает свободу выбора решений на последующих этапах, т.е. выбрав на определенном этапе решение, в дальнейшем в зависимости от поступившей текущей информации  $I_\Theta$  его можно пересмотреть. Этим достигается гибкость в организации рационального поведения системы. Но подобный подход осуществим только для **а-систем**, способных к самоорганизации, т. е. обладающих **L-качеством**.

Концепция адаптивизации, самоорганизация (L-качество), принцип рефлексии – определяющие понятия современной методологии исследования эффективности организационно-технических (человеко-машинных) систем. Так, например, при

выработке плана действий на случай чрезвычайного происшествия рассматривают несколько сценариев развития такого происшествия и соответственно для каждого сценария заблаговременно разрабатывают план действий. Реализация того или иного плана определяется конкретно складывающейся ситуацией на объекте, т.е. текущей информацией.

В заключение отметим, что концепция оптимизации может привести к неточным решениям либо полностью к ошибочным, так как исходит из априорной информации, т.е. это решение адекватно до точности  $I_a$ . И если априорная информация неверна, то получаем красивое решение неверно поставленной задачи. К выбору концепции рационального поведения необходим творческий подход.

## 11. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Системный анализ, как было отмечено во введении, осуществляется в два этапа: **оценка эффективности проведения операции**, т.е. установление соответствия  $U \rightarrow W$ , и выбор из множества возможных альтернативных вариантов  $u \in U$  предпочтительного –  $u^* \in U$ , т.е. в некотором смысле наилучшего. Для дальнейшего решения поставленной задачи необходимо выработать правило, которое при наличии определенных (установленных заранее) признаков предписывало бы тот или иной способ действий: выбор рациональной стратегии. Такое правило принятия решений (решающее правило) называют критерием эффективности  $K$ .

**Критерий эффективности** – это правило, позволяющее сопоставлять стратегии, характеризующиеся различными признаками и показывающие степень достижения цели в операции; сравнивать их между собой и осуществлять направленный выбор наилучшей стратегии из множества допустимых.

Практически критерий эффективности определяет поведение ЛПР в ситуации выбора. В основу формирования критерия эффективности закладывается представление о рациональности поведения, отражающее те или иные черты интуитивного пони-

мания разумного, целесообразного, логичного, выгодного, справедливого, устойчивого и т.п. Наряду с этим критерии определяют правила рационального выбора или классификации. Поскольку выполнение операции определяется тремя факторами:  $g$  – полезный эффект (результат) операции,  $C$  – затраты ресурсов на выполнение операции и  $T$  – время выполнения операции, то к настоящему времени сформировалось три общих принципа поведенческого рационализма:

– **принцип наибольшего эффекта** – требует получить наибольший эффект в установленные сроки при ограниченных ресурсах;

– **принцип наименьших затрат** – предполагает своевременное получение требуемого уровня целевого эффекта при наименьшем расходе ресурсов на выполнение операции;

– **принцип своевременности (оперативности)** – требует своевременно (или в кратчайшие сроки) завершить операцию с приемлемым целевым эффектом и затратами ресурса не более допустимого.

Если же время также рассматривать как один из видов ресурса, то второй и третий принципы могут быть объединены.

Фактически здесь рассматриваются три результирующие компоненты, определяющие выполнение операции:  $g(u)$  – целевой эффект,  $C(u)$  – расходуемый ресурс и  $T(u)$  – сроки выполнения операции. Если два результирующих фактора зафиксировать, то третий будет целевой функцией в задаче рационального выбора (принятия решения). Эти результирующие факторы формируют результат операции (9). Общие принципы рационального поведения отражают естественное стремление ЛПР к экстремальному значению результата. Однако в реальных условиях это стремление в значительной мере ограничивается тем объёмом информации, которым он располагает при постановке задачи принятия решения. Ведь только на основании априорной и текущей информации формируется множество допустимых стратегий  $U$  и выбирается критерий эффективности  $K$ .

В зависимости от располагаемой информации, в рамках используемой концепции рационального поведения, принцип

наибольшей эффективности вводят как принцип оптимальности, а принцип приемлемой эффективности – как принцип пригодности. При наличии достаточного объема текущей информации о ходе выполнения операции может быть использован и принцип адаптации в рамках концепции адаптивизации.

**Критерий эффективности** выполнения операции объединяет в целое (решающее правило) показатель эффективности ( $W$ ) и принцип рационального поведения (выбора или классификации).

Показатель эффективности является мерой степени соответствия реального результата операции требуемому, содержит формальное описание операции как соотношение между результирующими факторами (9). Так, например, это может быть мультипликативно-степенная функция Кобба – Дугласа

$$Y(u) = a_0 g^{\alpha_1}(u) C^{\alpha_2}(u) T^{\alpha_3}(u), \quad (40)$$

где  $a_0, \alpha_i, i=1, 2, 3$  – соответствующие коэффициенты.

Однако чаще в практике задача выбора формируется как **задача математического программирования**: один из результирующих факторов принимается в качестве целевой функции, а на два других накладывается ограничение. Например,

$$u^* \in U : \underset{u \in U}{\text{ext}} \varphi(g(u)), \quad (41)$$

при  $\Psi(C(u), T(u)) \geq 0$ .

Показатель эффективности позволяет устанавливать признаки, на основании которых можно судить о состоянии внутренних и внешних факторов операции, их соотношений между собой, о тех или иных условиях, способствующих достижению цели или, наоборот, препятствующих достижению цели. По значениям этих признаков и формируется правило принятия решений, т.е. критерий эффективности.

При формировании показателя и критерия эффективности различают два вида признаков:

– **целевой, или результирующий признак**, который лежит в основе формируемого показателя эффективности. Так, например, если цель задана в виде нормирующего уровня  $y_{TP}$ , то функция соответствия будет реализовывать принцип достаточности

$$\rho = (Y(u) \geq y_{TP}). \quad (42)$$

Однако если  $Y(u)$  – случайная переменная, то в качестве показателя эффективности принимается вероятность выполнения этого условия, т.е.

$$W(u) = P(Y(u) \geq y_{TP}); \quad (43)$$

– **признак выбора или критериальный признак.** Этот признак обеспечивает формирование критерия эффективности, т.е. правила выбора. Например, здесь можно воспользоваться концепцией оптимальности. Тогда наилучшей будет та стратегия  $u^* \in U$ , для которой выполняется условие

$$u^* : W(u^*) = \max_{u \in U} P(Y(u) \geq y_{TP}). \quad (44)$$

Но здесь может быть применена и концепция пригодности. Для этого необходимо задать требуемый уровень показателя эффективности –  $P_D$ . Тогда наилучшей будет та стратегия  $u^* \in U$ , для которой выполняется условие

$$u^* : P_{u \in U} (Y(u) \geq y_{TP}) \geq P_D. \quad (45)$$

В этом случае мы получаем некоторое подмножество  $U_n \subset U$  множества допустимых стратегий, элементами которого являются стратегии, обеспечивающие значения вероятности выполнения целевой задачи на уровне, не ниже требуемого ( $y_{TP}$ ), с вероятностью, не ниже допустимой –  $P_D$ .

Оба рассмотренных критерия и оптимальности (44) и пригодности (45) используют нормативный подход, т.е. в обоих случаях установлен норматив выполнения целевой задачи –  $y_{TP}$ . Выбор того или иного критерия обычно определяется объёмом исходной информации об исследуемой операции и целями операции.

Критерий эффективности как формальное правило принятия решений выполняет две функции:

– прежде всего определяет множество допустимых стратегий  $U$ , т.е. формирует признаки, по которым можно судить о выполнении условий допустимости для сформированных стратегий (условие необходимости) и отсеять те из них, для которых эти условия не выполняются;

– устанавливает признаки выбора, характеризующие условия достаточности.

Критерии эффективности обычно классифицируют по видам используемой концепции поведения:

- критерий пригодности;
- критерий оптимальности;
- критерий адаптивности.

Свое название критерий получает от типа показателя эффективности.

### **КРИТЕРИИ ПРИГОДНОСТИ**

Формально критерий пригодности записывается так

$$K \xrightarrow{S} U^n = \{u^n : u^n \in U^n \wedge W(u^n) \geq W_D\}, \quad U^n \subset U. \quad (46)$$

Эта запись означает: критерий эффективности  $K$  (в условиях концепции пригодности) – это правило, предписывающее выбор  $K^S \longrightarrow U^n$  таких пригодных стратегий из множества допустимых  $u^n \in U$ , для которых значение показателя эффективности будет не ниже заданного нормативного уровня  $W_D$ . Символ  $\wedge$  означает логическую конъюнкцию, т.е. одновременное выполнение условий:  $u^n \in U^n$  (необходимость) и  $W(u^n) \geq W_D$  (достаточность).

В соответствии с типами показателей эффективности формируются критерии:

- приемлемого результата;
- приемлемого среднего результата;
- допустимой степени гарантии;
- приемлемого вероятностно-гарантийного результата.

**1. Критерий приемлемого результата** определяет правило выбора в условиях, когда неопределенные факторы не учитываются и результат операции – величина детерминированная –  $y(u)$ . В этом случае  $W(u) = y(u)$ , а критерий эффективности предписывает выбирать пригодную стратегию  $u^n \in U$  из условия  $y(u^n) \geq y_{TP}$ .

**2. Критерий приемлемого среднего результата** определяет правило выбора в условиях, когда  $\hat{Y}(u)$  – случайная величина. Тогда  $W(u) = M\left[\hat{Y}(u)\right]$ , а приемлемыми будут те стратегии  $u^n \in U$ , для которых выполняется условие

$$M\left[\hat{Y}(u^n)\right] \geq W_{TP}, \quad (47)$$

где  $W_{TP}$  – приемлемый уровень показателя эффективности.

**3. Критерий допустимой степени гарантии** определяет правило выбора приемлемой стратегии  $u^n \in U$  в условиях, когда результат случаен, а требуемый уровень  $y_{TP}$  задан. Тогда  $W(u) = P\left(\hat{Y}(u^n) \geq y_{TP}\right)$ , а приемлемыми будут те стратегии  $u^n \in U$ , которые обеспечивают выполнение условия

$$P\left(\hat{Y}(u^n) \geq y_{TP}\right) \geq P_{TP}, \quad (48)$$

где  $P_{TP}$  – приемлемый уровень вероятностной гарантии.

**4. Критерий приемлемого вероятностно-гарантийного результата** предписывает выбирать приемлемые стратегии из условия

$$Y(u^n) \geq y_\alpha, \quad (49)$$

где  $y_\alpha$  – квантиль уравнения (49), при  $P_{TP} = \alpha$  – заданная вероятность.

## **КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ**

Формально критерий оптимальности записывается так

$$K \xrightarrow{S} U^* = \left\{ u^* : u^* \in U \wedge W(u^*) = \max_{u \in U} W(u) \right\}. \quad (50)$$

Это правило выбора  $K \xrightarrow{S} U^*$  из множества допустимых стратегий  $U$  таких оптимальных стратегий  $u^*$ , при которых показатель эффективности  $W(u)$  достигает максимального значения. Здесь  $u^* \in U^*$  – подмножество оптимальных стратегий  $U^* \subset U$ .

Критерий оптимальности формируют на основе соответствующих принципов:

- наибольшего результата;
- наибольшего среднего результата;
- наибольшей вероятностной гарантии;
- наибольшего гарантированного результата;
- максимина;
- превосходства.

1. **Критерий наибольшего результата** предполагает результат операции детерминированным –  $y(u)$ , а оптимальную стратегию выбирают из условия

$$u^* : y(u^*) \geq y(u), u \in U, \quad (51)$$

или

$$u^* = \arg \max_{u \in U} y(u). \quad (52)$$

2. **Критерий наибольшего среднего результата** предполагает, что результат операции случаен –  $\hat{Y}(u)$ , тогда в качестве показателя эффективности может быть принято его математическое ожидание,  $W(u) = M \left[ \hat{Y}(u) \right]$ , а оптимальную стратегию следует выбирать из условия

$$u^* : M \left[ \hat{Y}(u^*) \right] \geq M \left[ \hat{Y}(u) \right], u \in U, \quad (53)$$

либо

$$u^* = \arg \max_{u \in U} M \left[ \hat{Y}(u) \right]. \quad (54)$$

3. **Критерий наибольшей вероятностной гарантии результата** применим, когда  $\hat{Y}(u)$  – случайная величина и определен требуемый уровень выполнения цели –  $y_{TP}$ . Тогда в качестве показателя эффективности применяется вероятность соответствующего условия

$$W(u) = P \left( \hat{Y}(u) \geq y_{TP} \right), \quad (55)$$

а оптимальную стратегию следует выбирать из условия

$$u^* = \arg \max_{u \in U} P \left( \hat{Y}(u) \geq y_{TP} \right). \quad (56)$$

4. **Критерий наибольшего гарантированного результата** применим, когда уровень выполнения задачи  $y_{TP}$  не определен в (55), а задан уровень надежности выполнения задачи – вероятность  $\alpha$ . Тогда из уравнения

$$P \left( \hat{Y}(u) \geq y_\alpha(u) \right) = \alpha$$

находим  $y_\alpha(u)$  – квантиль, а оптимальную стратегию определяем из условия

$$u^* : y_\alpha(u^*) \geq y_\alpha(u), \quad u \in U, \quad (57)$$

или

$$u^* = \arg \max_{u \in U} y_\alpha(u). \quad (58)$$

5. **Критерий максимина** применяют в условиях, когда результат операции зависит от действий двух ЛПР со своими стратегиями:  $u \in U - ЛПР_A$  и  $\vartheta \in V - ЛПР_B$ . В этом случае оптимальную стратегию для  $ЛПР_A$  следует выбирать из условия

$$u^* : W(u^*) = \max_{u \in U} \min_{\vartheta \in V} M \left[ \rho(\hat{Y}(u, \vartheta), y_{TP}) \right], \quad (59)$$

или

$$u^* = \arg \max_{u \in U} \min_{\vartheta \in V} M \left[ \rho(\hat{Y}(u, \vartheta), y_{TP}) \right]. \quad (60)$$

Стратегию  $u^*$  называют **максиминой**.

6. **Критерий превосходства** применяют для выбора оптимальной (наилучшей) стратегии в случаях, когда показатель эффективности является качественным и по его значениям можно лишь сравнить две стратегии и вынести суждения об их предпочтительности. Для выбора наилучшей стратегии в этом случае применяют метод парных сравнений на основе бинарных отношений превосходства.

## **КРИТЕРИИ АДАПТИВНОСТИ**

Формально критерий адаптивности записывается аналогично критериям пригодности и оптимальности, но только множество допустимых стратегий  $U$  и показатель эффективности  $W$  формируются в зависимости от текущей информации  $I_\theta$ :

$$K(I_\theta) \xrightarrow{S} U^r \{u^r : u^r \in U(I_\theta) \wedge W(u^r, I_\theta) \geq W_D(u, I_\theta)\}. \quad (61)$$

При формировании этих критериев основополагающими являются принципы:

- селекции;
- свободы выбора решения;
- самообучение и др.

1. **Критерий селекции** предполагает реализацию операции поэтапно и на каждом шаге осуществляется выбор (селекция) нескольких наилучших, в условиях данного этапа, решений

$$W(u^*, I_\theta) \geq W_D(u, I_\theta), \quad u \in U(I_\theta), \quad u^r \in U^r, \quad U^r \subset U, \quad (62)$$

где  $W_D(u, I_\theta)$  – заданный, достаточно высокий уровень удовлетворения.

Это позволяет на следующем этапе рассматривать возможные комбинации принятия решений и отбирать наилучшие по каждой ветви, формировать новое множество наилучших решений. Сохранение на каждом шаге нескольких лучших стратегий  $U^r$  обеспечивает возможность гибко реагировать на изменяющуюся ситуацию –  $I_\theta$ , переходя с одной траектории развития на другую в пределах отобранного  $U^r$ .

2. **Критерий свободы выбора решений** формирует правило выбора стратегий для систем, обладающих свойством самоорганизации ( $L$ -качеством). Здесь также решения принимаются поэтапно, но кроме того есть возможность исходя из текущей ситуации пересмотреть предыдущие решения, т.е. процесс принятия решений в данном случае носит итерационный характер.

3. **Критерий самообучения** предполагает, что система, реализующая операцию, обладает способностью накапливать и анализировать текущую информацию о внешних воздействиях, реакциях на них и результатах реагирования. По результатам анализа может осуществляться корректировка как реакций в сто-

рону повышения эффективности, так и критерия эффективности  $K(I_\theta)$ .

В заключение ещё раз подчеркнем, что при выборе критерия эффективности определяющим фактором является **согласование его с целью операции** –  $A_0$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Дегтярев Ю.И.* Системный анализ и исследование операций. М., 1996.
2. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М., 1981.
3. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М., 1980.
4. *Философский энциклопедический словарь.* М., 1983.
5. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М., 1978.
6. *Гермейер Ю. Б.* Введение в теорию исследования операций. М., 1971.
7. *Крючков Ю. В., Охотников Г. Н.* и др. Прикладные проблемы системотехники / Под ред. А. В. Ильичева. М., 1995.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т. 3: Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М., 1988.

### Рекомендуемая литература

1. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М., 1981.
2. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М., 1980.
3. Исследование операций / Под ред. В.С.Баумана. М., 2004.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ПРЕДПОСЫЛКИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА.....	10
2. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА.....	12
3. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА .....	14
4. СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	19
5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ.....	27
6. МОДЕЛЬ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ .....	35
7. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИИ.....	37
8. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	44
9. ПРИНЦИПЫ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ.....	52
10. КОНЦЕПЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ .....	56
11. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	59
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ .....	69

*Учебное издание*

ТЕОРИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Степаненко Евгений Антонович

Учебное пособие

---

Подписано в печать 05.11.2008. Формат 60×84 1/16.  
Бумага тип №1. Уч.-изд. л. 4,2. Усл. печ. л. 4,9.  
Тираж 100 экз. Заказ №

Кубанский государственный университет  
350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149